МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електроніки, інформаційних систем
та програмного забезпечення
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

на тему Розробка системи керування трифазним двигуном на основі мікроконтролера

Виконав: студент 4 курсу, групи 6.1713-с2
спеціальності 171 «Електроніка»
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Електроніка
(код і назва освітньої програми)

Катеринич О.А.
(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н. доц. Шмалій С.П.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент зост. дир. ПП НВП „Екотех" Шершов С.А.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 171 «Електроніка»
(код і назва)
Освітня програма Електроніка
(код і назва)
Спеціалізація _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри Критська Т.В.
"9" 02 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Катеринчуку Олександру Анатолійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Розробка системи керування трифазним двигуном на основі мікроконтролера

керівник роботи к.т.н. доц. Шмалій С.П.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "23" грудня 2025 року № 1830-с

2 Строк подання студентом роботи _____

3 Вихідні дані до роботи Напруга 220 В, потужність 1500 Вт.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз систем управління електроприводом
Розробка блока управління електроприводом, розрахункова частина, конструкторсько-технологічна частина
Економічне обґрунтування

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Схема електрична структурна, схема електрична принципова Схема електрична принципова блока живлення, плата друкована Охорона праці, економічні показники

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	к.т.н. доц. Шмалій С.Л.		11.05.2026
2	к.т.н. доц. Шмалій С.Л.		20.05.26
3	к.т.н. доц. Шмалій С.Л.		24.05.26
4	к.т.н. доц. Шмалій С.Л.		28.05.26
5	к.т.н. доц. Шмалій С.Л.		30.05.26

7 Дата видачі завдання 9.02.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Робота над 1 розділом	16.05.2026	
2	Робота над 2 розділом	20.05.2026	
3	Робота над 3 розділом	24.05.2026	
4	Робота над 4 розділом	28.05.2026	
5	Робота над 5 розділом	30.05.2026	
6	Оформлення записки та графічного матер.	1.08.2026	

Студент _____ Катеринич О.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) _____ Шмалій С.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Гуриєв К.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Сторінок - 91, рисунків - 20, таблиць - 18, використаних джерел - 37.

ІНДИКАТОР, ДАТЧИК ШВИДКОСТІ, ПАНЕЛЬ УПРАВЛІННЯ, ВЕРСТАТ, МІКРОКОНТРОЛЕР, СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ, ДВИГУН, АЛГОРИТМ.

В дипломному проекті розроблено систему управління електроприводом трифазним двигуном. Дана система забезпечує регулювання і підтримку швидкості обертання двигуна в заданому діапазоні. Розробка виконана на сучасній елементній базі з використанням сучасного мікроконтролеру.

Проведено необхідні технічні та економічні розрахунки та розроблені заходи з охорони праці та техногенної безпеки.

ЗМІСТ

Вступ 6
1 Аналіз системи управління електроприводом 8
1.1 Опис об'єкта керування 8
1.2 Технічні характеристики об’єкта 9
1.3 Аналіз структурних схем електроприводу з цифровим управлінням 10
1.4 Методи управління 13
1.5 Аналіз існуючих рішень 20
2 Розробка блока управління електроприводом 29
2.1 Управління електроприводами на базі мікроконтролера 29
2.2. Вибір пристрою індикації 34
2.3 Засоби реалізації зворотного зв'язку 37
2.4. Драйвер двигуна 41
2.5 Аналіз схемних рішень плавного заряду ємності 45
2.6 Вибір транзистора 48
3 Розрахункова частина 49
3.1 Розрахунок стабілізованого джерела напруги 49
3.1.1 Розрахунок випрямляча джерела живлення 51
3.1.2 Розрахунок параметрів вторинної обмотки трансформатора 52
3.1.3 Вибір магнітопроводу і розрахунок обмоток трансформатора 53
3.2 Датчики системи управляння 57
3.3 Моделювання блоку живлення 58
4 Конструкторсько-технологічна частина 61
4.1 Конструкція системи управління 61
4.2 Виготовлення друкованої плати 62

4.3 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів 63
4.4 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів 66
4.5 Виробнича санітарія 67
4.6 Електробезпека 69
4.7 Пожежна та техногенна безпека 74
5. Економічне обґрунтування 76
5.1 Розшифровка суми витрат по статтям кошторису 76
5.2 Розрахунок собівартості серійного виробу проводиться на основі калькуляційних статей витрат 81
Висновки 84
Перелік використаних джерел 85
Додаток А 89
Додаток Б 90
Додаток В 91

ВСТУП

Машинобудування залишається фундаментом науково-технічного прогресу, однак на сучасному етапі його розвиток визначається не просто створенням нових верстатів, а глибиною інтеграції цифрових технологій керування [1]. Металообробні верстати, як основа виробничої бази, сьогодні еволюціонують у бік гнучких виробничих модулів, де точність обробки безпосередньо залежить від якості регульованого електропривода подачі та шпинделя [2, 3].

На відміну від транспортного або тягового електропривода, промислові верстати висувають специфічні вимоги до керування: необхідність надточного позиціонування інструмента, підтримання сталого моменту на низьких швидкостях (режим різання) та адаптація до змінної жорсткості технологічної системи. Тому вдосконалення автоматизації виробництва на основі мікроелектронної техніки є одним із ключових напрямків прогресу [4].

Сучасний етап автоматизації характеризується переходом від простих частотно-регульованих асинхронних приводів до інтелектуальних систем керування на базі мікроконтролерів та промислових комп'ютерів. Особливістю цього етапу є поява якісно нових технічних засобів — мереж на базі мікроелектроніки [5]. Ключовою тенденцією є використання багатоосьових синхронних приводів та компенсація динамічних взаємовпливів між каналами керування (наприклад, у поздовжніх подачах координатно-розточувальних верстатів) [6].

Впровадження автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСУ ТП) набуває особливого значення у зв'язку зі зростанням вимог до швидкості обчислення, обробки та видачі інформації [7]. Тому розробка та дослідження структур і режимів функціонування АСУ ТП на основі мікрокомп'ютерів є актуальним завданням. Використання мікрокомп'ютерів дозволяє на порядок знизити витрати, забезпечує підвищення ефективності та розширення функціональних можливостей.

Сьогодні розробка АСУ ТП нерозривно пов'язана з концепцією прогнозованого обслуговування та промислового інтернету речей. Наприклад, сучасні системи керування здатні в реальному часі аналізувати вібрації за сигналами зворотного зв'язку від енкодера осі, автоматично змінюючи швидкість обертання шпинделя для гасіння автоколивань, що безпосередньо підвищує якість обробленої поверхні та ресурс інструмента.

Основною, визначальною метою керування обладнанням, технологічними і виробничими процесами за допомогою АСУ ТП є підвищення продуктивності праці, поліпшення якості продукції та раціональне використання матеріально-сировинних і паливно-енергетичних ресурсів. Подальше вдосконалення АСУ ТП пов'язане з підвищенням їх економічної ефективності шляхом індустріального створення автоматизованих технологічних комплексів.

Рівень автоматизації виробничих процесів, продуктивність праці та якість продукції, що випускається, визначаються електроозброєністю праці, основу якої складають регульовані електричні машини. У загальному випадку можна виділити два основні завдання, що вирішуються регульованим електроприводом: керування моментом і швидкістю обертання двигуна. Тому ставиться завдання розробити блок керування електродвигуном на базі мікроконтролера, який дозволить на сучасній елементній базі забезпечити якісне регулювання [8].

Метою дипломного проекту є розробка системи програмного керування електроприводом змінного струму для верстатного обладнання з урахуванням сучасних вимог до надійності та енергоефективності.

1 АНАЛІЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

1.1 Опис об’єкта керування

Як об’єкт керування в даній роботі розглядається настільний фрезерний верстат з числовим програмним керуванням (ЧПК), призначений для обробки листових матеріалів, пластику, деревини, алюмінію та текстоліту [6]. Такий тип обладнання є характерним представником класу металорізальних верстатів малої потужності, де електропривод відіграє ключову роль у забезпеченні необхідної якості обробки.

До складу верстата входять наступні основні вузли:

- Станина та портальна конструкція з лінійними напрямними.

- Три координатні приводи подачі (осі X, Y, Z) з кроковими або серводвигунами.

- Шпиндельний вузол (безпосередньо робочий інструмент) з трифазним електродвигуном.

- Система ЧПК та перетворювач частоти (VFD).

Основним об'єктом керування в рамках даного аналізу є трифазний асинхронний високошвидкісний шпиндель, який безпосередньо обертає ріжучий інструмент (фрезу, гравер). Він являє собою високообертовий асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, конструктивно виконаний в одному блоці з цанговим затискачем для оснастки [9].

Шпиндельний двигун встановлюється вертикально у фланцеве кріплення порталу верстата. Його особливістю є відсутність проміжних механічних передач (пасових або редукторних) — інструмент кріпиться безпосередньо у цанговий патрон, що насаджений на вал двигуна. Така конструкція називається прямим приводом. Залежно від моделі, двигун оснащується повітряним або водяним радіатором для відведення тепла, що виникає на високих частотах обертання.

Застосовуються двигуни закритого типу з литою алюмінієвою оболонкою типорозміру GDZ-80 (діаметр 80 мм). Для зменшення биття на високих швидкостях використовуються високоточні підшипники класу P4 (наприклад, 7005C P4, 6002CP4) [10].

1.2 Технічні характеристики об'єкта

Для аналізу обрано двигун потужністю 1.5 кВт, який є найбільш поширеним у верстатах настільного формату. Типові параметри згідно з даними виробників наведено в таблиці 1.1 [10].

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики трифазного шпиндельного двигуна потужністю 1.5 кВт

Параметр	**Значення**
Номінальна потужність	1.5 кВт (2 к.с.)
Номінальна напруга	220 В (трифазний вихід з інвертора)
Номінальний струм	6.0 – 8.0 А (залежно від моделі 220В/380В)
Діапазон швидкості	0 – 24 000 об/хв
Робоча частота струму	0 – 400 Гц (номінал 400 Гц для 24000 об/хв)
Максимальний крутний момент	0.59 – 0.91 Н·м
Тип цанги	ER11 (діаметр інструменту до 7 мм) або ER16/ER20
Клас ізоляції	Class F (155°C)
Охолодження	Повітряне (вентилятор) або Водяне
Габарити (двигуна)	Ø80 х 195 мм (або 80х80 у квадратному виконанні)
Вага	≈ 4.0 – 7.0 кг

Особливості функціонування

1. Високошвидкісний режим: Робоча частота обертання значно перевищує стандартну промислову частоту (50 Гц). Для досягнення 24000 об/хв необхідно живити двигун частотою 400 Гц, що неможливо без використання

перетворювача частоти (VFD), який перетворює однофазну 220В мережу на трифазну високочастотну напругу [3].

Закон керування: Для стабілізації обертів під навантаженням (наприклад, при заглибленні фрези в алюміній) система керування електроприводом реалізує скалярне (V/f) або векторне керування. Скалярне керування підтримує співвідношення напруга/частота (V/Hz) для забезпечення постійності магнітного потоку двигуна, що є оптимальним для верстатів з ремінною передачею або прямим приводом шпинделя.

3. Режими навантаження: Верстат працює в змінних режимах. При фрезеруванні пластмас навантаження мінімальне, при нарізанні канавок у сталі — максимальне. Система керування повинна забезпечувати стабільність обертів для чистоти поверхні та запобігання поломки інструмента.

4. Вимоги до точності: Геометрична точність верстата вимагає, щоб радіальне биття шпинделя не перевищувало 0.01 – 0.015 мм.

В якості об’єкта для дослідження обраний трифазний короткозамкнений асинхронний двигун типу GDZ-80-1.5B (або аналогічні), оскільки він є доступним, має лінійні механічні характеристики в робочому діапазоні та потребує складного алгоритму керування частотою і напругою для виконання технологічних операцій [10].

1.3 Аналіз структурних схем електроприводу з цифровим управлінням

Розглянемо типову та найбільш універсальну функціональну схему неавтономного електропривода з цифровим керуванням (рис. 1.1). Керувальна обчислювальна машина (КОМ), отримуючи зовнішній сигнал завдання u0 (який відповідає потрібному куту повороту, лінійному переміщенню або швидкості), формує командний сигнал m для перетворювача напруги, до якого підключений двигун. Інформація про регульовану координату Uoc надходить від датчика зворотного зв’язку (ДЗЗ) і, незалежно від форми поча-

ткового сигналу, має бути перетворена у цифровий вигляд. Отже, маємо одноконтурну схему, де КОМ виконує роль регулятора та повинна реалізовувати в цифровій формі певні алгоритми керування. При цьому вихідний сигнал КОМ може бути подано не в цифровому вигляді, а, наприклад, у вигляді ШІМ-імпульсів для керування ключами перетворювача напруги. Детальні принципи побудови та програмування таких пристроїв вивчаються в магістерському курсі мікропроцесорної техніки, тут же розглядаються лише загальні алгоритми керування та методи синтезу таких систем.

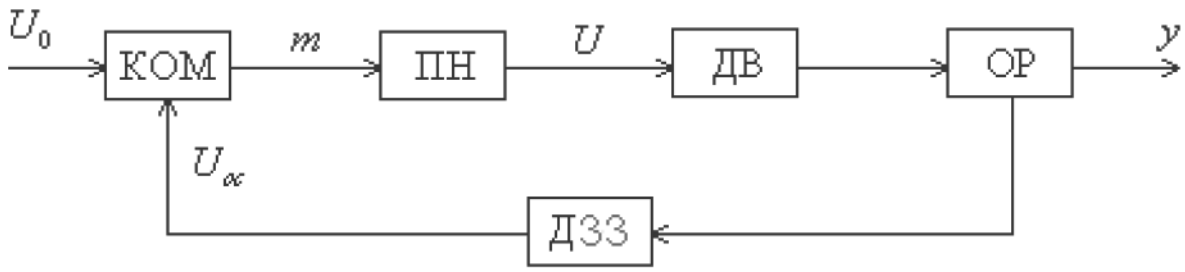


Рисунок 1.1 - Функціональна схема електроприводу з цифровим управлінням

Керуюча обчислювальна машина має ряд властивостей, які визначають нові позитивні якості цифрових приводів.

Розвинені арифметичні і логічні можливості, які дозволяють реалізувати складні лінійні і нелінійні закони управління, функціональну екстраполяцію, трансцендентні залежності і перерахунок координат з однієї системи в іншу у багатозв'язковому електроприводі, алгоритми адаптивного управління.

У розглянутій одноконтурній схемі з керувальною обчислювальною машиною (КОМ) вирішальну роль відіграють такі властивості, як наявність пам’яті, програмованість та архітектура, подібна до звичайної ЕОМ. Пам’ять дозволяє формувати поточне керування з урахуванням попередніх значень координат системи, а також реалізовувати самоконтроль привода завдяки

вбудованим програмам тестового контролю та діагностики. Програмованість дає змогу створювати багаторежимні та багатофункціональні приводи на основі мікропроцесорних систем. За своєю структурою, складом і функціями КОМ нагадує звичайну ЕОМ: мікропроцесор разом із пристроєм керування виконує роль центрального процесора. До складу КОМ також входять система пам'яті, пристрої введення-виведення (зокрема, ЦАП та АЦП), інтерфейс і канал обміну даними. Спеціалізація такого обчислювача визначається розрядністю, системою команд, використанням аналого-цифрових перетворювачів для зв'язку з об'єктом та обмеженим обсягом пам'яті. Під мікропроцесором (МП) розуміють функціонально завершений пристрій програмної обробки даних, реалізований у вигляді однієї або кількох великих інтегральних схем (ВІС), що містить арифметико-логічний пристрій (АЛП), елементи внутрішньої пам'яті, керування та інтерфейсу, тобто є мікроконтролером. Важливо зазначити, що цифрове керування може бути реалізоване й у багатоконтурних системах. У такому разі навіть один мікроконтролер здатен формувати сигнали регулювання для кожного з контурів (наприклад, для контуру струму, швидкості та кута), що розширює функціональність, порівняно з базовою одноконтурною схемою (рис. 1.2).

На практиці використовують приводи двох типів. Перший тип — цифро-аналогові приводи, де один чи декілька контурів (наприклад, контур струму) реалізовані на аналогових регуляторах, а головний контур (наприклад, контур швидкості) — на цифрових. Такі схеми є найпоширенішими, оскільки швидкодія цифрового регулятора часто є недостатньою для керування струмовим контуром. Другий тип — приводи з прямим цифровим керуванням усіма контурами, де аналогові регулятори та пристрої повністю відсутні. Однак при прямому цифровому керуванні значно ускладнюються алгоритми (особливо для струмового контуру та силового перетворювача), а також зростають вимоги до швидкодії мікроконтролеру.

1.4 Методи управління

Для вирішення завдань регулювання швидкості і моменту в сучасному електроприводі застосовують два основні методи частотного управління:

– скалярне управління;

– векторне управління.

Серед усіх різновидів сучасного керованого електропривода найширше практичне застосування на сьогодні має асинхронний електропривод із так званим скалярним алгоритмом керування. Його популярність зумовлена відносною простотою реалізації та достатньою надійністю для багатьох технологічних процесів.

Такий привод зазвичай використовується у складі насосних агрегатів, промислових вентиляторів, компресорних установок, димососів, транспортерів та інших механізмів, де не вимагається високої динамічної точності чи роботи в режимі позиціонування. Головне завдання в таких системах — підтримувати або задану швидкість обертання вала двигуна (у цьому разі в схемі передбачається датчик швидкості, який замикає контур зворотного зв’язку), або певний технологічний параметр, наприклад, тиск у трубопроводі, витрату рідини чи газу, розрідження або температуру. У другому випадку замість датчика швидкості використовується відповідний технологічний датчик (тиску, витрати, температури тощо), сигнал якого надходить до керувальної обчислювальної машини (КОМ) або регулятора.
Таким чином, скалярне керування асинхронним двигуном забезпечує енергоефективне та досить стабільне регулювання в широкому діапазоні для механізмів, що не потребують високої точності відпрацювання моменту чи швидкості.

Основний принцип скалярного управління - зміна частоти і амплітуди напруги живлення згідно із законом $U/f = \text{const}$, де $n \geq 1$. Конкретний вид залежності визначається вимогами, що пред'являються до приводу навантаженням. Зазвичай за незалежну дію береться частота, а значення напруги при цій частоті визначає вид механічної характеристики, значення

пускового і критичного моментів. Скалярне управління забезпечує постійність перевантажувальної здатності приводу незалежно від частоти напруги, проте має місце зниження моменту, що розвивається двигуном, при низьких частотах (при $f < 0{,}1f_{ном}$). Максимальний діапазон регулювання швидкості обертання ротора при незмінному моменті опору для приводів із скалярним управлінням досягає 1:10 [7].

Незважаючи на те, що метод скалярного керування асинхронним двигуном є відносно простим у технічній реалізації (що й зумовлює його широке розповсюдження в системах насосів, вентиляторів і компресорів), він має два принципові недоліки, які суттєво звужують сферу його застосування.

А) якщо на валу двигуна відсутній датчик швидкості (тахогенератор або енкодер), точне регулювання частоти обертання стає неможливим. Причина полягає в тому, що при скалярному керуванні задається співвідношення напруги та частоти, але фактична швидкість ротора залежить від навантаження на валу – чим більше навантаження, тим більше ковзання і тим нижча реальна швидкість. Встановлення датчика швидкості вирішує цю проблему: зворотний зв'язок дозволяє підтримувати задану швидкість незалежно від зміни навантаження.

Б) навіть за наявності датчика швидкості скалярний метод не дозволяє безпосередньо керувати моментом на валу двигуна. Теоретично можна встановити спеціальний датчик моменту (наприклад, тензометричний вал), але такі пристрої мають дуже високу вартість – часто вона перевищує ціну всього електропривода. Крім того, навіть при наявності такого датчика система регулювання моменту виходить вкрай інерційною (повільною), оскільки вимірювання моменту потребує певного часу, а сам процес корекції має значні запізнення.

Ключове обмеження полягає в наступному: при скалярному керуванні неможливо одночасно регулювати і момент, і швидкість. Конструктору або технологу доводиться вибирати, який з цих двох параметрів є критично важливим для конкретного технологічного процесу. Наприклад, у насосній

установці пріоритетом є швидкість (а отже, продуктивність), а момент є похідним; у деяких механізмах, навпаки, важливіше обмежити момент (наприклад, при захисті від перевантаження).

Для усунення зазначених недоліків німецька фірма SIEMENS ще в 1971 році запропонувала принципово інший підхід – метод векторного керування. Його суть полягає у просторовому розділенні струму статора на дві ортогональні складові: одна відповідає за створення магнітного потоку (намагнічування), інша – за формування електромагнітного моменту. Це дозволяє керувати моментом і швидкістю незалежно, за аналогією з двигунами постійного струму.

Однак перші промислові зразки приводів з векторним керуванням вимагали використання спеціальних двигунів з вбудованими датчиками магнітного потоку (наприклад, датчиками Холла або вимірювальними обмотками в статорі). Це суттєво обмежувало їх застосування, оскільки такі двигуни були дорогими, менш надійними та не завжди доступними для модернізації існуючого обладнання.

У сучасних електроприводах проблема вирішена шляхом використання так званого бездатчикового векторного керування. Замість фізичних датчиків потоку або швидкості в систему керування закладається математична модель асинхронного двигуна, яка в реальному масштабі часу обчислює оцінки поточних значень магнітного потоку, моменту на валу та швидкості обертання. Для роботи такого алгоритму достатньо лише датчиків струму фаз статора (які є недорогими і входять до складу будь-якого перетворювача частоти) та вимірювання напруги на виході перетворювача.

Завдяки спеціальній структурі системи керування (яка включає спостерігачі стану, адаптивні фільтри та алгоритми оцінювання) забезпечується:

- незалежне регулювання моменту та швидкості – зміна одного параметра практично не впливає на інший;

- висока динаміка – регулювання відбувається практично безінерційно, з типовими сталими часу порядку одиниць-десятків мілісекунд (на відміну від інерційного регулювання моменту через датчик у скалярному методі);

- можливість роботи без датчика швидкості на валу – оцінка швидкості отримується з математичної моделі з достатньою для більшості застосувань точністю (зазвичай 0,1–1% від номінальної швидкості).

Таким чином, сучасне векторне керування є еволюційним розвитком скалярного методу, який долає його фундаментальні обмеження ціною значного ускладнення алгоритмів обробки сигналів і підвищених вимог до обчислювальної потужності керувальної обчислювальної машини (КОМ). Саме тому для простих технологічних процесів (насоси, вентилятори) досі достатньо скалярного керування, а там, де потрібна висока динаміка та точність (верстати, роботи, підйомні механізми), застосовується векторне керування.

При невеликих діапазонах зміни швидкості (не більше 1:100) і вимогах до точності її підтримки не більше ±0,5% застосовують без датчикове векторне управління. Якщо ж швидкість обертання валу змінюється в широких межах (до 1:10000 і більше), є вимоги до високої точності підтримки швидкості обертання (до ±0,02% при частотах обертання менше 1Гц) або є необхідність позиціонування валу, а також при необхідності регулювання моменту на валу двигуна на дуже низьких частотах обертання, застосовують методи векторного управління із зворотним зв'язком за швидкістю. Методи управління електроприводом змінного струму приведені в таблиці 1.2.

Поряд із безсумнівними перевагами — незалежним керуванням моментом і швидкістю, високою динамікою, можливістю роботи без датчика швидкості — методу векторного керування на ранніх етапах його розвитку були властиві певні недоліки:

- Велика обчислювальна складність: перетворення координат, робота з комплексними величинами, розрахунок оцінок потоку та швидкості в

реальному часі вимагали значних обчислювальних ресурсів.

- Необхідність точного знання параметрів двигуна: активний опір статора, індуктивності, стала часу ротора тощо. Відхилення цих параметрів (наприклад, через нагрівання двигуна або насичення магнітопроводу) призводило до погіршення якості регулювання.

- Дещо більші пульсації швидкості: при роботі з постійним статичним навантаженням коливання швидкості у векторних системах історично виявлялися більшими, ніж у скалярних (що було пов'язано з дискретністю роботи ШІМ, похибками оцінювання та обмеженнями частоти квантування).

Таблиця 1.2 – Методи управління

Метод формування вихідної напруги	- синусоідальна ШІМ; - метод просторової модуляції базових векторів (Spase Vector Modulation).
	Частота ШІМ, що настроюється, 8…16 кГц для потужностей від 0,75 до 30 кВт та 4…8 кГц для потужностей вище 37 кВт. Для зниження рівня акустичного шуму використовується метод “м'якої” ШІМ.
Метод управління двигуном	Скалярне управління: - класичне скалярне управління за заданою характеристикою U/f; - скалярне управління з компенсацією падіння напруги на статорі; - скалярне управління з компенсацією ковзання
	Векторне управління: - бездатчикове векторне управління швидкістю; - бездатчикове векторне управління моментом; - векторне управління швидкістю з датчиком зворотного зв'язку за швидкістю; - векторне управління моментом з датчиком зворотного зв'язку за швидкістю.
Метод гальмування двигуна	- постійним струмом; - динамічне гальмування з використанням вбудованого або зовнішнього гальмівного резистора.

Сьогодні, з огляду на стрімкий розвиток мікроконтролерної елементної бази, зазначені недоліки значною мірою втратили свою гостроту:

- Обчислювальна складність більше не є проблемою. Наприклад, деякі сучасні системи керування електроприводами активно базуються на високопродуктивних 32-розрядних мікроконтролерах із ядрами ARM Cortex-M4, Cortex-M7 та Cortex-M33, які оснащені апаратними блоками FPU (Floating Point Unit) і DSP-інструкціями для цифрової обробки сигналів. Такі мікроконтролери здатні виконувати повний цикл алгоритмів векторного керування електродвигуном — включаючи перетворення координат Кларка та Парка, роботу ПІД-регуляторів, оцінку стану двигуна та генерацію ШІМ-сигналів — упродовж одиниць або десятків мікросекунд при тактових частотах від 100 до 600 МГц.

Навіть доступні за вартістю мікроконтролери сімейств STM32F3, STM32G4 або dsPIC33 вже містять спеціалізовані периферійні модулі для задач електропривода: високошвидкісні АЦП із синхронізацією по ШІМ, компаратори, програмовані операційні підсилювачі, апаратні таймери керування інверторами, модулі dead-time та захисту силових каскадів. У результаті обчислювальна складність сучасних алгоритмів керування більше не є суттєвим обмеженням навіть для бюджетних систем [11].

Однією з важливих переваг сучасних електроприводів є автоматизація процесу налаштування параметрів двигуна. Більшість сучасних перетворювачів частоти підтримують процедури автоматичної ідентифікації (auto-tuning), під час яких система самостійно виконує тестові вимірювання: подає короткочасні сигнали на обмотки двигуна, вимірює струми та напруги, аналізує динамічну реакцію й автоматично визначає параметри електродвигуна. Отримані дані зберігаються у пам’яті контролера та використовуються для подальшого оптимального керування приводом.

Крім статичної ідентифікації, сучасні системи застосовують адаптивні алгоритми спостереження та оцінки параметрів у реальному часі. Це дозволяє автоматично компенсувати зміну характеристик двигуна, наприклад зміну опору обмоток статора внаслідок нагрівання або зміну магнітних параметрів під навантаженням. Завдяки цьому підвищується точність підтри-

мання моменту та швидкості обертання в широкому діапазоні режимів роботи.

Суттєвий прогрес також досягнуто у сфері широтно-імпульсної модуляції та силової електроніки. Сучасні IGBT- та MOSFET-транзистори на базі технологій SiC (карбід кремнію) та GaN (нітрид галію) дозволяють працювати на частотах ШІМ 16–40 кГц і вище, зменшуючи рівень акустичного шуму та покращуючи якість формування струму двигуна.

Для керування інверторами широко використовуються вдосконалені алгоритми модуляції, зокрема просторово-векторна широтно-імпульсна модуляція (SVPWM), яка забезпечує ефективніше використання напруги живлення, зниження гармонічних спотворень та менші пульсації електромагнітного моменту. Додатково застосовуються цифрові спостерігачі стану, фільтри та алгоритми компенсації дискретності, що покращують плавність роботи привода на низьких швидкостях.

У сучасних умовах різниця між скалярним та векторним методами керування за рівнем пульсацій швидкості або стабільністю роботи стала значно меншою для більшості побутових і промислових застосувань. Проте векторне керування й надалі залишається основним рішенням для систем, де потрібна висока точність регулювання моменту, швидка динамічна реакція та ефективна робота привода в широкому діапазоні навантажень.

Незважаючи на прогрес у мікроконтролерах, існують технологічні області, в яких можливе застосування тільки скалярного керування. Найхарактерніший приклад — груповий електропривод (або багатодвигунний привод), коли від одного перетворювача частоти живляться паралельно кілька асинхронних двигунів. Типові випадки: текстильна промисловість (група прядильних машин), конвеєрні лінії з кількома двигунами на одному валу, системи синхронізації валів у поліграфії, деякі типи мішалок та центрифуг.

Векторне керування неможливе, тому що алгоритми векторного керування потребують знання миттєвих значень струмів і напруг кожного

окремого двигуна, а також його параметрів. При паралельному підключенні кількох двигунів до одного перетворювача:

- неможливо виміряти струм кожного двигуна окремо (є лише загальний струм);
- двигуни можуть мати різні параметри, навантаження та ступінь зносу;
- будь-яка модель «усередненого» двигуна буде неточною;
- виникають перетоки струмів між двигунами, які дестабілізують систему.

У таких випадках скалярне керування залишається єдиним практичним рішенням. Сучасні мікроконтролери дозволяють реалізувати його з мінімальними витратами, використовуючи простий алгоритм V/f (вольт-герцова характеристика) з IR-компенсацією падіння напруги на статорі та можливістю роботи зі слабленням поля для зони вище номінальної швидкості.

Таким чином, хоча обчислювальна складність векторного керування перестала бути проблемою для сучасних мікроконтролерів (навіть бюджетних), а автоматичне налагодження значно спростило ідентифікацію параметрів двигуна, скалярне керування зберігає свої позиції в ніші багатодвигунних приводів, а також у найпростіших, наддешевих або енергозберігаючих системах (наприклад, деякі вентиляторні та насосні установки), де додаткова точність векторного методу не виправдовує навіть незначного ускладнення програми. Вибір між скалярним і векторним методами сьогодні визначається не стільки потужністю мікроконтролера, скільки специфікою технологічного процесу та архітектурними обмеженнями (наявність окремих датчиків струму на кожен двигун, необхідність гальмівних режимів, вимоги до точності позиціювання тощо) [7].

1.5 Аналіз існуючих рішень

Використання нових напівпровідникових приладів дозволило принципово змінити не тільки топологію силової схеми інвертора, перш за все автономний інвертор напруги (АІН), але і принципи управління

інверторами. Для АІН і автономного інвертора струму (АІС) на повністю керованих «високовольтних ключах» застосовуються різні технології широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) - зі «стеженням» (релейного типу), програмна - з виборчим придушенням вищих гармонік, багаторівнева ШІМ, ШІМ в комбінації з амплітудно-імпульсною модуляцією і т. п. [12].

Автономний інвертор напруги отримує живлення від джерела напруги, з малим внутрішнім опором (акумуляторна батарея, випрямляч з ємнісним фільтром), на його виході при перемиканні силових напівпровідникових ключів генерується змінна напруга в формі послідовності різнополярних прямокутних імпульсів.

Перша гармоніка такій послідовності повинна відповідати необхідному значенню вихідної напруги. В цьому випадку для навантаження - асинхронного електродвигуна - інвертор також є джерелом з малим внутрішнім опором, тобто джерелом напруги [12].

Типова структурна схема однієї з існуючих систем управління електроприводів представлена на рис. 1.2.

Функціонально розроблений частотний перетворювач складається з наступних частин: нерегульованого випрямляча напруги; блоку живлення плати контролера; блоку плати управління; драйвера інвертора; власне інвертора; зв'язку з персональним комп'ютером по UART-інтерфейсу і блоків гальванічної розв'язки.

Блок управління реалізований на мікроконтролері AT90PWM3, що представляє собою економічний однокристальний мікроконтролер, що досягає продуктивності до 16 мільйонів інструкцій у секунду. Він призначений для виконання функцій управління в понижуючих та підвищуючих перетворювачах постійної напруги, синхронними електричними машинами на основі постійних магнітів, трифазними асинхронними електродвигунами і безколекторними електродвигунами постійного струму.

Принципова схема блоку управління на основі мікроконтролера AT90PWM3 представлена на рис. 1.3. Блок управління являє собою мікроконтролер з набором елементів, необхідним для його функціонування.

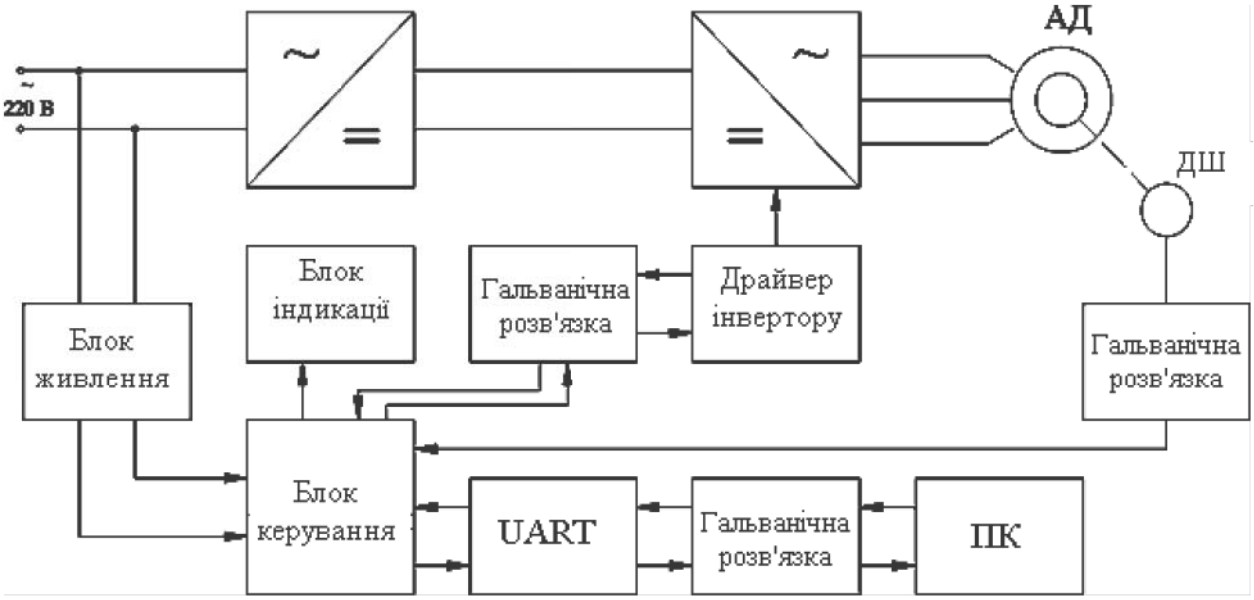


Рисунок 1.2 - Структурна схема системи управління електроприводу

У схемі блоку управління передбачені наступні гальванічні розв'язки: блоку управління з платою драйвера інвертора, інтерфейсу енкодера і UART-інтерфейсу для зв'язку з персональним комп'ютером. UART- інтерфейс забезпечує з'єднання з комп'ютером для управління роботою електроприводу, а також налагодження внутрішньої програми мікроконтролера [12].

Елементи C10, C11 і Z1 підключені до висновків XTAL1, XTAL2 мікроконтролера є тактовий генератор, необхідний для тактування ядра мікроконтролера.

Конденсатори C1-C8 пригнічують імпульсні перешкоди по ланцюгах живлення мікроконтролера і мікросхем гальванічної розв'язки. Кнопка S1 і резистори R3, R4 утворюють схему скидання, необхідну при апаратному зависанні контролера.

Конденсатор C9 пригнічує брязкіт контактів кнопки S1. Світлодіоди D1, D2 є індикаторами роботи мікроконтролера і виникнення помилки. Резистори R5, R6 обмежують струм через світлодіоди в допустимих для

портів мікроконтролера межах (20mA).

Елемент U2 - 74HC04 є HEX-інвертор, інвертується логічні рівні на виходах UH, WH і VH мікроконтролера, так як застосована в даній роботі ревізія чіпа мікроконтролера AT90PWM3 має недопрацювання фірми-виробника, що складається у відсутності зсуву фаз на 180 градусів між вихідними сигналами мікроконтролера керуючими верхніми і нижніми ключами інвертора.

Мікросхеми гальванічної розв'язки U1, U3, U5, U6 забезпечують повну гальванічну розв'язку плати блоку управління з зовнішніми пристроями, тим самим забезпечують безпеку мікроконтролера в разі виникнення аварійної ситуації у зовнішніх колах, а також в ланцюгах зв'язку плати управління з персональним комп'ютером.

Мікросхема U1 - ADUM1201 є двоканальний двонаправлений цифровий ізолятор. U3, U5, U6 - триканальні односпрямовані цифрові ізолятори.

Живиться блок мікроконтролера від мережевого трансформаторного блоку живлення забезпечує вихідну напругу 9В постійного струму і струм навантаження до 1 А, на платі мікроконтролера встановлений стабілізатор напруги LM7805, що забезпечує стабілізовану напругу живлення контролера 5В.

Ця схема реалізує найбільш популярний алгоритмом керування трифазним асинхронним електродвигуном - підтримкою сталості відносини напруга/частота (правило Костенко) і використанням синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції [3].

Для узгодження силових ключів інвертора з мікроконтролером AT90PWM3 використана мікросхема-драйвер 3-фазного мосту IR2130 - високовольтний, високошвидкісний драйвер МОП-транзисторів і IGBT-транзисторів з роздільними вихідними каналами управління ключами верхнього і нижнього рівнів.

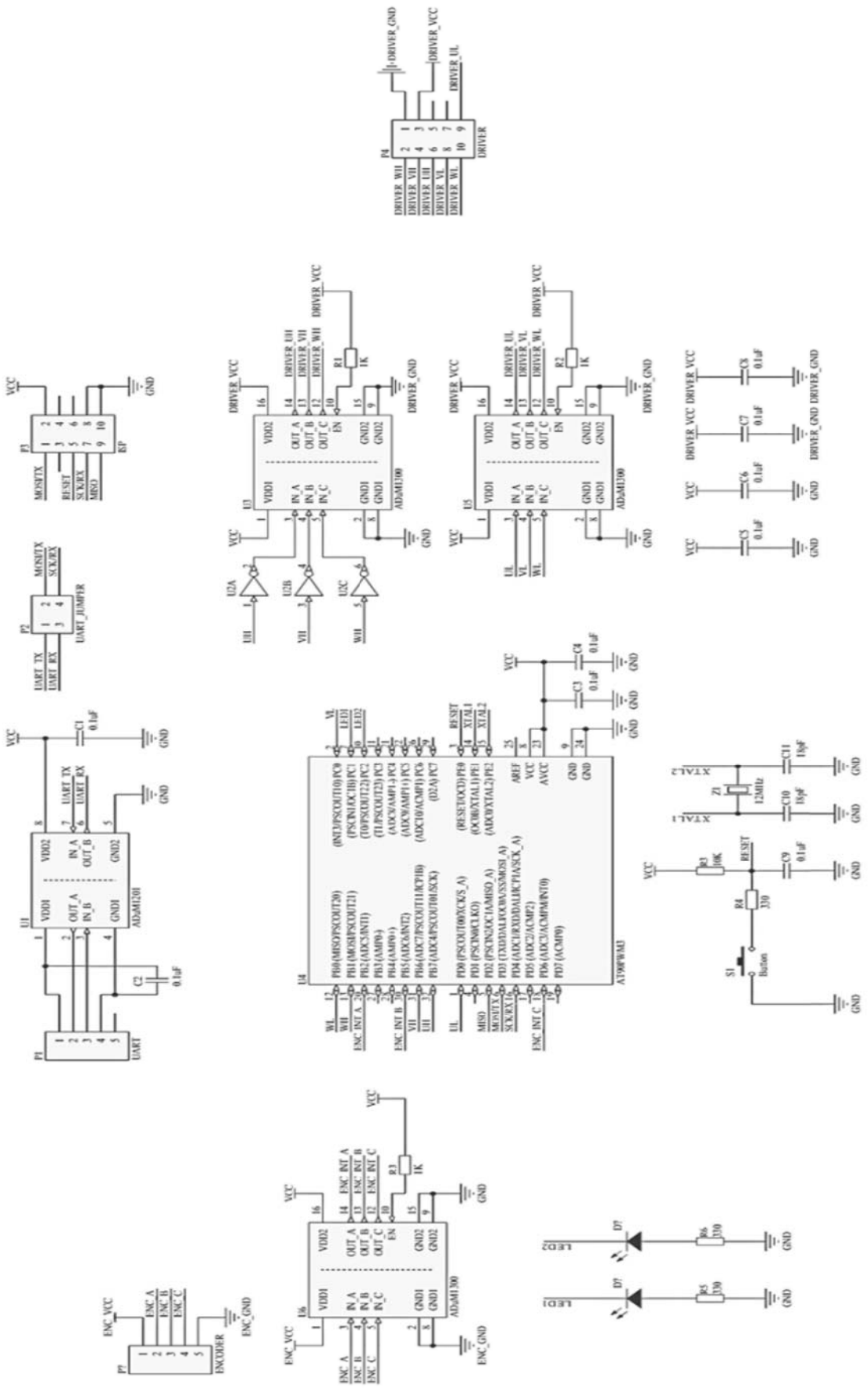


Рисунок 1.3 - Принципова схема блоку управління

Принципова схема інвертора на основі IR2130 представлена на рис. 1.4. В якості ключових транзисторів T1-T6 обрані польові транзистори типу IRF740. На схемі елементи C21, C22, C11, C12, C14 і VDS1 утворюють вхідний мережевий фільтр і випрямляч. Резистори R26 і R27 разом з реле K1 і пристроєм затримки включення на транзисторі T7 проводяться за схемою «м'якого» включення інвертора в мережу, необхідну для обмеження струму зарядки конденсаторів C11 і C12 і подачі повного напруги живлення на транзистори T1-T6 тільки після повного включення IR2130 і припинення всіх перехідних процесів в інверторі.

На мікросхемі U4 - TNY256 зібраний імпульсний блок живлення, що забезпечує стабілізовану вихідну напругу 15 В для живлення драйвера IR2130. Мікросхема TNY256 є спеціалізованим ШІМ-контролером для створення імпульсних блоків живлення невеликої потужності з мінімальною кількістю навісних компонентів.

Ланцюжки C15-R30-C20-R35 являють собою RC-фільтри, що поліпшують якість напруги на двигуні і зменшують перешкоди створюються приводом. Плавкі вставки F1-F3 відключають пристрій від мережі живлення в разі аварійної ситуації.

Контролер AT90PWM3 містить наступні елементи: 8 кБайт внутрісистемного програмованої флеш-пам'яті з підтримкою можливості читання під час запису, 512 байт EEPROM, 512 байт статичного ОЗУ, 53 лінії введення-виведення загального призначення, 32 робочих регістра загального призначення, три контролера силового каскаду (PSC), два гнучких таймера-лічильника з режимами порівняння і ШІМ, один UART з режимом DALI (інтерфейс управління освітленням з цифровою адресацією), 11-канальний АЦП з двома диференціальними вхідними каскадами і програмованим посиленням, 10-разр. ЦАП, програмований сторожовий таймер з внутрішнім генератором, послідовний порт SPI, вбудована налагоджувальна система і чотири програмно настроюються економічних режиму.

Завдяки контролерам силового каскаду, вбудованим в контролер

AT90PWM3, з'явилася можливість за допомогою фазового автоматичного підстроювання частоти (PLL) організувати високу частоту 64/32 МГц. Форма сигналів PSCn00 і PSCn01 в режимі центрального орієнтування вирівнюються по центру сигналу PSC лічильника.

Вихідна напруга АІН може регулюватися в межах від нуля і до середньодіючого значення напруги ланцюга постійного струму, за допомогою широтно-імпульсної модуляції в інверсії відданої на верхній і нижній ключі. Середнє значення напруги буде пропорційно коефіцієнту заповнення верхнього ключа, яке відповідає відношенню тривалості імпульсу до тривалості періоду (0-100%). Напруга на виході, в цьому випадку не буде гладкою кривою, а стане такою ж прямокутної форми як сигнал ШІМ, прикладений до верхнього ключу.

Якщо цей сигнал подати на фільтр низьких частот (ФНЧ), то напруга на виході фільтра буде пропорційно коефіцієнту заповнення верхнього ключа.

По ряду причин, в пристрої управління двигуном зазвичай не додають спеціальний фільтр низьких частот. По-перше, тому, що двигун сам діє як ФНЧ. Індуктивність і опір його обмоток створюють R-L фільтр низьких частот. Додатково, інерція ротора і навантаження створюють механічний ФНЧ. Вибираючи достатньо високу частоту ШІМ, можна забезпечити практично повну відсутність значущих пульсацій швидкості ротора. По-друге, струми, подані на обмотки навіть маленького двигуна, можуть досягати декількох ампер. Проходження такого струму через фільтр, наприклад RC, привело б до суттєвої втрати потужності в самому фільтрі і до небажаної втрати енергії.

Щоб керувати трифазним двигуном за допомогою синусоїдальних струмів, для кожної фази повинні бути згенеровані незалежні напруги. Драйвер для трифазного двигуна зазвичай складається з трьох півмостів, по одному на кожен вивод двигуна. Кожен напівміст складається з двох ключів.

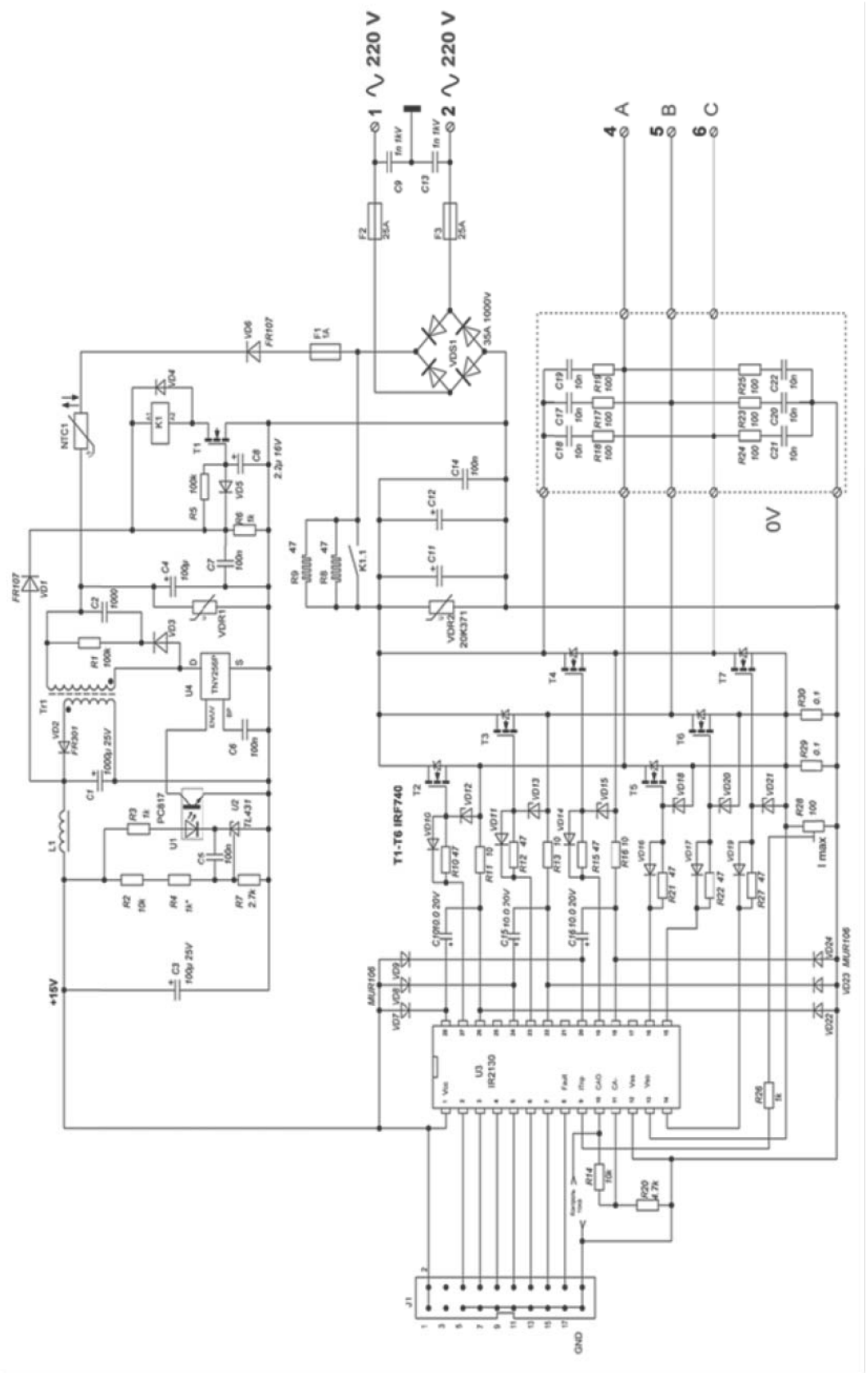


Рисунок 1.4 - Принципова схема інвертора на основі IR2130

Перемикання транзисторів не може бути миттєвим. На верхні і нижні ключі сигнали подаються в інверсії, тобто коли один ключ включається, інший ключ вимикається. Протягом цього переходу, буде короткий момент, коли один ключ закрився ще не повністю, а інший вже почав відкриватися. Виникає замикання між джерелом напруги живлення і землею через транзистори з дуже малим опором, відповідно, струм може бути дуже великим. Ця ситуація відома як наскрізний струм, і її потрібно уникати, так як велика ймовірність виходу драйвера з ладу, якщо не передбачено апаратний захист [13].

Аналізуючи переваги та недоліки структурних схем та схемотехнічних рішень розроблена структурна схема системи управляння згідно з завданням представлена на рис. 1.5.

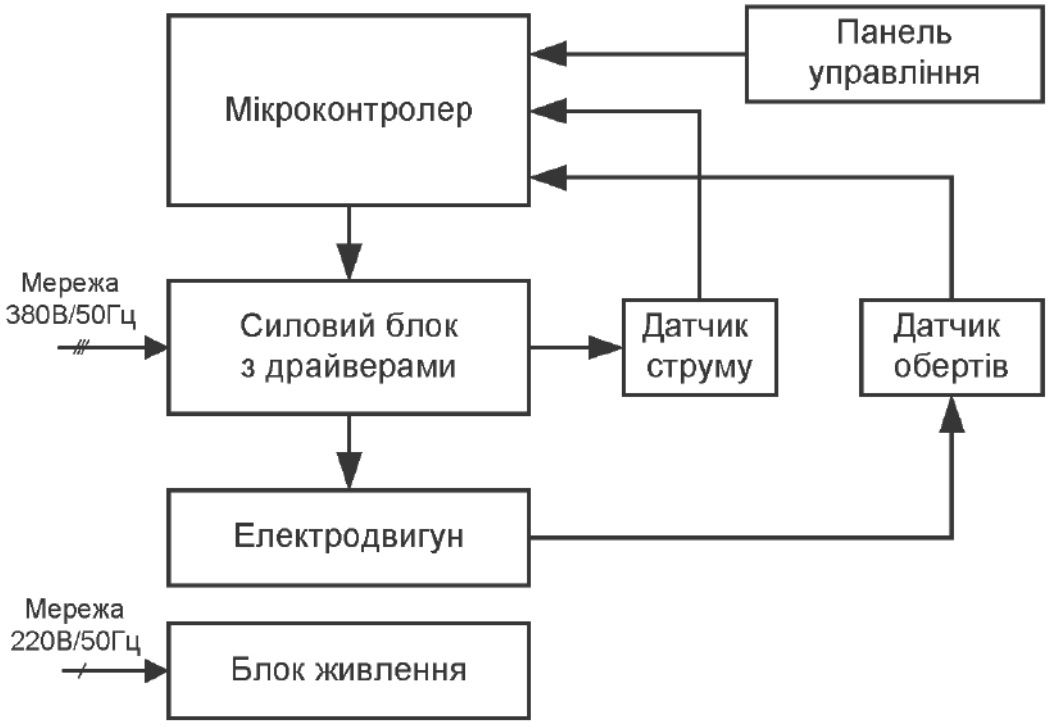


Рисунок 1.5 – Структурна схема системи управління

Структурна схема включає силовий блок з драйверами, датчики струму та обертів, панель управління, блок живлення та мікроконтролер.

В наступному розділі виконаємо розробку схемотехнічних рішень по кожному блоку структурної схеми.

2 РОЗРОБКА БЛОКА УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

2.1 Управління електроприводами на базі мікроконтролера

У різних галузях науки та промисловості широкого застосування набули програмовані мікроконтролери — спеціалізовані мікропроцесорні системи, призначені для реалізації функцій автоматизованого керування, регулювання, моніторингу та контролю технологічних процесів і електронних пристроїв. Особливу групу складають програмовані контролери для систем автоматичного регулювання. Найважливішим пристроєм будь-якої системи автоматичного регулювання є регулятор, задаючий основний закон управління виконавчим механізмом. Заміна класичних аналогових регуляторів універсальними програмованими мікроконтролерами, здатними програмно перебудовуватися на реалізацію будь-яких законів регулювання, записаних в пам'ять мікроконтролерів, забезпечує підвищення точності, надійності, гнучкості, продуктивності і зниження вартості систем управління. Великою гідністю універсальних мікроконтролерів є їх здатність виконувати ряд додаткових системних функцій: автоматичне виявлення помилок, контроль граничних значень параметрів, оперативне відображення стану систем і тому подібне

У системах автоматичного регулювання особливе місце виділяється для систем управління двигунами, в таких системах основною регульованою величиною є частота обертання якоря двигуна, яка змінюється при зміні навантаження. Використання замість аналогового регулятора мікроконтролера дозволяє істотно поліпшити процес регулювання. Застосування цифрового індикатора і клавіатури спрощує роботу по установці параметрів автоматичного регулювання і контролю регульованого значення [12].

У дипломному проекті розглядається розробка системи програмного управління на прикладі електроприводу фрезерного верстата. Як регулятор

використовується мікроконтролер, який повинен підтримувати визначену користувачем частоту обертання і видавати поточні обороти якоря двигуна.

Мікроконтролер - найбільш універсальний засіб для створення ядра інформаційного каналу сучасного електроприводу. Специфіка вимог до мікроконтролера для електроприводу витікає з виконуваних ним функцій. З одного боку, він управляє перетворювачем силового каналу, отримуючи сигнали зворотних зв'язків по струмах, напрузі, швидкості двигуна. З іншого боку, мікроконтролер повинен забезпечувати інтерфейсні функції для зв'язку з оператором, пристроєм управління верхнього рівня, іншими технологічними об'єктами.

Під час вибору мікроконтролера ключовим завданням є пошук оптимального рішення з мінімальною вартістю, яке водночас повністю відповідає вимогам системи щодо продуктивності, надійності та умов експлуатації.

На початковому етапі визначається роль мікроконтролера в електронній системі. Саме це формує перелік необхідних характеристик і стає основою для подальшого вибору. Наступним кроком є підбір мікроконтролера, який максимально відповідає технічним вимогам, потребує мінімальної кількості зовнішніх компонентів, має компактні розміри та прийнятну вартість. Найчастіше перевага надається однокристальним мікроконтролерам завдяки їхній доступності, простоті інтеграції та високій надійності.

Основні критерії вибору мікроконтролера наведені нижче у порядку пріоритетності.

1. Відповідність вимогам прикладної системи.

a) Наявність достатньої кількості контактів і портів введення/виведення. Недостатня кількість I/O-портів обмежить функціональність системи, а надлишкова — призведе до збільшення вартості. Для цієї системи мікроконтролер повинен мати щонайменше 3 порти введення/виведення.

b) Наявність необхідних периферійних модулів, зокрема послідовних інтерфейсів обміну даними та інших вбудованих апаратних ресурсів.

c) Достатня продуктивність ядра CPU, яка забезпечує стабільну обробку системних запитів і виконання програмного забезпечення протягом усього життєвого циклу пристрою.

2. Доступність компонентів.

a) Наявність мікроконтролера у достатній кількості на ринку.

b) Актуальність виробництва та підтримка постачання виробником.

3. Підтримка розробки.

Наявність документації, середовищ розробки, бібліотек, прикладів програмного коду та технічної підтримки від виробника або спільноти розробників.

Враховуючи технічні вимоги до системи та підтримку на території розробки, було обрано 32-розрядний мікроконтролер Microchip Technology серії AT32UC3L064, який повністю відповідає вимогам щодо продуктивності, енергоефективності, функціональних можливостей та надійності. Серія AVR32 UC3 поєднує високу обчислювальну потужність із низьким енергоспоживанням, що робить її придатною як для вбудованих систем реального часу, так і для сучасних енергоощадних пристроїв.

Мікроконтролери AVR32 UC3 побудовані на базі 32-розрядної архітектури AVR32 із високопродуктивним п’ятирівневим конвеєром команд та підтримкою DSP-інструкцій для цифрової обробки сигналів. Архітектура забезпечує виконання як 16-бітних, так і 32-бітних інструкцій без перемикання режимів роботи, що підвищує швидкодію та ефективність використання пам’яті програм. Продуктивність ядра становить до 1,4 DMIPS/МГц, що дозволяє ефективно реалізовувати алгоритми керування, обробки даних та цифрової фільтрації сигналів [14].

Серія UC3L впроваджує низку інноваційних технологічних рішень у сфері 32-розрядних мікроконтролерів. Зокрема, це перший у галузі 32-розрядний мікроконтролер із вбудованим периферійним модулем ємнісного сенсорного керування (Capacitive Touch Peripheral). Ця можливість дозволить реалізувати інтерфейс користувача на основі графічного інтерфейсу.

Технологія захисту коду FlashVault™ дозволяє частково програмувати та блокувати доступ до внутрішньої Flash-пам'яті, створюючи захищене середовище для зберігання інтелектуальної власності програмного забезпечення. Код, розміщений у FlashVault, може виконуватись у звичайному режимі, проте не може бути прочитаний, скопійований або досліджений засобами налагодження.

Механізм FlashVault може використовуватись для захисту програмних компонентів, наприклад математичних бібліотек або алгоритмів шифрування, у середовищах із підвищеним ризиком несанкціонованого доступу, де інша частина програмного коду може вільно розроблятись та налагоджуватись.

Серед інших інновацій, реалізованих у серії UC3L, варто виділити:

- інтелектуальні периферійні модулі SleepWalking™;
- систему периферійних подій (Peripheral Event System);
- захист від збоїв тактового генератора;
- тактові генератори зі спектральним розширенням та швидким запуском;
- вбудований вимірювач частоти;
- модуль RTC із режимом календаря та високоточною підстройкою кварцового резонатора;
- можливість формування PWM-сигналу на всіх 36 лініях введення/виведення.

Однією з ключових переваг мікроконтролерів серії UC3 є наявність розвиненої внутрішньої архітектури обміну даними. Використання багаторівневої шинної системи, подвійного порту SRAM та контролера прямого доступу до пам'яті (DMA) забезпечує високу швидкість передачі інформації між периферійними модулями та центральним процесором без значного навантаження на ядро. Це особливо важливо для систем, що працюють із великими потоками даних або декількома периферійними пристроями одночасно.

Для реалізації сучасних вбудованих рішень мікроконтролери AT32UC3L064 мають широкий набір інтегрованих периферійних модулів, серед яких:

- високошвидкісні послідовні інтерфейси;
- таймери та модулі ШІМ;
- аналого-цифровий перетворювач;
- контролер реального часу RTC.

Завдяки підтримці технології picoPower® мікроконтролери серії UC3 характеризуються низьким рівнем енергоспоживання як у активному режимі, так і в режимах очікування. Це дозволяє використовувати їх у портативних та автономних пристроях із живленням від акумуляторів або батарей.

Важливою перевагою є також підтримка програмної екосистеми AVR Software Framework (ASF), яка містить бібліотеки, драйвери та готові програмні модулі для швидкої розробки вбудованого програмного забезпечення. Для налагодження та трасування програм передбачено підтримку інтерфейсів JTAG та Nexus, а також середовища розробки AVR32 Studio.

Основні технічні характеристики мікроконтролера AT32UC3L:

- 32-розрядне ядро AVR32;
- тактова частота до 50 МГц;
- Flash-пам’ять — 64 КБ;
- оперативна пам’ять SRAM — 16 КБ;
- до 36 ліній введення/виведення;
- 6 таймерів з розрядністю 16 біт;
- 36 каналів ШІМ;
- вбудований RTC;
- 12-бітний АЦП на 9 каналів;
- напруга живлення від 1,62 до 3,6 В;
- робочий температурний діапазон від –40 °C до +85 °C;
- типи корпусів: TQFP48 та QFN48 [14].

Завдяки поєднанню високої продуктивності, розвиненої периферії, низького енергоспоживання та широких можливостей програмної підтримки, мікроконтролер AT32UC3L064 є ефективним рішенням для побудови сучасних вбудованих систем керування та обробки даних.

2.2. Вибір пристрою індикації

Враховуючи завдання на розробку потрібно відображати текстову та числову інформацію в два рядки з кількістю символів 16.

Тому обираємо для потреб індикації дворядковий РКІ на контролері HDD44780 [15].

Контролер HD44780 фірми Hitachi фактично є промисловим стандартом і широко застосовується при виробництві алфавітно-цифрових РКІ-модулів. Аналоги цього контролера або сумісні з ним по інтерфейсу і командному мови мікросхеми, випускають безліч фірм, серед яких: Epson, Toshiba, Sanyo, Samsung, Philips. Ще більша кількість фірм виробляють РКІ-модулі на базі даних контролерів. Ці модулі можна зустріти в найрізноманітніших пристроях: вимірювальних приладах, медичному обладнанні, промисловому і технологічному обладнанні, офісній техніці - принтерах, телефонах, факсимільних і копіювальних апаратах.

Алфавітно-цифрові РКІ-модулі є недорогим і зручним рішенням, що дозволяє заощадити час і ресурси при розробці системи управління двигуном верстата, при цьому забезпечують відображення великого обсягу інформації при гарному розрізненні і низькому енергоспоживанні. Можливість оснащення РКІ-модулів заднім підсвічуванням різного кольору дозволяє експлуатувати їх в умовах зі зниженою або нульовою освітленістю, а виконання з розширеним діапазоном температур (-20 °С ... + 70 °С) в складних експлуатаційних умовах виробництва.

Контролер HD44780 потенційно може управляти 2-ма рядками по 40 символів в кожній (для модулів з 4-ма рядками по 40 символів викори-

стовуються два однотипних контролера), при матриці символу 5x7 точок. Контролера також підтримує символи з матрицею 5x10 точок, але в останні роки РКІ-модулі з такою матрицею практично не зустрічаються, тому можна вважати, що фактично бувають тільки символи 5x7 точок [15].

Для розробки схеми підключення до контролеру розглянемо його структуру та можливості. Структурна схема показана на рис. 2.3.

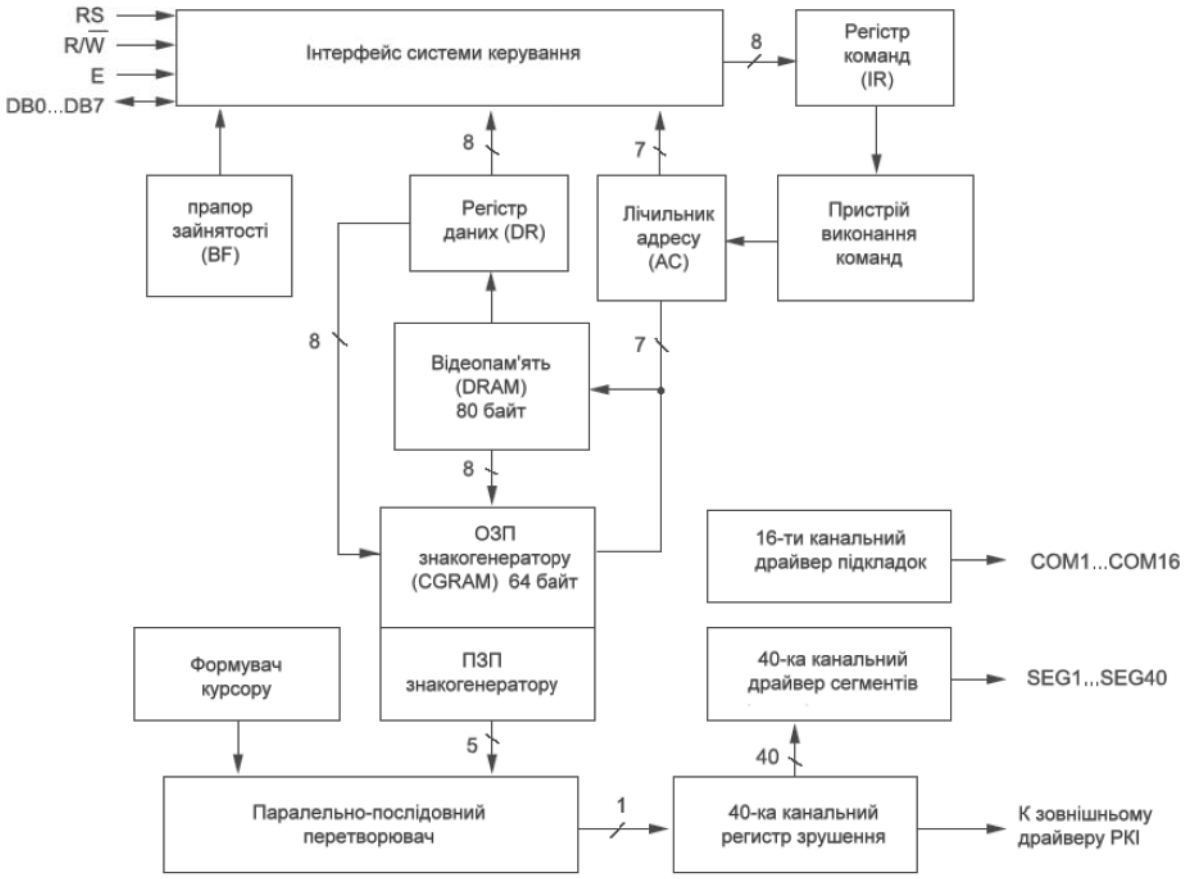


Рисунок 2.4 - Структурна схема контролеру HD44780

Контролер HD44780 має вбудований знакогенератор, адресація представлена на рис. 2.4.

В нашому випадку доступні 2 мови англійська та українська. Крім того мікросхема дозволяє задати до 8 символів користувача починаючи з адреси 0 у CGRAM.

Для з'єднання модуля з керуючою системою можна вибрати один з двох варіантів: по 8-ми або 4-х розрядній шині. У першому випадку потрібно 11 сигнальних ліній, у другому - лише 7. Сам процес обміну також може бути організований двояко.

Можна підключити РКІ-модуль до системної шини і виконати обмін в синхронному режимі з максимальною швидкістю. Цьому способу властивий ряд недоліків. По-перше, більшість сучасних пристроїв виконується із застосуванням однокристальних мікро-ЕОМ без використання додаткової зовнішньої пам'яті і, як наслідок, системна шина у цих пристроїв просто відсутня [15].



Рисунок 2.5 - Адресація вбудованого знакогенератору контролера HD44780.

На рис. 2.6,а приведена схема підключення РКІ-модуля з 8-ми розрядної шиною до деякої мікро-ЕОМ. Ця мікро-ЕОМ містить два порти: 8-ми розрядний двонаправлений РА0 ... РА7, до якого підключена шина DB0 ... DB7 РКІ-модуля, і 3-х розрядний РВ0 ... РВ2, до якого підключені лінії керуючих сигналів: Е, Р., R/W. На рис. 2.6, б можна бачити схему підключення РКІ-модуля до цієї ж мікро-ЕОМ в 4-х розрядному режимі. Зверніть увагу, що для обміну в 4-х розрядному режимі використовується старша тетрада шини даних - DB4 ... DB7.

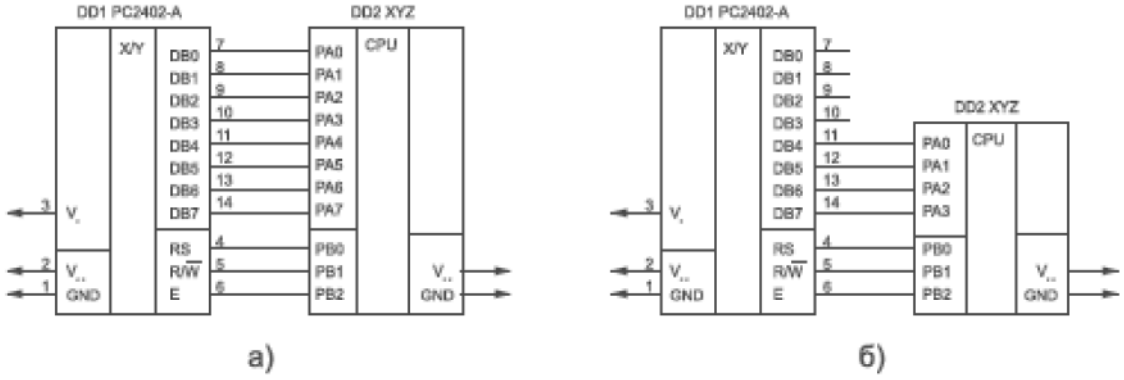


Рисунок 2.6 – Підключення по 8-ми бітній та 4-х бітній схемі

Враховуючи те, що кількість портів обраного контролера є достатньою, обертаємо варіант підключення РКІ, який показано на рис. 2.6,а.

2.3 Засоби реалізації зворотного зв'язку

В якості датчика зворотного зв'язку в системі що розроблюється будемо використовувати тахогенератор.

Тахогенератори часто використовуються в автоматичних системах управління і регулювання для виміру частоти обертання, для диференціювання, для зворотного зв'язку за швидкістю і інших операцій. В якості тахогенераторів застосовуються генератори постійного і змінного струмів, у тому числі синхронні і асинхронні генератори.

Основними вимогами, що пред'являються до тахогенераторів, є: лінійність характеристики Uг(n), велика її крутизна, визначувана як k = Uг/n, мала споживана потужність і мінімальні погрішності.

Тахогенератори постійного струму. Тахогенератори постійного струму (ТГПС) є генераторами з незалежним збудженням або зі збудженням від постійних магнітів (рис. 2.7 а) і б) відповідно).

ЕРС якоря визначається формулою E=cEФn. При постійному потоці ФЕ = k*n. При холостому ході E=Uг, тобто Uг= k*n. Між Uг і n лінійна залежність (рис. 2.8 пряма 1). При навантаженні на магнітний потік Ф впливає реакція якоря і тому вихідна характеристика дещо відрізняється від лінійної (рис. 2.8 крива 2). Для збереження лінійності магнітний ланцюг машини має бути ненасиченим. Для ТГПС допустима погрішність складає 0,5 - 3%. При навантаженні має місце падіння напруги в обмотці якоря RяIя, між колектором і щітками Uщ. В цьому випадку Uг= E - Uщ - RяIя, оскільки при малих швидкостях E< Uщ і Uг=0, на вихідній характеристиці з'являється зона нечутливості ЗН (рис. 2.8 пряма 3). Для зменшення зони нечутливості потрібно зменшити Uщ, тобто опір щіток зробити якомога менше, а навантаження — більше.

Окрім відміченого недоліку, в ТГПС має місце пульсація вихідної напруги, яка викликана роботою колектора : неточністю його виготовлення, нерівномірністю повітряного проміжку, зубчастою будовою якоря, нерівностями колектора та ін.

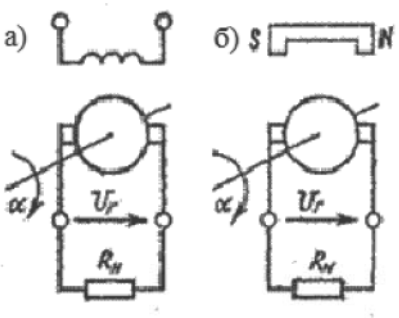


Рисунок 2.7 – Тахогенератори постійного струму
з незалежним збудженням (а), та зі збудженням від постійних магнітів (б)

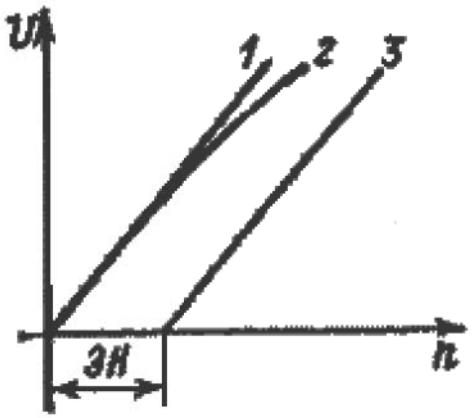


Рисунок 2.8 – Характеристики тахогенератору постійного струму

Перевага ТГПС полягає в тому, що він задовольняє основним вимогам, що пред'являються до тахогенераторів.

Синхронні тахогенератори. Синхронні тахогенератори (СТГ) працюють як звичайні синхронні генератори, що збуджуються постійними магнітами, розташованими на роторі. Їх ЕРС і частота пропорційні частоті обертання ротора. Тому зі зміною частоти обертання ротора змінюється не лише напруга на виході Uг, але і частота цієї напруги. Крім того, із-за впливу реакції якоря залежність Uг(n) нелінійна.

Із-за вказаних особливостей застосовувати їх в схемах недоцільно. В основному їх застосують для виміру частоти обертання робочих механізмів. Основною гідністю СТГ є порівняно велика потужність на виході.

Асинхронні тахогенератори. Асинхронні тахогенератори (АТГ) мають конструкцію, аналогічну конструкції двофазного асинхронного двигуна з порожнистим ротором. На статорі розташовані дві обмотки: збудження і генераторна. Обмотка збудження живиться змінною напругою Uв частотою f. З генераторної обмотки знімається напруга, пропорційна частоті обертання ротора. Генераторна обмотка зрушена в просторі на 90° відносно обмотки збудження.

Якби потік Фв був постійним, то при обертанні ротора в нім, як в якорі машини постійного струму, наводилася б ЕРС обертання, протікав би постійний струм Ія, який створив би постійне поперечне поле Фг реакції якоря, пропорційне частоті обертання n. Оскільки потік змінюється по синусоїді, то і усі величини: ЕРС, струм, потік - змінні. В результаті потік наводить в генераторній обмотці синусоїдальну ЕРС $e_г$.

Амплітуда потоку, як це витікає з принципу роботи АТГ, пропорційна частоті обертання ротора тахогенератора і амплітуді потоку обмотки збудження, яка постійна.

Окрім ЕРС обертання, в роторі наводиться трансформаторна ЕРС. Дійсно, при n = 0 змінний потік збудження наводить в підлогою роторі, як і у вторинній обмотці трансформатора, ЕРС $e_т$, що називається трансформаторною. ЕРС $e_т$ створює в підлогою роторі струм ротора і магнітний потік Фт, спрямований, як і у вторинної обмотки трансформатора, проти потоку збудження. На генераторну обмотку трансформаторна ЕРС ніякого впливу не робить, оскільки остання розташована перпендикулярно магнітному потоку збудження. При обертанні ротора усі явища, пов'язані з трансформаторною ЕРС, не зміняться і на вихідну напругу $U_г$ вона ніякого впливу робити не буде.

Недоліком АТГ є деяка нелінійність вихідної характеристики, що викликається амплітудною погрішністю, яка пояснюється тим, що змінний потік наводить в роторі додаткову ЕРС $e_д$. Але завдяки використанню мікроконтролера це можливо скоригувати програмно.

Аналізуючи приведені недоліки та переваги різних типів тахогенераторів для вирішення завдання дипломного проекту обираємо тахогенератор 4Р.

Тахогенератор 4Р постійного струму застосовуються для аналогового вимірювання швидкості обертання.

Конструкція: збудження - на постійних магнітах, напрямок обертання - реверсивне, форма конструкції - з порожнистим валом, клас ізоляції - F, ступінь захисту — IP00 [16].

Технічні дані: постійна напруга - 20В/1000 $хв^{-1}$; пульсації при 1000 $хв^{-1}$ - 1,2%; Лінійність при 5500 $хв^{-1}$ - 0,4%; помилка при реверсуванні - 0,5%; момент інерції якоря: $2,6x10^{-6}$ $кгм^2$; температурний коефіцієнт - 0,02 °К; максимальний струм - 50 мА; максимальна частота обертання: 5500 $хв^{-1}$.

2.4. Драйвер двигуна

Як драйвер силової частини доцільно використати інтегрований силовий модуль серії IRAM виробництва Infineon Technologies. Використання інтелектуальних силових модулів, таких як серія IRAM, дозволяє суттєво прискорити та спростити розробку регульованих електроприводів. Це досягається завдяки інтеграції силових ключів, драйверів та схем захисту в єдиному корпусі, що дає змогу розробнику зосередитись на реалізації алгоритмів керування двигуном (векторне, пряме керування моментом тощо) без потреби в глибокому проєктуванні силової частини.

На відміну від багатьох аналогічних рішень, модулі IRAM доступні у виконаннях як із відкритими емітерами нижніх ключів інвертора, так і з інтегрованим шунтом у колі нульового потенціалу. Така архітектура забезпечує гнучку реалізацію схем струмового зворотного зв’язку та спрощує організацію систем контролю струму.

Особливістю модулів IR є використання 600-вольтових NPT IGBT транзисторів п’ятого покоління, це дозволяє працювати з високою швидкодією та можливістю роботи на підвищених частотах широтно-імпульсної модуляції — до 20 кГц включно.

До основних переваг модулів IRAM належать:

- низькі втрати при комутації, особливо під час вимкнення;
- відносно невеликі втрати на провідність;

- прямокутна область безпечної роботи;

- висока енергоефективність;

- можливість роботи на ультразвукових частотах ШІМ.

Для управління ключами інвертора в модулях IR замість трьох кристалів драйверів верхніх ключів і одного драйвера нижніх ключів використаний один кристал трифазного драйвера IR21365. Драйвери серії IR2136x були спеціально розроблені з урахуванням специфіки приводу невеликої потужності, сумісні зі всіма типами КМОП і TTL логіки з рівнями від 3,3 В. Це дозволяє подавати сигнали, що управляють, від мікроконтролера безпосередньо на входи управління верхніх і нижніх ключів (HIN, LIN) без використання додаткових перетворюючих каскадів. Модулі IR також містять ланцюг теплового захисту на термісторі Rt, але в них додатково введені бутстрепні діоди і резистор джерела живлення драйвера, RC-ланцюг управління часом спрацьовування захисту від перевантаження по струму, а також обмежувальні резистори в затворах ключів інвертора. У модулях версії «А» емітери нижніх ключів сполучені безпосередньо з виводами модуля, до яких під'єднуються шунти для отримання інформації про струми у фазах двигуна. Модулі версії «В» містять вбудований прецизійний безіндуктивний шунт Rs в ланцюзі нульової шини силового живлення [17].

Зовнішній вигляд модуля представлено на рис. 2.9. Структура обраного модуля IRAMX20UP60A представлена на рис. 2.10.

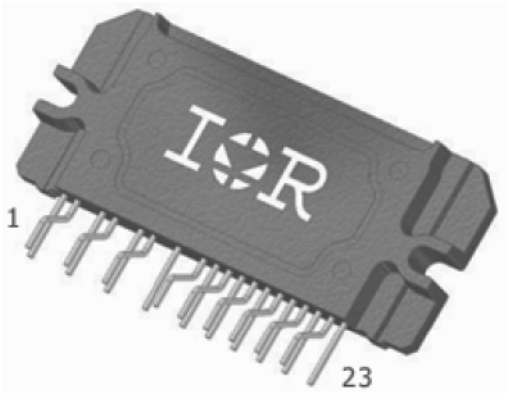


Рисунок 2.9 - Зовнішній вигляд модуля.

Таким чином було обрано модуль з компактною конструкцією та який орієнтовано на нові сфери застосування: побутове електроустаткування з малопотужним одно- або трифазним електроприводом, електромобілі, портативний силовий електроінструмент.

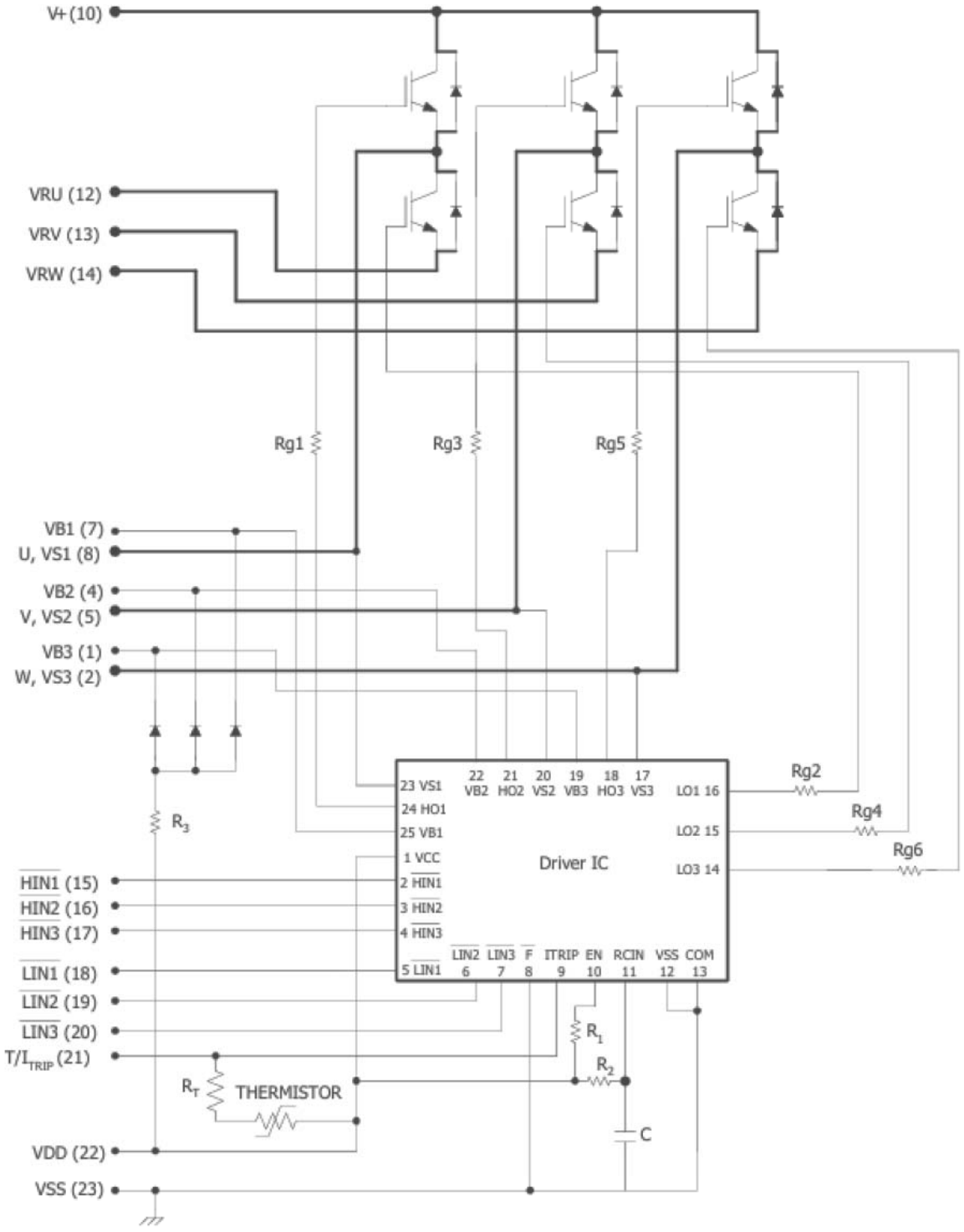


Рисунок 2.10 - Структура модуля IRAMX20UP60A.

Добитися такого істотного зниження габаритних розмірів модулів стало можливим завдяки застосуванню нових типів силових комутаторів, яким властива менша займана кристалом площа. Крім того, не дивлячись на використання функціонально подібних ІС драйверів, унаслідок застосування різних схем їх включення, є деякі відмінності у функціональних можливостях нових модулів.

Типова схема підключення модуля від виробника наведена на рис. 2.11 [17].

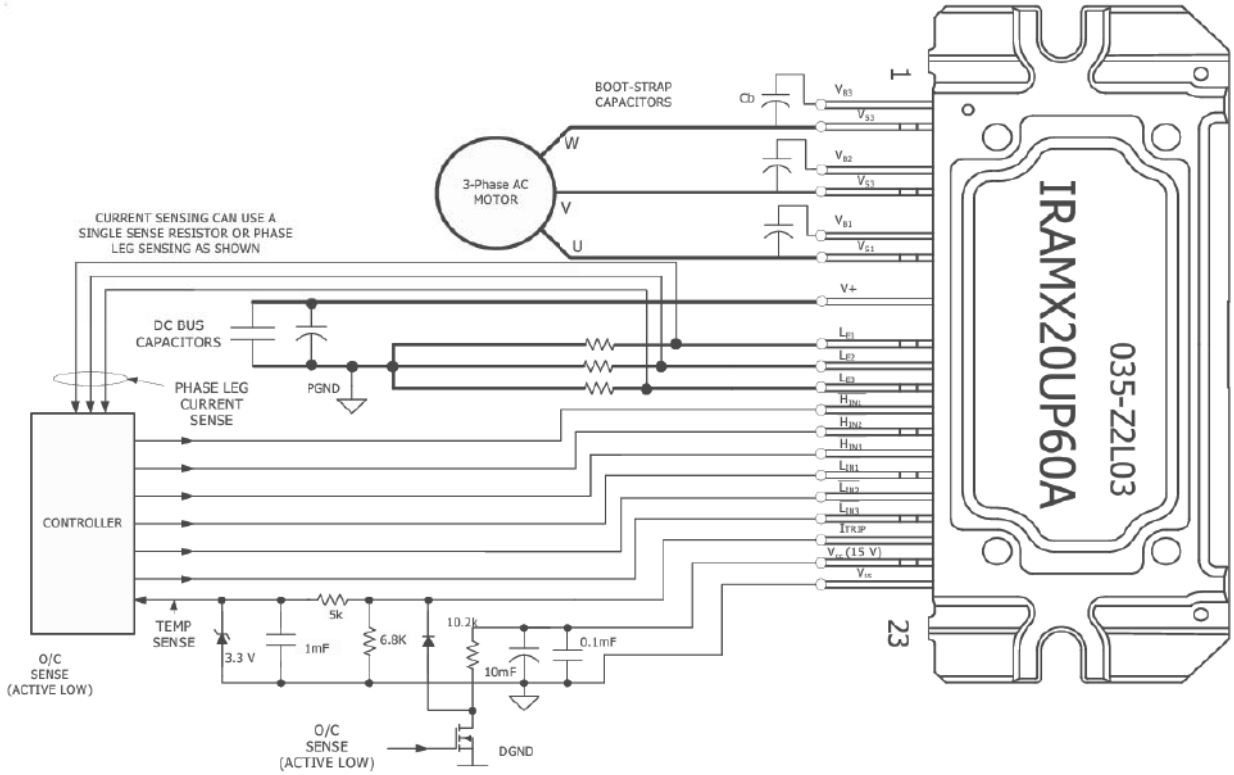


Рисунок 2.11 — Типова схема підключення модуля.

Параметри обраного модуля наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Параметри модуля

Скорочена назва параметру	Назва параметра	Значення	Один.
VCES / VRRM	IGBT/Diode блокуюча напруга	600	V
V+	Вхідна напруга	450	

Io при Tc=25°C	Максимальний вихідний струм	20	A
Io при Tc=100°C	Імпульсний струм	10	
Io	Імпульсний струм	35	
FPWM	PWM частота	20	kHz
PD	Потужність що розсіюється IGBT при Tc =25°C	38	W
VISO	Стійкість ізоляції (1min)	2000	VRMS
TJ (IGBT & Diode & IC)	Максимальна робоча температура	+150	°C
Tc	Температура при роботі	-40 to +150	

2.5 Аналіз схемних рішень плавного заряду ємності

Під час розробки частотних перетворювачів, систем керування електродвигунами, потужних випрямлячів та іншої силової електроніки виникає важлива проблема — обмеження пускового струму заряду конденсаторів великої ємності, які використовуються у фільтрах після мережевого випрямляча або в шині постійного струму інвертора.

На практиці етап початкового заряду конденсаторів часто недооцінюється або не враховується належним чином. Це пояснюється тим, що силові діоди, тиристори та інші напівпровідникові елементи зазвичай здатні короткочасно витримувати значні імпульсні струми. Наприклад, навіть діодні збірки середньої потужності можуть без критичних наслідків переносити імпульси струму, які виникають під час прямого підключення конденсатора ємністю кілька сотень мікрофарад до мережі 220В або 380В.

Однак регулярний вплив великих пускових струмів негативно впливає на надійність та ресурс силової частини пристрою. Значні імпульсні навантаження викликають перегрів і прискорене старіння електролітичних конденсаторів, збільшують навантаження на випрямні діоди та можуть призводити до деградації контактів, доріжок друкованої плати й комутаційних елементів. У перспективі це суттєво підвищує ризик відмови силового перетворювача.

Саме тому сучасні силові системи зазвичай оснащуються схемами обмеження пускового струму (Soft Start або Inrush Current Limiter). Для цього застосовують NTC-термістори, резистори попереднього заряду з байпасним реле, електронні схеми плавного запуску або активні системи керування зарядом DC-шини.

Відсутність засобів обмеження зарядного струму може призвести до пошкодження елементів вхідного кола живлення, а в окремих випадках — до виходу з ладу всієї силової частини перетворювача, включаючи інверторні ключі та систему живлення загалом.

По суті, всі методи «м'якого включення» зводяться до кількох основних варіантів, а саме: заряд за допомогою зарядного резистора, заряд за допомогою термістора, заряд за допомогою транзисторів і заряд за допомогою тиристорів. Всі вони мають безліч схемних варіацій і досить широко використовуються на практиці.

Структурна схема заряду за допомогою додаткового резистора показана на рис. 2.12.

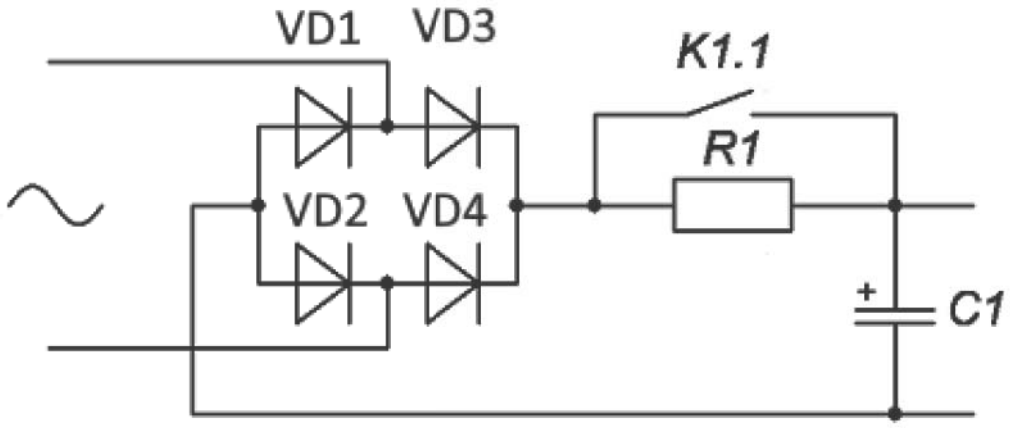


Рисунок 2.12 — Схема заряду за допомогою додаткового резистора.

При включенні контакт реле К1.1 розімкнуть і зарядний струм обмежується резистором R1. За закінченням певного часу та/або по досягненню напруги на конденсаторі певного порогу замикається контакт реле К1.1 шунтуючи резистор R1. Існують і більш складні варіації даної схеми: використовується резистивна матриця і по черзі підключаються резистори, таким

чином можна зарядити велику ємність за відносно малий час із збереженням прийнятного середнього струму заряду. Однак, даний спосіб не знайшов широкого застосування, тому його мінусами є відносна складність комутацій і великі габарити, а таких завдань, де потрібно швидкий заряд конденсатора великої ємності не так багато.

Заряд за допомогою додаткового резистора, мабуть, найбільш поширений спосіб «м'якого включення». Популярність цього методу пояснюється простотою і дешевизною реалізації, дуже високою надійністю (при правильно підібраній потужності резистора навіть при КЗ в навантаженні схема з ладу не вийде), можливість застосування як в ланцюгах змінного, так і в ланцюгах постійного струму. Але є у даного методу і свої мінуси. Основні з них такі:

1. Навіть при не включеному реле навантаження знаходиться під напругою (через резистор). Щоб знеструмити навантаження необхідно ставити додаткове реле або в силовому ланцюзі, або в ланцюзі резистора, що, в свою чергу, значно ускладнює схему.

2. Резистор підбирається один раз під конкретну активне і ємнісне навантаження, якщо навантаження змінюється, то за відсутності відповідних захистів схема може вийти з ладу. Наприклад, якщо не було відключено навантаження, напруга на навантаженні через 1с досягла не 300 В, а 5 В, включилося реле, далі великий струм заряд і вихід з ладу.

3. Якщо реле включається по пороговому напрузі на конденсаторі, то дана схема нестійка до провалів напруги на навантаженні, що виникають, наприклад, при запуску двигуна від малопотужної мережі: напруга просяде, реле відключиться та живлення навантаження буде здійснюватися через зарядний резистор, від чого він, найімовірніше, згорить [18].

Очевидно, що більшість зазначених недоліків можна компенсувати шляхом використання додаткових технічних рішень — реле байпасу, схем автоматичного перезапуску, контролю напруги на вході та виході обмежувального резистора, а також інших захисних вузлів. Проте в такому випадку

втрачаються головні переваги цього підходу — простота реалізації та низька вартість.

Тому застосування резистивного способу плавного заряду є доцільним переважно у системах зі стабільним навантаженням і відносно постійною напругою живлення, де режими роботи практично не змінюються.

2.6 Вибір транзистора

Для включення та виключення реле К потрібно обрати ключовий елемент який би дозволив сигналом з мікроконтролера їм управляти. В якості такого елемента підходить польовий транзистор з вхідним логічним рівнем.

Аналізуючи продукції фірм сучасних транзисторів за параметрами струму та напруги було обрано транзистор IRLU024N [19].

Він має вхідний логічний рівень, поверхневий монтаж, передовий технологічний процес, забезпечує струм до 12А, максимальна напруга 55В. Транзистор розсіює потужність до 1,5 Вт. Параметри приведені в табл. 2.2 [19].

Таблиця 2.2 — Параметри транзистора IRLU024N.

Параметр	Значення	Одиниця виміру
Постійний струм при 25 ºС	17	А
Постійний струм при 100 ºС	12	А
Імпульсній струм	72	А
Максимальна напруга	55	В
Опір каналу	65	мОм

3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

У розрахунковій частині буде вироблений розрахунок трансформатора блоку живлення для системи управління електроприводом, діодів і стабілізованих джерел живлення для потреб індикації та роботи мікроконтролера.

Вихідними даними для розрахунку малопотужного силового трансформатора є такі величини:

- кількість фаз – m=1;
- номінальна потужність або струм вторинної обмотки;
- номінальні напруги –U2=9 В;
- частота мережі – f=50 Гц;

3.1 Розрахунок стабілізованого джерела напруги

В якості мікросхеми джерела стабілізованої напруги вибираємо інтегральну мікросхему серії L7805 з параметрами, які представлені в таблиці 3.1:

Таблиця 3.1 – Параметри мікросхеми L7805

Параметри	Значення
Вхідна напруга Uвх, В	8,5 ... 15
Вихідна напруга Uвих., В	5 ± 0,18
Струм навантаження Інавантаж., А	0,01-1,5
Нестабільність вихідної напруги %	4
Мінімальне падіння напруги, В	2,5
Максимальна розсіювана потужність, Вт	2

Розрахунок проводиться з умовою, щоб джерело напруги забезпечувало регулювання вихідної напруги від 4,1 до 5,9В. Схема включення мікросхеми LM7805 приведена на рис. 3.1 [20].

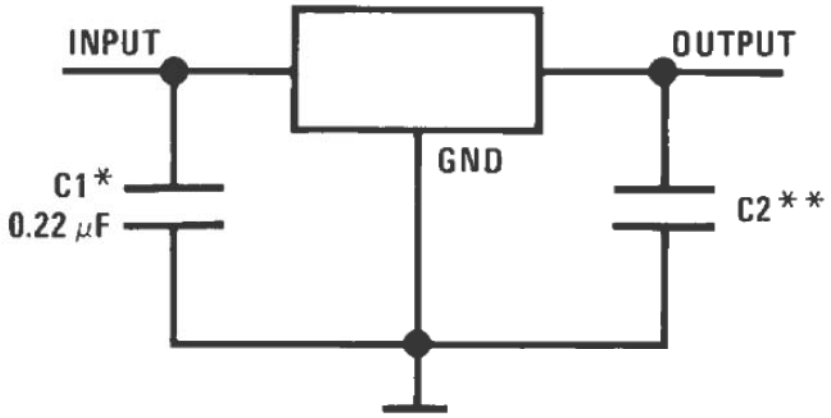


Рисунок 3.1 – Схема включення мікросхеми LM7805

Напруга на вході стабілізатора (DA1) повинна складати *Uвх* з урахуванням коефіцієнта пульсацій вхідної напруги *Кп* =5%.

Визначимо *Uвих.min* по формулі:

$$U_{вих.\min} = U_{вих} + \Delta U, \tag{3.1}$$

де ΔU – падіння напруги на регулюючому елементі ІМС.

$$U_{вих.\min} = 5,9 + 2,5 = 8,4\ B$$

Тоді *Uвх.min* рівно

$$U_{вх.\min} = U_{вх} \cdot 1,05 \tag{3.2}$$

$$U_{вх.\min} = 8,4 \cdot 1,05 \approx 9\ B$$

Uвх.min відповідає напрузі мережі живлення *Ucmin* = 0,9Uсном. Таким чином:

$$U_{вх.ном}=U_{вх.min}/0{,}9 \quad (3.3)$$

$$U_{вх.ном}=9/0{,}9=10\ B$$

При максимальній напрузі мережі:

$$U_{вх.\max}=U_{вх.ном}\cdot 1{,}1 \quad (3.4)$$

$$U_{вх.\max}=10\cdot 1{,}1=11\ B$$

На вході інтегральної мікросхеми встановлюється конденсатор С1, який є фільтром і виключає вплив перешкод з боку входу стабілізатора. Величина ємності конденсатора С1 забезпечує стабільну роботу стабілізатора та дорівнює 0.22 мкФ. Паралельно С1 також підключається електролітичний конденсатор. На основі інформації з довідника вибираємо наступний конденсатор: Сарxon, ємністю 1000 мкФ.

Для підвищення стійкості стабілізатора, на виході також повинен бути встановлений конденсатор (керамічний) С2, номіналом 0.22 мкФ. В цьому випадку вибираємо паралельний конденсатор Сарxon, ємністю 100 мкФ.

Обраний стабілізатор буде використовуватись для живлення РК-дисплею, а для мікроконтролеру оберемо стабілізатор LM7833 [21], включений послідовно з першим.

3.1.1 Розрахунок випрямляча джерела живлення

Середній струм діода мостового випрямляча рівний:

$$I_a=I_н/2 \quad (3.5)$$

$$I_a=1{,}5/2=0{,}7\ A$$

Струм діода, що діє, рівний:

$$I_{а\,д}=1{,}15\cdot I_{н} \tag{3.6}$$

$$I_{а\,д}=1{,}15\cdot 1{,}5=1{,}725\,A$$

Зворотна напруга, що прикладається до діодів, рівна:

$$U_{b}=1{,}32\cdot U_{вх.\max} \tag{3.7}$$

$$U_{b}=1{,}32\cdot 11=14{,}52\ B$$

Як випрямні діоди вибираємо діоди типу 1N4001 з наступними параметрами:

- прямий середній струм - 1 А;
- зворотна напруга - 50 В;
- пряме падіння напруги - 1 В.

3.1.2 Розрахунок параметрів вторинної обмотки трансформатора

Напруга вторинної обмотки трансформатора рівна:

$$U_{2}=0{,}71\cdot U_{вх.ном}+U_{0}, \tag{3.8}$$

де *Uo* - пряме падіння напруги на діодах випрямного моста (*Uo=2B).*

$$U_{2}=0{,}71\cdot 10+2{,}0\approx 9{,}1\ B$$

Струм вторинної обмотки, що діє:

$$I_2 = I_н \cdot 1{,}63 \qquad (3.9)$$

$$I_2 = 1{,}5 \cdot 1{,}63 = 2{,}445\ A$$

Встановлена потужність вторинної обмотки *S2* складає:

$$S_2 = 1{,}51 \cdot U_{ном} \cdot I_{ном} \qquad (3.10)$$

$$S_2 = 1{,}51 \cdot 10 \cdot 1{,}5 = 22{,}65\ ВА$$

Струм первинної обмотки, обумовлений струмом навантаження джерела живлення, складає:

$$I_1 = I_2 / K_T, \qquad (3.11)$$

де $К_Т$ – коефіцієнт трансформації ($К_Т$ = U2/Uсном=220/9,1 =24)

$$I_1 = 2{,}45/24 \approx 0{,}1\ A$$

3.1.3 Вибір магнітопроводу і розрахунок обмоток трансформатора

Виходячи з того, що *S1* = *S2*, де *S1* і *S2* – встановлені типові потужності первинною і вторинних обмоток трансформатора, розрахуємо твір площі активного поперечного перетину магнітопровода трансформатора *Scm* на площу вікна сердечника *Sок*, заповнюваного обмотками трансформатора.

$$S_{ст} \cdot S_{ок} \approx \frac{S_1 \cdot 10^2}{2{,}22 \cdot f \cdot B_{\max} \cdot \delta_{ср} \cdot k_{ок} \cdot k_{ст}}\ , \qquad (3.12)$$

де *Scm* – площа перетину сталі магнітопровода, $см^2$;

Sок – площа вікна магнітопровода, $см^2$;

f = 50 *Гц* – частота мережі;

Bmax = 1,65 *Тл* – максимальна магнітна індукція стали;

δср = 2,7 - 3,5 *А/мм2* – щільність струму в обмотках;

$к_{ок}$ = 0,27 - 0,29 – коефіцієнт заповнення вікна;

$k_{ст}$ = 0,91 – коефіцієнт заповнення магнітопровода сталлю.

$$S_{ст} \cdot S_{ок} \approx \frac{22,65 \cdot 10^2}{2,22 \cdot 50 \cdot 1,65 \cdot 3 \cdot 0,28 \cdot 0,91} \approx 16 \ см^4$$

По отриманих результатах вибираємо кільцевий (тороїдальний) магнітопровід типу ОЛ 40/56 - 16, відповідний наступним параметрам:

- площа перетину магнітопровода *Scm* = 1,28 $см^2$;
- ефективна довжина магнітної лінії *lcm* = 15 *см*;
- площа вікна *Sок* = 12,56 $см^2$.

Визначимо кількість витків обмоток трансформатора.

$$W_1 = \frac{U_1 \cdot (1 - \Delta U_1 \cdot 10^{-2}) \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot B_{\max} \cdot S_{ст}} \ , \qquad (3.13)$$

де *ΔY1* = 10% – падіння напруги в первинній обмотці за рахунок активних втрат.

$$W_1 = \frac{220 \cdot (1 - 10 \cdot 10^{-2}) \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,65 \cdot 1,28} = 4223 \ в$$

Визначимо кількість витків у вторинній обмотці.

$$W_2 = \frac{U_2 \cdot (1 + \Delta U_2 \cdot 10^{-2}) \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot B_{\max} \cdot S_{ст}} \ , \qquad (3.14)$$

де *U2* = 9,1 В – напруга вторинної обмотки трансформатора;

$\Delta Y2 = 12\%$ – падіння напруги у вторинній обмотці за рахунок активних втрат.

$$W_2 = \frac{9{,}1 \cdot \left(1 + 12 \cdot 10^{-2}\right) \cdot 10^4}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 1{,}65 \cdot 1.28} = 217 \text{ вітків}$$

Визначимо діаметри проводів обмоток. Вибір діаметрів здійснюється по формулі 3.15 [22].

$$S_{пр} = \frac{I_n}{\delta} \ , \qquad (3.15)$$

де In – струм у відповідній обмотці трансформатора, A;

δ – щільність струму в обмотці, приймаємо 3 $А/мм^2$.

Звідси:

$$S_{пр1} = \frac{0{,}12}{3} = 0{,}04 \text{ мм}^2$$

$$S_{пр2} = \frac{2{,}445}{3} = 0{,}8 \text{ мм}^2$$

З формули $S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ визначимо діаметри проводів для обмоток трансформатора по формулі:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} \qquad (3.16)$$

Таким чином:

$$D_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}04}{3{,}14}} \approx 0{,}23 \text{ мм}$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}8}{3{,}14}} \approx 1 \text{ мм}$$

По довідкових таблицях [23] обрано емальований мідний обмотувальний провід. Діаметр проводу визначався за розрахованою площею поперечного перерізу та довідковими таблицями обмотувальних проводів згідно з IEC 60317.

Площу заповнення вікна сердечника розрахуємо по формулі:

$$S_{з1}=S_{пр1}\cdot W_1 \tag{3.17}$$

Отримані дані наводимо в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Звідна таблиця результатів розрахунку

Номери обмоток	Кількість витків	Розрахунковий діаметр, мм	Діаметр провода, мм	Площа перетину дроту, мм^2	Площа заповн. вікна, мм^2
W1	4223	0,23	0,23	0,04	169
W2	217	1	1,01	0,8	174

1) Дані діаметри приведені з урахуванням товщини лакового шару.

Сумарна площа проводів всіх обмоток у вікні складає:

$$S_{прΣ}=S_{пр1}+S_{пр2} \tag{3.18}$$

$$S_{прΣ}=169+174=343\ мм^2$$

Перевіряємо можливість виготовлення трансформатора по формулі 3.19.

$$k_{зр}=\frac{S_{прΣ}}{S_{ок}} \tag{3.19}$$

$$k_{зр}=\frac{343}{1256}\approx 0{,}27$$

Умова *кзр* < *кок* виконується. Розрахунковий коефіцієнт *кзр* = 0,27, що відповідає вимогам.

3.2 Датчики системи управляння

Для контролю струму через двигун оберемо згідно параметрам завдання відповідний датчик. Заданий параметрам відповідає датчик ACS714. Схема підключення показана на рис. 3.2 [24].

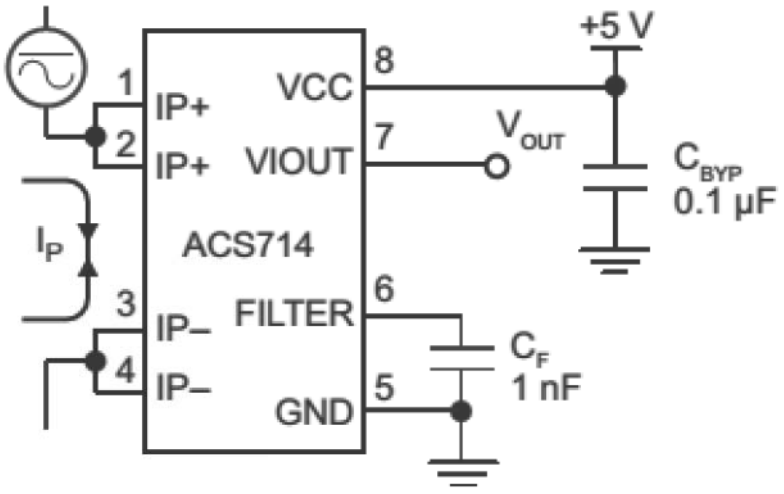


Рисунок 3.2 — Підключення датчика ACS714

Це повністю інтегрований на ефекті Холла лінійний датчик струму. Серед його характеристик:

- Низький рівень шуму аналогового тракту сигналу
- 5 мкс затримка
- Робота до 80 кГц
- Загальний вихід помилки 1,5% при T_A = 25 °C
- Займає мало місця, низькопрофільній корпус SOIC8
- Опір внутрішнього провідника 1,2 мОм

▪ 2,1 кіловольт мінімальна напруга ізоляції з контактів 1-4 на контакти 5-8

▪ Живлення від 5,0 В

▪ Чутливість 66 до 185 мВ / вихід

▪ Вихідна напруга пропорційно змінного або постійного струму

▪ Заводська обробка на точність

▪ Дуже стійкий вихід по зсуву напруги

▪ Логометричний виході напруги живлення

▪ Діапазон робочих температур, від -40 ° С до 150 °С

3.3 Моделювання блоку живлення

Розвиток технологій віртуалізації та моделювання, зокрема створення віртуальних прототипів та цифрових двійників, докорінно змінив підходи до проєктування сучасних електронних та мехатронних систем. Завдяки цим технологіям з'явилась можливість проводити повний цикл розробки та тестування у віртуальному середовищі, що дозволяє виявляти та усувати помилки на ранніх стадіях без очікування виготовлення фізичного зразка [25].

Комп'ютерна модель не просто доповнює, а в багатьох аспектах замінює фізичний прототип на ранніх етапах розробки, забезпечуючи можливість швидкого ітераційного тестування, автоматизованого аналізу та виявлення критичних помилок, які на фізичному зразку було б виявити значно складніше, довше та дорожче. Такий підхід, дозволяє скоротити час виходу продукту на ринок та підвищити його якість [25].

Особлива увага приділяється універсальності програмного забезпечення. MicroCAP 12 простіший за рівнем програмної реалізації, має менший розмір, дистрибутиву та є безкоштовним. На комп’ютерах з малою потужністю моделювання проводиться з меншою швидкістю, тобто 1с реального часу мо-

же бути еквівалентна 1 мс процесу, що моделюється. Через це ресурси центрального процесора відіграють велику роль у галузі програмного моделювання. За можливості використання більш потужної техніки, рекомендується застосовувати саме її, для пришвидшення процесу моделювання електронної схеми, отримання більш точних результатів тощо.

Micro-CAP 12 - це потужний, але водночас доступний пакет програм для схемотехнічного аналізу, призначений для моделювання різноманітних електронних схем. Його ключовою перевагою, характерною для всієї лінійки програм родини Micro-CAP, є інтуїтивно зрозумілий та дружній графічний інтерфейс, що робить його особливо привабливим для непрофесійної, зокрема студентської, аудиторії. На відміну від багатьох сучасних EDA-пакетів, Micro-CAP 12 пред'являє помірні вимоги до апаратних ресурсів комп'ютера, що дозволяє ефективно використовувати його навіть на застарілих або малопотужних машинах [26].

Незважаючи на скромні системні вимоги, функціональні можливості пакета є надзвичайно широкими. За його допомогою можна проводити аналіз не лише аналогових, але й цифрових пристроїв, а також реалізовувати змішане аналого-цифрове моделювання. Ця функція повною мірою розкривається досвідченим користувачем, який здатен створювати власні макромоделі для нестандартних компонентів або специфічних робочих режимів. Такі макромоделі дозволяють суттєво спростити та прискорити процес імітаційного моделювання без втрати критично важливої інформації щодо поведінки системи, що особливо цінно при проєктуванні складних вузлів на ранніх стадіях розробки [26].

Таким чином, використовуючи MicroCAP-12 [27] проведемо моделювання блоку живлення, схема котрого показана на рис. 3.3.

Резистор R1 потрібен в схемі для моделювання внутрішнього опору джерела живлення V1. Діоди D1-D4 включені по схемі моста та виконують функцію випрямляння напруги для подальшої подачі в електронні блоки. Конденсатори C1 та C2 виконують функцію фільтрів та зменшують рівень

пульсацій, як показано на рис. 3.5. Резистор R2 представляє собою еквівалентне навантаження.

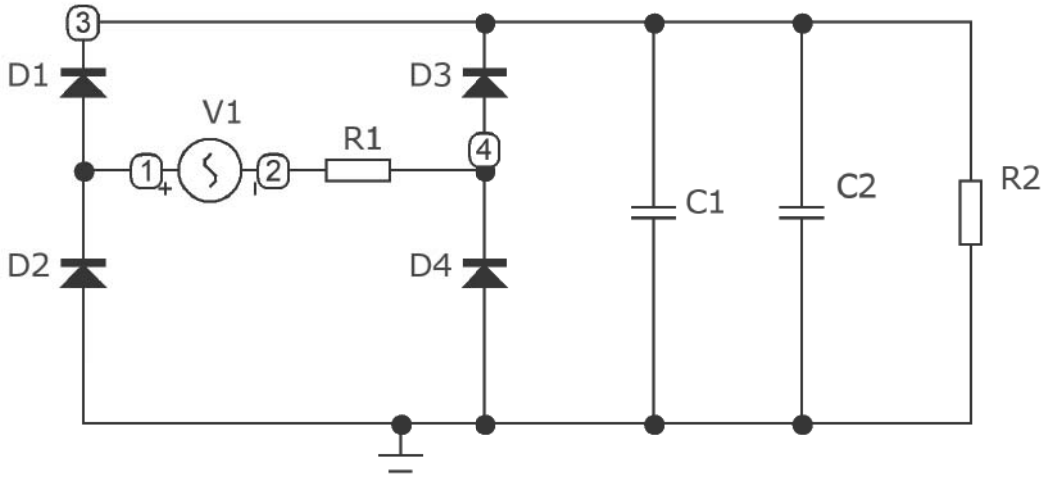


Рисунок 3.3 — Схема електрична випрямляча

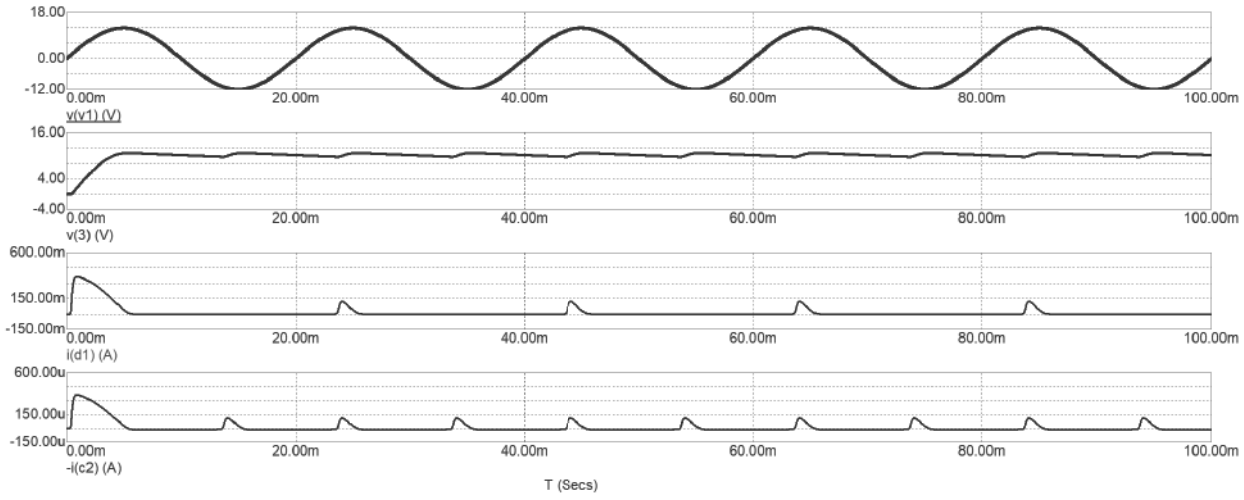


Рисунок 3.4 — Результати моделювання

Вихідна напруга випрямляча та струм діодів показано на рис. 3.4. Таким чином, можна бачити, що схемні рішення працюють, та параметри елементів схеми розраховані вірно.

4 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Конструкція системи управління

Конструкція розробленого пристрою складається з двох окремих плат. Одна плата це блок живлення, друга система управління. Із-за великого числа пересічних провідників плата двостороння. Основний крок координатної сітки приймаємо 1,25 мм. Центри усіх отворів розташовуються на друкованій платі у вузлах координатної сітки. Діаметр монтажних і перехідних отворів береться 0,75 мм. Розмір плати 76х56 мм (рис. 4.1). Плата отримана в програмі DipTrace [28].

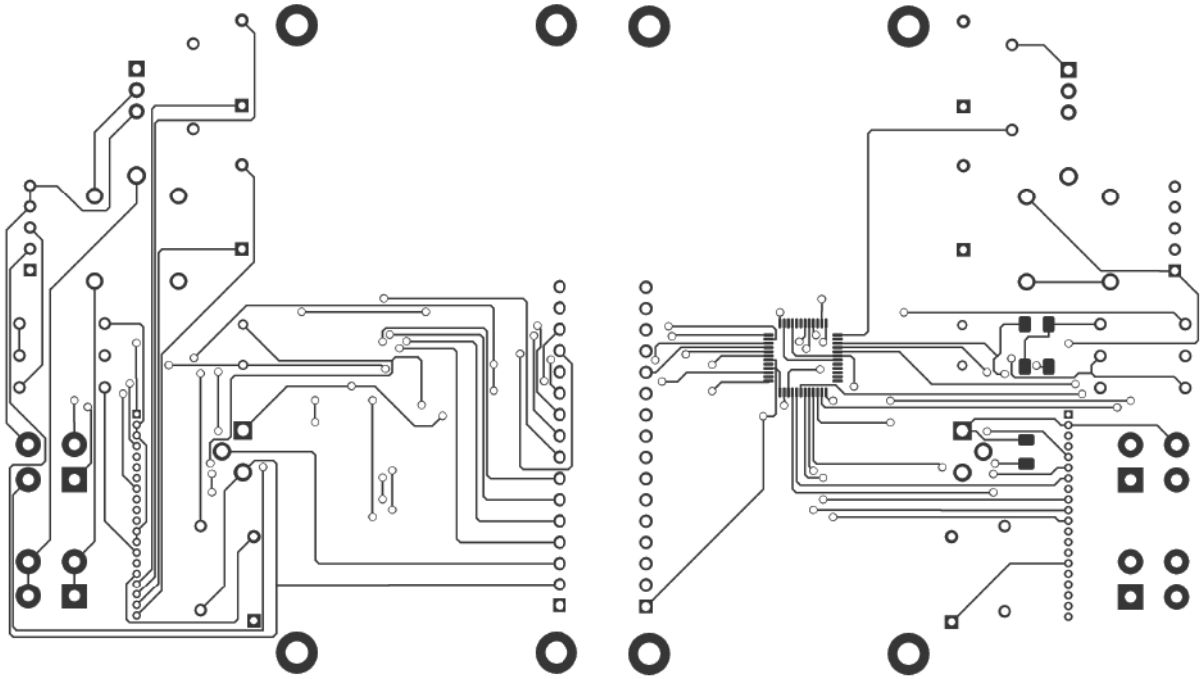


Рисунок 4.1 — Плата друкована, верхня та нижня сторона.

Друковані провідники виконані однакової ширини - 0,3 мм з допуском 0,05 мм. Провідники покрити сплавом "Розе". Маркування на платі виконувати труїнням шрифтом 2.5, у вузьких місцях шрифтом 2.

Для виготовлення друкованої плати відповідно до ОСТ 4.010.022 і з особливостей виробництва вибираємо комбінований позитивний метод.

1. Відповідно до ДСТУ 2.3751-86 для даного виробу необхідно вибрати четвертий клас точності друкованої плати.

2. Габаритні розміри друкованих плат повинні відповідати ДСТУ 10317-79. Для ОДП максимальні розміри можуть бути 600 х 600 мм. Габаритні розміри даної друкованої плати задовольняють вимогам даного ДСТ.

3. Відповідно до вимог ОСТ 4.077.000 вибираємо матеріал для плати на підставі склотканини - склотекстоліт FR4. Товщина 1.5 мм.

4. Спосіб отримання рисунка - фотохімічний.

Конструктивно пристрій розташовано в корпусі з ABS пластику. На верхній частині корпусу розташовано індикатор та кнопки управління пристроєм.

4.2 Виготовлення друкованої плати

Відома велика кількість технологічних варіантів виготовлення друкованих плат. Найбільш широкого поширення набули наступні методи:

- хімічний метод. Полягає в тому, що на мідну фольгу, приклеєну до діелектрика з однієї або з двох сторін, наносять кислотостійкою фарбою рисунок розташування друкованих провідників. Наступним труїнням видаляється мідь з незахищених ділянок і на діелектрику залишається схема провідників.

Найбільш поширеними варіантами цього способу є фотохімічний, ситчасто-хімічний, офсетно-хімічний, які розрізняються способом нанесення захисного шару.

Перевагами цього методу: достатня простота, легко піддається автоматизації. Недоліки: необхідність застосування металевих втулок при двосторонньому монтажі і непродуктивна витрата міді.

- електрохімічний метод. Полягає в нанесенні на плату кислотостійкою фарбою негативного рисунка провідників. Нанесення рисунка відбувається з наступним нарощуванням шару міді.

Основна перевага електрохімічного методу полягає в можливості металізації отворів одночасно з отриманням провідників. Недоліком є низька розсіююча здатність (0,5…0,8 мм) і низька міцність зчеплення провідників з основою.

Електрохімічний метод знаходить застосування головним чином в дослідному і дрібносерійному виробництві при виготовленні двосторонніх плат з великим числом переходів.

- комбінований метод. Полягає в отриманні провідників шляхом труїння фольгованого діелектрика і металізацією отворів електрохімічним способом. Суть методу труїння фольгованого матеріалу з наступним витравленням фольги з окремих ділянок плати. Цей метод забезпечує отримання чітких ліній провідників друкованої схеми. Він характеризується меншою трудомісткістю в порівнянні з електрохімічним методом. Друковані плати надійніші, оскільки при цьому діелектрик знаходиться в сприятливішій умові, тому що фольга оберігає його від дії електроліту.

Комбінований метод широко застосовується при виготовленні двосторонніх друкованих плат. Після механічної обробки плату перевіряють на наявність тріщин, відшаровування провідників та цілісність електричних ланцюгів методом продзвонювання.

Деталі встановлюють вручну, а пайку виконують паяльником 35 Вт припоєм ПОС-60 із застосуванням безкислотних флюсів. Якість пайки контролюють зовнішнім оглядом. Для захисту провідників використовують резистивні маски на основі епоксидної смоли або сухого плівкового резисту.

4.3 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

В лабораторії при розробці системи управління електроприводом трифазним двигуном має місце ряд шкідливих чинників [29]. До таких чинників можна віднести:

– недостатня освітленість робочої зони;

– не комфортні метеорологічні умови (підвищена температура при роботі з паяльником);

– пари етилового спирту, які виникає в повітрі під час промивання друкованої плати;

– небезпека ураження електричним струмом; причиною якого може бути незнання правил поводження з електронебезпечними об'єктами та умов їх експлуатації.

– вміст у повітрі робочої зони шкідливих речовин, які утворюються під час пайки;

– пил, та мікрочастки стекло текстоліту, які з’являються під час механічної обробки друкованої плати;

– перевантаження (статичні й динамічні) і нервово-психічні чинники (емоційні перевантаження, перенапруга аналізаторів, розумова перенапруга, монотонність праці).

На робочому місці під час пайки можливе перевищення допустимої концентрації парів олова під час проведення паяльних робіт [29]. В організмі людини олово виконує функцію каталізатора ОВР - реакцій. Має великий вплив на кровоносну систему. Основне накопичення відбувається в печінці, нирках, легенях, аорті. Олово не відноситься до особливо токсичним металам, проте надлишок олова в організмі може супроводжуватися неприємними відчуттями. Перевищення норми вмісту олова в організмі має симптоми: зниження апетиту, металевий присмак у роті, болі в животі, нудота, запаморочення, постійні головні болі, розлади зору, подразнення шкіри, станіоз (зміни в легенях), проноси, збільшення печінки, підвищення рівня трансаміназ в крові, гіперглікемія, зниження вмісту в організмі цинку і міді, функціональні зміни центральної нервової системи. При надмірному надходженні олово накопичується в печінці, нирках, скелеті та м'язах. Органічні сполуки олова при надходженні в шлунково-кишковий тракт проявляють виражений кумулятивний ефект з подальшим розвитком хромосомних аберацій

в клітинах кісткового мозку. Олово може стати причиною психічних захворювань.

Шум від двигуна під час налагодження системи може тимчасово активізувати або постійно пригнічувати психічні процеси в організмі людини. Він не лише погіршує самопочуття людини і знижує продуктивність праці на 1—15%, але нерідко призводить до професійних захворювань. Інтенсивний щоденний, він повільно й незворотно впливає на незахищений орган слуху і призводить до розвитку нейросенсорної приглухуватості.

У таблиці 4.1 приведені фактори виробничого середовища та дана оцінка трудового процесу.

Таблиця 4.1 − Оцінка умов праці робочого місця розробника

№ п/п	Фактори виробничого середовища та трудового процесу	Норм. знач. (ПДК, ПДУ)	Факт. знач.	III клас – шкідливі та небезпечні умови та характер праці			Час дії фактора, % за зміну
				I ст.	II ст.	III ст.	
1.	Шкідливі хімічні речовини, мг/м^3: I клас небезпеки: Озон II клас небезпеки: Оксиди азоту III-IV клас небезпеки: − пари спирту − свинець та його неорганічні з'єднання − оксид вуглецю	 0,1 0,5 0,1...10 0,01 20,0	 0,2 0,7 0,2 0,00 5 10,0	 2 1,4			80%
2.	Вібрація (загал. та локальна), дБ	102	110		3		40%
3.	Інфразвук, дБ	-	-	-	-	-	-
4.	Ультразвук, дБ	-	-	-	-	-	-
5.	Неіонізуюче випромінювання: -радіочастотний діапазон, В/м -Діапазон пром. частоти, кВ/м -Оптич. діапазон (лаз. випромінювання), Вт/м^2	 25 - -	 40 - -	 15 - -	 - - -	 - - -	 90% - -
6.	Мікрокл. у приміщ. теплий період: -температура повітря, °С -швидкість руху повітря, м/с -відносна вологість повітря, %	 23-25 0,1 40-60	 27 0,2 55	 2 0,1			 90% 90% 90%
7.	Шум	80	85	5			80%

Робота розробника виконується згідно з нормами умов праці робочого місця інженера-електроніка.

4.4 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів

При виникненні перевантаження по струму та при дії електричних завад в розробленій системі керування на основі мікроконтролеру існує вірогідність порушення роботи електродвигуна, а саме можливість раптового підвищення швидкості обертання робочого органу верстата в якому закріплена оброблювальна деталь. Це може призвести до виникнення небезпечної ситуації, при якій є імовірність травмування оператора який працює за цим верстатом. З метою усунення цієї небезпеки та підвищені завадостійкості усієї системи в системі керування двигуном виконане розділення сигнальної і силової землі, аварійні вимакачі та датчик обертів.

До роботи в лабораторії по налагодженню системи управляння допускаються розробники, які ознайомлені з обслуговуванням, управлінням і наладкою пристрою.

До ізолюючих електрозахисних засобів в лабораторії, призначених для ізоляції людини від частин обладнання, які можуть виявитись під напругою, відносяться: ізольовані електровимірювальні кліщі, покажчики напруги, діелектричні рукавиці.

Для захисту розробників від шкідливої дії шуму під час випробувань системи управляння двигуном застосовуються засоби індивідуального захисту (заглушки і ін.). Ефективність засобів індивідуального захисту може бути забезпечена їх правильним підбором залежно від рівнів і спектру шуму, а також контролем за умовами їх експлуатації.

Організаційно-технічні засоби захисту від шуму пов'язані з вивченням процесів шумоутворення технологічного і інженерного устаткування, а також з розробкою досконаліших малошумних конструкторських рішень, норм гранично допустимих рівнів шуму на робочому місті інженера.

В цілях профілактики несприятливої дії вібрації від двигуна, що працює повинні використовувати засоби індивідуального захисту: рукавиці або рукавички, спецвзуття.

Зниженню надходження в повітря робочої зони пилу сприяє хороша герметизація устаткування, своєчасний і якісний ремонт вентиляції, наявність дистанційного керування.

До санітарно-технічних заходів щодо усунення шкідливого впливу пилу відноситься: устаткування робочих місць місцевою витяжною вентиляцією, укриття устаткування суцільними пиленепроникними кожухами з ефективною аспірацією повітря і ін.

При проведенні налагоджувальних або ремонтних робіт системи керування на основі мікроконтролеру існує ризик ураження працівника електричним струмом, внаслідок стрибка напруги мережі живлення. Для усунення цієї небезпеки на вході схеми керування встановленні запобіжники, які при перевантажені у лінії або на підстанції захистять працівників від ураження електричним струмом.

4.5 Виробнича санітарія

Об'єм виробничого приміщення на одного працюючого згідно санітарних норм повинен складати не менше 15 $м^3$, а площа приміщень 4,5 $м^2$. Ширина основних проходів не менше 1,5 м. Висота виробничого приміщення не менше 3.2 м, ширина виходів з приміщень не менше 1,5 м [30].

Ефективним засобом нормалізації повітря у лабораторії є вентиляція.

У лабораторії пропонується механічна вентиляція з вентилятором типу ВЕНТС ТТ 125, при якій обмін повітря здійснюється внаслідок різниці тисків, яку створюють вентилятори.

Вентиляційне обладнання в основі якого вентилятори ВЕНТС ТТ ПРО необхідно вмикати кожен раз перед виконанням паяльних робіт і вимикати через 10 − 15 хвилин після їх закінчення.

На ділянці збірки використовується центральне водяне опалення з радіаторами. Такий вид опалення відповідає основним санітарно-гігієнічним вимогам і забезпечує рівномірність нагріву приміщень; можливість централі-

зованого регулювання температури теплоносія (води); відсутність запаху гарі; підтримання відносної вологості повітря [31].

Правильно організоване освітлення створює сприятливі умови праці, підвищує роботоспроможність.

Штучне освітлення виконується за допомогою електричних джерел світла − люмінесцентних ламп. Прийняті значення освітленості приведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 − Прийняті значення освітленості в лабораторії

Найменування дільниці	Розряд зорової роботи	Освітленість (лк) та коефіцієнт запасу при використанні люмінесцентних ламп		
		Система комб. освітлення	Система заг. освітлення	Коефіцієнт запасу
Лабораторія	3 Б	750	300	1.2

В лабораторії відноситься до категорії робіт: легка Іб. Оскільки до цієї категорії належать роботи, що виконуються сидячи, стоячи або пов'язані з ходінням та супроводжуються деяким фізичним напруженням. Оптимальні і допустимі показники температури, відносної вологи та швидкості руху повітря повинні відповідати значенням, зазначених у таблиці 4.3. Коливань температури повітря по горизонталі в робочій зоні, а також протягом зміни допускаються до 4 ° С - при легких роботах [32].

В лабораторії виділяються пари етилового спирту з густиною, що перевищує густину повітря, то загальнообмінна вентиляція повинна забезпечити видалення 60% повітря з нижньої зони приміщення та 40 % - з верхньої.

Таблиця 4.3 Оптимальні та допустимі норми температури, відносної вологості і швидкості руху повітря в лабораторії

Період року	Температура, °С		Відносна вологість		Швидкість руху, м / с	
	Опт.	Доп.	Опт.	Доп.	Опт.	Доп.
Холодний	21-23	24-17	40-60	75	0,1	<0,2
Теплий	22-24	28-19	40-60	55	0,2	0,1-0,3

Забезпечення вловлювання шкідливих виділень (парів від пайки, пилу від плат) безпосередньо в місцях їх виділення, застосовують місцеву вентиляцію [30].

4.6 Електробезпека

Робочі місця, на яких виконується пайка та луження з використанням електроінструмента, повинні бути обладнані електрощітом з гніздами для підключення електроінструменту і підставкою для паяльника з лотком, який запобігає потраплянню припою, флюсу та нагару на поверхню стола, а також тарою для зберігання комплектуючих виробів та матеріалів. Виконання технологічних операцій, які супроводжуються виділенням шкідливих речовин у повітря робочої зони, повинно виконуватись при включеній місцевій витяжній вентиляції з використанням вбудованих у інструмент відсмоктувачів.

Усі електроприлади в лабораторії мають робочу ізоляцію і елементи для заземлення. Електрообладнання − паяльники, осцилографи, освітлювачі місцевого освітлення, мають напругу до 1000 В.

Для зменшення небезпеки ураження струмом пропонується встановлення захисне заземлення металевих не струмопровідних частин електричного обладнання. Захисна функція полягає в тому, що сила струму, що буде проходити по тілу людини буде безпечної величини тому, що опір заземлення дуже малий порівняно з опором людини.

При розрахунку заземлювача у однорідному середовищі (засобом коефіцієнтів використання η_B та $\eta_{I\cdot}$) за напругою дотику і кроку необхідно знати їх допустимі значення 4.1:

$$U_{пр.доп.} \geq \ {}_{З} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2$$
$$U_{ш.доп.} \geq \ {}_{З} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \qquad (4.1)$$

За таблицею [29] визначимо коефіцієнт дотику та кроку відповідно:

$$\alpha_1 = 0.15,\ \beta_1 = 0{,}15.$$

Правила устрою електроустановок (ПУЭ) встановлюють найбільше допустиме значення опору заземлювача розсіюванню струму в 4 Ом для лабораторії [33].

Потенціал заземлювача розраховується за формулою 4.2:

$$\varphi_з = I_з \cdot R_з, \tag{4.2}$$

де: $I_з$ – струм замикання на землю, він становить 15 А (складається зі струму двигуна, системи управління та вимірювальних приладів);

$R_з$ – значення опору заземлювача (4 Ом).

Отримуємо: $I_з = 15 \cdot 4 = 60$ В

Опір заземлювача за умовами напруги дотику складає:

$$R_з = \frac{U_{пр.доп}}{I_з \cdot \alpha_1 \alpha_2} \tag{4.3}$$

Опір заземлювача за умовами крокової напруги складає:

$$R_з = \frac{U_{пр.доп}}{I_з \cdot \beta_1 \beta_2} \tag{4.4}$$

Визначимо значення коефіцієнтів α_2 та β_2 за формулами 4.5 і 4.6:

$$\alpha_2 = \frac{R_Л}{R_Л + 1{,}5\rho}, \tag{4.5}$$

де: $R_Л$ – опір тіла людини (1000 Ом) [33];

ρ – розрахунковий питомий опір основи на якій стоїть людина, Ом·м.

$$\beta_2 = \frac{R_ч}{R_ч + 6\rho} \quad (4.6)$$

Підставивши відповідні значення у формули 4.5 та 4.6 отримуємо значення коефіцієнтів α_2 і $\beta 2$, відповідно:

$$\alpha_2 = \frac{1000}{1000 + 1{,}5 \cdot 100} = 0{,}87$$

$$\beta_2 = \frac{1000}{1000 + 6 \cdot 100} = 0{,}63$$

Визначимо значення $U_{ПР.доп.}$ та $U_{Ш.доп}$ за рівнянням 4.1:

$$U_{пр.доп.} \geq 60 \cdot 0{,}15_1 \cdot 0{,}87 = 7{,}83 \text{ В}$$

$$U_{ш.доп.} \geq 60 \cdot 0{,}15_1 \cdot 0{,}63 = 5{,}63 \text{ В}$$

Заземлювач пропонується виконати з сталевих вертикальних стрижневих електродів довжиною l = 2 м, діаметром d =40 мм, верхні кінці яких розташовані на глибині t = 0,8 м. Вертикальні електроди з'єднані поміж собою за допомогою горизонтального електроду сталевої смуги , яка має січення 4х40 мм, вкладеної у землю на глибину t = 0,8 м. Вертикальні електроди розташовані на відстані а = 5 м друг від друга. Тип заземлювача обираємо контурний за периметром приміщення.

За таблицею [33] обираємо кліматичну зону − третю. Коефіцієнт сезонності для однорідної землі: $\varphi_В$ =1,3, $\varphi_Г$ =2. Питомий опір однорідної чорноземного ґрунту складає 100 Ом·м.

Питомий опір ґрунту для вертикального електроду $\rho_В$ та питомий опір ґрунту для горизонтального електроду $\rho_Г$ визначається за формулами 4.7 та 4.8, відповідно:

$$\rho_В = \phi_В \cdot \rho \quad (4.7)$$

$$\rho_Г = \phi_Г \cdot \rho \quad (4.8)$$

Отримуємо:

$$\rho_B = 1{,}3 \cdot 100 = 130 \text{ Ом·м}$$

$$\rho_Г = 2 \cdot 100 = 200 \text{ Ом·м}$$

На підставі наявних даних о розрахункових питомих опорах ґрунту визначимо розрахункове значення заземлювача $R_З$ за формулою 4.12.

Одиночне заземлення вертикального заземлювача складає:

$$R_B = \frac{\rho_B}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right), \quad (4.9)$$

де: l – довжина стрижнів заземлювача;

t – відстань від поверхні землі до 0.5l.

$$R_B = \frac{130}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 2} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 2}{0{,}04} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2{,}3 + 2}{4 \cdot 2{,}3 - 2} \right) = 35{,}2 \text{ Ом}$$

Кількість вертикальних заземлювачів складає:

$$n = \frac{R_B}{R_H}, \quad (4.10)$$

де: $R_Н$ – номінальне значення опору розтіканню струму.

$$n = \frac{35{,}2}{4} \approx 9$$

Тому кількість вертикальних заземлювачів складає 9 штук.

Опір горизонтального заземлювача визначаємо за формулою 4.11:

$$R_Г = \frac{\rho_Г}{2 \cdot \pi \cdot L} \ln \frac{2L^2}{b t_0}, \quad (4.11)$$

де: b – ширина сталевої горизонтальної смуги;

t_0 - глибина укладання у землю горизонтальної смуги.

$$R_Г = \frac{200}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 45} \ln \frac{2 \cdot 45^2}{0{,}04 \cdot 0{,}8} = 8{,}9 \text{ Ом}$$

Визначимо коефіцієнти використання вертикальних та горизонтальних електродів відповідно [29]: $\eta_В = 0{,}74$ та $\eta_Г = 0{,}48$.

Опір групового заземлення складає:

$$R_З = \frac{R_В \cdot R_Г}{R_В \cdot \eta_Г + R_Г \cdot \eta_В \cdot n} \quad (4.12)$$

Підставивши відповідні значення у формулу 4.12 отримуємо:

$$R_З = \frac{35{,}2 \cdot 8{,}9}{35{,}2 \cdot 0{,}48 + 8{,}9 \cdot 0{,}74 \cdot 9} = 3{,}29 \text{ Ом}$$

Оскільки розрахований $R_З < R_Н$, кількість вертикальних електродів обрана правильна і складає (n =9).

Таким чином, заземлювач, який проектується є контурним та складається з 9 вертикальних стрижнів довжиною 2 м, діаметром d = 40 мм, січенням 4 х 40.

Схема заземлення для лабораторії показана на рис. 4.2.

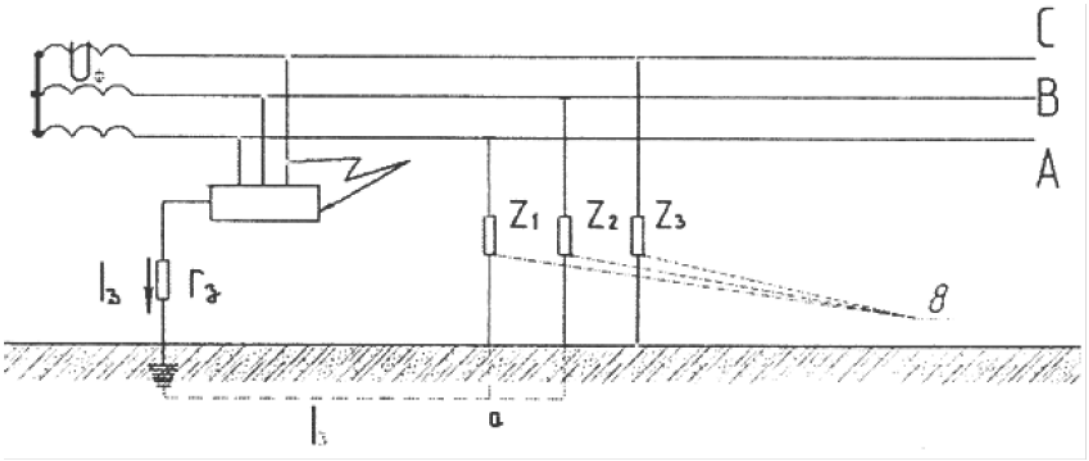


Рисунок 4.2 — Схема захисного заземлення в лабораторії

$I_з$ – струм заземлення, $r_з$ - опір заземлення контуру.

На рисунку 4.3 представлена схема заземлюючого пристрою та його приєднання до заземлювального обладнання.

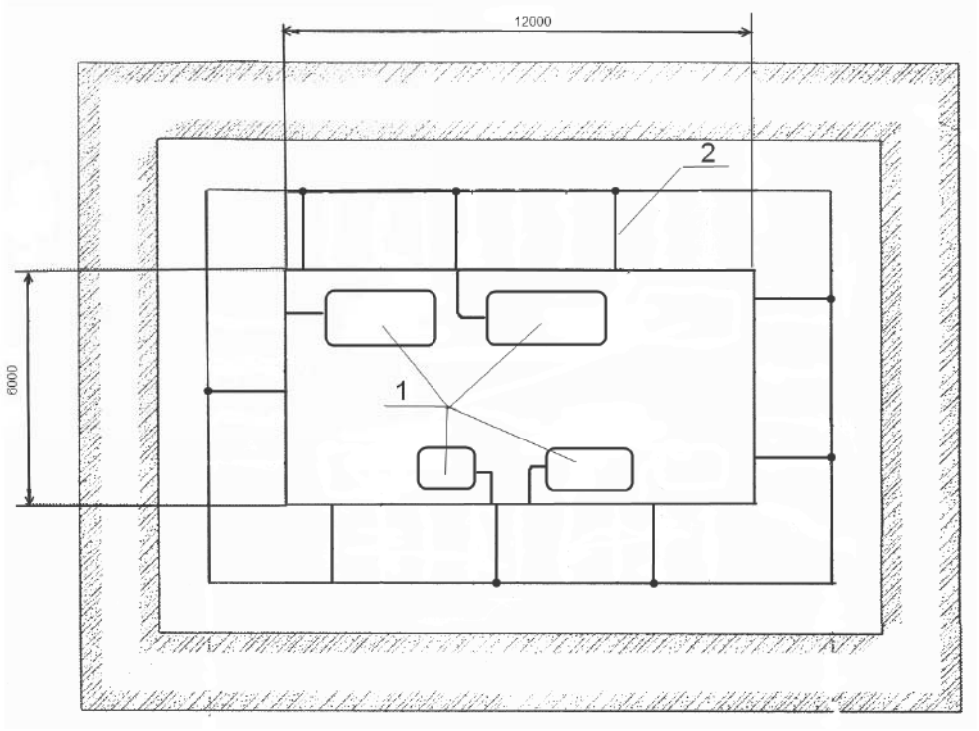


Рисунок 4.3 — Розташування заземлювачів та
електроустановок в лабораторії:
1 — електроустановки лабораторії, 2 - захисне заземлення

4.7 Пожежна та техногенна безпека

Згідно з [34, 35] будинок, де знаходиться лабораторія відноситься до категорії Д за пожежною небезпекою, тобто в неї є негорючі речовини і матеріали в холодному стані. Клас пожежі можливий в лабораторії – (Е) прийнятий для позначення пожеж, пов'язаних з горінням електроустановок.

Увесь пожежний інвентар та оснащення повинні триматись у справному стані та розташовуватись у видних місцях з метою забезпечення вільного доступу до них.

Площа лабораторії складає 72 м^2. Для гасіння електрообладнання, вимірювальних пристроїв, двигунів, ПК, яке знаходиться під напругою, у цьому приміщенні завжди повинні бути присутні ручні вугле-кіслотні вогнегасники марки: ВВК-1,4 або ВВК-5 у кількості 2 штуки.

Лабораторія обладнана системою пожежної сигналізації. Вона складає-

ться з: двох комбінованих пожежних датчиків Sapsan Pro 5T (реагують на дим та тепло); оповіщувача пожежного світлозвукового та оповіщувача ручного; панелі пожежної сигналізації, котра передає інформацію о возгоранні на центральний комп'ютер.

Дії при пожежі в лабораторії наступні:

- подзвонити за номером 101;

- Переконайтеся, що за дверима немає пожежі, приклавши свою руку до дверей або до металевої ручці. Якщо вони гарячі, то ні в якому разі не відкривайте двері;

- не входьте туди, де велика концентрація диму і видимість менше 10 метрів.

- ідіть до виходу на зігнувшись, так як шкідливі продукти горіння скупчуються на рівні нашого зростання і вище, закриваючи при цьому рот і ніс підручними засобами захисту;

- по дорозі за собою щільно закривайте двері;

- покинувши небезпечне приміщення, повідомте про себе посадовим особам.

При проектуванні внутрішнього пожежного водопроводу необхідно щоб до будь-якої точки будівлі могли дотягнутися два пожежних рукава підключених до різних кранам. Точніше дотягуватися повинні струменя формовані двома стовбурами, підключеними до різних кранам. Стояки пожежного водопроводу треба прокладати в таких місцях, де доступ до них нічим не ускладнений. Найбільш поширені рішення - це сходові клітки і біля них. Внутрішній пожежний водопровід, як правило, роблять замкнутим з живленням від зовнішнього побутового або пожежного водопроводу. У разі, коли зберігається ймовірність замерзання пожежного водопроводу його необхідно ретельно утеплити.

Для блискозахисту треба провести монтаж захисту по другій категорії, оскільки лабораторія не має вибухонебезпечних суміш [34, 35].

5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Одним з основних показників, за допомогою якого оцінюється економічна ефективність нової техніки, є величина капітальних вкладень [36].

До таких капітальних вкладень відносяться витрати на науково-дослідні і дослідно-конструкторські роботи, включаючи випробування і доопрацювання дослідних зразків.

Для визначення вартості конструкторської підготовки виробництва складається кошторис витрат з моменту отримання завдання до виготовлення і заводських випробувань дослідного зразка включно і коректування документації за наслідками цих подій.

5.1 Розшифровка суми витрат по статтям кошторису:

І. Зарплата розробників по етапам розраховується, виходячи з кількості технічної документації (схем, креслень, текстової документації), що розробляється, з використанням нормативів базового підприємства на розробку різних видів документації. Зарплата виконавців по кожному етапу є сумою добутків тривалості етапів в днях на денну ставку виконавця (по всім виконавцям).

Тривалість етапу визначаємося як добуток кількості листів розробленої документації на відповідну норму часу в нормо-годинах на розробку, поділене на число прийнятих розробників і середню тривалість робочого дня (8 годин).

Денна ставка виконавця визначається відношенням місячного окладу до середнього числа робочих днів в місяці (22 дні).

Розрахунок зарплати розробників технічної документації на розробку системи управління електроприводом трифазним двигуном приведений в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Розрахунок зарплати розробників технічної документації

№	Найменування етапів розробки	Одиниця	К-ть креслень	Норматив часу на одиницю, нормо - година	Трудомісткість етапу, люд.- година	Число виконавців	Тривалість етапу, днів	Денна ставка виконавців	Зарплата на етап, грн.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Схема електрична функціональна	Схема ф.А1	1	1	1	1	0,12	564,4	70,55
2	Схема електрична принципова	ф.А1	1	8	8	1	1	487,5	487,5
3	Складальне креслення	ф.А1	1	12	12	1	2	471,2	942,4
4	Розрахунки	ф.А4	6	2	12	1	2	487,5	975,0
5	Записка пояснення	ф.А4	64	1	64	1	8	487,5	3900,00
6	Документи інші	ф.А4	3	1	3	1	0,38	471,2	176,70
7	Креслення друкованої плати	ф.А4	1	1	1	1	1	567,6	567,6
	Разом								7119,75

Зарплата виконавців на коректування документації визначається з трудомісткості розробки відповідних документів: коректування складає 15… 20% цій трудомісткості.

2. Зарплата на виготовлення і випробування дослідного зразка по всім етапам визначається таким чином: дослідний зразок виготовляється і випробовується в лабораторії; тривалість цих робіт узяті з досвіду базового підприємства, а потім розраховані аналогічно розрахунку зарплати на розробку документації (див. таблицю 5.1).

При визначенні зарплати на виготовлення дослідного зразка трудомісткість по видам робіт збільшена на 100% проти трудомісткості серійного виробу і підвищені розряди роботи на один з урахуванням ручних робіт в дослідному виробництві.

Таблиця 5.2 – Зарплата за виготовлення дослідного зразка

№	Вид робіт	Середній розряд робіт	Трудо-місткість нормо - год	Тарифна ставка, грн/год	Зарплата, грн
1	Монтажні	5	5	82,16	410,80
2	Складальні	6	2	93,60	187,20
3	Регулювальні	5	1	82,16	82,16
	Разом				680,16

3. Матеріальні витрати на зразок складаються з вартості матеріалів (таблиця 5.3) і комплектуючих виробів (таблиця 5.4) на проектований виріб. При цьому, виходячи з обліку втрат, вартість матеріалів і комплектуючих збільшена на 30%.

Таблиця 5.3 – Вартість матеріалів

№	Найменування	Одиниця виміру	К-ть на виріб	Ціна за одиницю	Сума, грн
1	Ізоляційні матеріали	кг	0,2	20,00	4,00
2	Провід, кабель	м	5	12,00	60,00
3	ПОС-60	кг	0,03	4500,00	168,80
4	Металеві вироби	кг	0,05	25,00	1,25
	Разом:				233,25

Таблиця 5.4 – Витрати на куповані комплектуючи вироби

№	Найменування	Кількість	Ціна одиниці	Сума, грн
1	Трансформатор 220В	1	420,00	420,00
2	Конденсатор	6	2,00	12,00
3	Мікроконтролер	1	154,00	154,00

4	Резистор	4	0,50	2,00
5	Діод	6	22,00	132,00
6	Інтегральний стабілізатор	2	30,00	60,00
7	РК- індикатор	1	85,00	85,00
8	Конденсатор високовольтний	3	90,00	270,00
9	Драйвер	1	704,00	704,00
10	Кнопки	3	20,00	60,00
11	Охолоджувач	1	200,00	200,00
	Разом:			2099,00

4. Накладні витрати беруться у розмірі 20…140% сумарної зарплати розробників з урахуванням виготовлення і випробування дослідного зразка і коректування документації за наслідками випробувань.

5. Собівартість дослідного зразка визначається за формою таблиці 5.5.

Інші витрати включають невраховані витрати на виготовлення або придбання спеціальної апаратури, необхідної для випробування макету і дослідного зразка. Виходячи з вищенаведених розрахунків, складається кошторис витрат на конструкторську підготовку виробництва виробу (таблиця 5.6).

Таблиця 5.5 – Калькуляція собівартості дослідного зразка

№	Стаття витрат	Витрати на проектований виріб, грн.
1.	Матеріали	233,25
2	Куповані комплектуючи вироби	2099
3	Транспортні витрати (5% п.1+п.2)	116,61
4	Заробітна плата виробничих робочих	680,16
5	Нарахування на зарплату (37%)	251,65
6	Накладні витрати(120% п.4)	816,19
	Разом собівартість	4196,86

Таблиця 5.6 – Кошторис витрат на конструкторську підготовку виробництва

№	Стаття витрат	Сума, грн
	Зарплата розробників по всім етапам розробки	7119,75
	Зарплата на коректування технічної документації за наслідками випробувань дослідного зразка (20% п.1)	1423,95
	Разом ФЗП	8543,70
	Нарахування на зарплату (37%)	3161,17
2	Накладні витрати (120% ФЗП)	10252,44
3	Собівартість дослідного зразка	4196,86
	Інші витрати	816,19
	Всього вартість розробки	35514,06

Для складання калькуляції собівартості і визначення ціни виробу необхідно розрахувати зарплату робочих, безпосередньо зайнятих у виробництві розробленого блоку.

Заробітна плата виробничих робочих визначається на підставі трудомісткості виготовлення виробу, розрядів і відповідних тарифних ставок по видах робіт [37].

Розрахунок заробітної плати виробничих робочих представлений в таблиці 5.7. Основними видами виконуваних робіт є складальні, монтажні і регулювальні роботи.

Таблиця 5.7 – Заробітна плата виробничих робочих

№	Вид робіт	Середній розряд робіт	Трудомісткість нормо - год	Тарифна ставка, грн/год	Зарплата, грн
1	Монтажні	4	2	70,20	140,40
2	Складальні	5	1	82,16	82,16
3	Регулювальні	5	0,5	82,16	41,08
	Разом				263,64

5.2 Розрахунок собівартості серійного виробу проводиться на основі калькуляційних статей витрат

Загальновиробничі витрати прийняті у розмірі 120% від суми основної заробітної плати виробничих робочих. Прибуток – 30% від виробничої собівартості.

Таким чином, калькуляція собівартості і ціни одиниці виробу має вигляд, представлений в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Калькуляція собівартості і ціни одиниці виробу

№	Стаття витрат	Величина на проектований виріб, грн.	Примітка
1	Матеріали	233,25	Табл. 5.3
2	Куповані комплектуючі вироби	2099	Табл. 5.4
3	Транспортні витрати	116,61	5% (п.1+п.2)
4	Основна зарплата робочих	263,64	Табл. 5.7
5	Додаткова зарплата робочих	52,73	20% п.4
6	Відрахування на соц. заходи	117,05	37% (п.4+п.5)
7	Загальновиробничі витрати	316,37	120% п.4
8	Разом виробнича собівартість	3198,65	
9	Прибуток	959,6	30% п.8
	Ціна виробника	4158,24	

У сучасних умовах при проектуванні будь-якого виробу необхідно обґрунтувати доцільність його серійного випуску за допомогою розрахунку основних економічних показників.

Економічне обґрунтування технічних рішень включає визначення економічного ефекту, ефективності і терміну окупності інженерної розробки.

Річний економічний ефект розраховується по формулі [36]:

$$Э = П \times В - е \times К, \quad (5.1)$$

де $П$ – очікуваний прибуток від реалізації одиниці продукції,

П=959,6 грн.;

$В$ – об'єм випуску продукції в рік, В=100 шт.;

$е$ – нормативна величина ефективності, е = 0,15;

$К$ – капітальні вкладення на розробку виробу К=35514,06грн.

Підставимо у формулу (5.1) очікуваний прибуток від реалізації одиниці продукції і капітальні вкладення на розробку виробу і розрахуємо величину річного економічного ефекту:

$$Є = 959{,}6 \times 100 - 0{,}15 \times 35514{,}06{,}00 = 90632{,}6\,грн.$$

Економічна ефективність визначається по формулі:

$$E = \frac{Є}{K}. \qquad (5.2)$$

Тобто, економічна ефективність інженерної розробки буде дорівнювати:

$$E = \frac{90632{,}6}{35516{,}06} = 2{,}55 \text{ грн./грн.}$$

Термін окупності є величиною, зворотною економічній ефективності і розраховується по формулі [36]:

$$\mathrm{T} = \frac{1}{\mathrm{E}}. \qquad (5.3)$$

Термін окупності проектованого виробу складе:

$$T = \frac{1}{2{,}55} = 0{,}39 \text{ року.}$$

Таблиця 5.9 – Основні економічні показники

Найменування показника	Одиниці виміру	Величина показника
Вартість капітальних вкладень	грн.	35514,06
Ціна виробника	грн.	4158,24
Випуск за рік (орієнтований)	шт.	100
Річний економічний ефект	грн.	90632,6
Економічна ефективність	грн./грн.	2,55
Термін окупності	рік	0,39

Економічні розрахунки підтвердили доцільність виготовлення системи управління електроприводом трифазним двигуном.

ВИСНОВКИ

В роботі розроблено систему управління електроприводом трифазним двигуном. Це дозволило провести вдосконалення верстатів в частині підвищення рівня їх автоматизації з використанням мікроконтролерів.

Для вирішення завдання було проведено аналіз структурних схем перетворювачів частоти для побудови системи управління. Виявлено, що управління драйверами інвертора здійснюється за допомогою формування шестиканального ШІМ-сигналу з автоматичним додаванням "мертвого часу". Основним елементом на основі якого будуються систем управління сучасних ПЧ є спеціалізований мікроконтролер або цифровий сигнальний процесор. Враховуючи потреби верстата було розроблено однопроцесорну систему управління на основі мікроконтролера фірми Microchip.

Добитися істотного зниження габаритних розмірів пристрою вдалося шляхом використання інтегрованого силового модуля IRAM. Це стало можливим завдяки застосуванню нових типів силових ключів, яким властива менша займана кристалом площа та наявність інтегрованих систем захисту.

В розділі техніко-економічного обгрунтування були проведені розрахунки які підтвердили доцільність розробки.

Також розглянуті питання з охорони праці та техногенної безпеки, було розраховано заземлення для лабораторії де проводиться проектування мікропроцесорних систем управляння.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Попович М.Г., Лозинський О.Ю. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи.– К.: Либідь, 2005.– 680 с.

2. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електроприводу.– К.: Кондор, 2005.– 408 с.

3. Шульга О.В. Автоматизоване керування електроприводами: навчальний посібник.–Полтава: ПНТУ, 2007. – 295 с.

4. Теорія електропривода: Підручник / М.Г.Попович, М.Г.Борисюк, В.А.Гаврилюк та ін: за ред. М.Г.Поповича. – К.: Вища шк., 1993. – 494 с.

5. В.В. Воротніков. Система керування технологічними процесами з використанням концепції IoT і технологій штучного інтелекту. Технічна інженерія. 2024, №2, с.90-103. DOI: https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-90-103

6. Фрезерно-гравірувальні верстати. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://cncmachines.com.ua/uk/product-category/cnc-machines-uk/cnc-milling-engraving-machines-uk/?gad_source=1&gad_campaignid=20289537804&gclid=CjwKCAjwwpDQBhAuEiwAa-4WozrUcqyKhwhPYGDRyiJ5zp4TtkgFacs5eenDUJm98PTFUdvH3xYkhxoC4LcQAvD_BwE

7. Грабко В. В., Кучерук В. Ю., Возняк О. М. Мікропроцесорні системи керування електроприводами. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2009. – 146 с.

8. PowerFlex® Low Voltage AC Drives Selection Guide – 2013. Rockwell Automation https://el-it.com.ua/docs/Automation/Rockwell%20AC%20Drives/PFLEX-SG002%20PowerFlex%20Low%20Voltage%20Selection%20Guide.pdf

9. Ye Dai 1, Xueshi Tao, Zhaolong Li, Shiqiang Zhan, Yang Li. A Review of Key Technologies for High-Speed Motorized Spindles of CNC Machine Tools //Machine, february 2022 10(2):145, p.23. DOI:10.3390/machines10020145

10. Huanjiang (Manufacturer), "GDZ80-1.5B Watercooling Spindle for CNC Router," [Online]. Available: https://www.madeinchina.com/mall/show-

Machine-Tool-Electric-Motor-Gdz-80mm-1-5kw-Watercooling-Spindle-for-Wood-CNC-Router-Mill-Spindle-CNC-Cutting-Machine_968410.html

11. STM32 32-bit Arm Cortex MCUs. STMicroelectronics. Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html. Дата звернення: 1 червня 2026.

12. AVR494: AC Induction Motor Control Using the constant V/f Principle and a Natural PWM Algorithm [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ ApplicationNotes/ApplicationNotes/doc7545.pdf.

13. ATAVRMC200 Hardware User Guide. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/ OTH/ ProductDocuments/UserGuides/doc7638.pdf

14. Microchip. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.microchip.com

15. Hitachi HD44780 LCD Display [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.df.unipi.it/~flaminio/laboratori/pdf_files/hd44780.pdf

16. Тахогенератор 4Р [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https:// standart-pribor.com.ua/product/takhogenerator-4r/

17. IRAM136-3063b International Rectifier Corporation. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.irf.com/product-info/datasheets/ data/ iram136-3063b.pdf

18. DC bus pre-charge from the AC mains [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://imperix.com/doc/implementation/dc-bus-pre-charging-techniques?utm_source=chatgpt.com&currentThread=active-front-end-afe

19. Datasheet IRLU024. Vishay Siliconix. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.vishay.com/docs/91322/sihlr024.pdf

20. Datasheet LM7805, TI. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://cdn.sparkfun.com/assets/1/7/7/3/2/LM7805.pdf

21. Datasheet LM7833. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https:// www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/1090/LM7833-pdf.php

22. Трансформатори малої потужності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://dspace.library.khai.edu/xmlui/handle/123456789/8185

23. Technical Data for Magnet Copper Wire by Size acc. to IEC 60317 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.elektrisola.com/en-us/Products/Enamelled-Wire/Technical-Data

24. Датчик ACS714 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.pololu.com/file/download/ACS714.pdf?file_id=0J196

25. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.semanticscholar.org / paper/Digital-Twin%3A-Enabling-Technologies%2C-Challenges-and-Fuller-Fan/ea866449231dfee62032305e0dba3c250311e2c6

26. Micro-Cap 12 Electronic Circuit Analysis Program Reference Manual. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.iee.et.tu-dresden.de / ~muellerj/simulation/soft/microcap/MC12.RefManual.pdf

27. Spectrum Software, "Micro-CAP 12 – Analog/Mixed Signal Circuit Analysis Software," [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://web.archive.org/web/20200621080723/http://www.spectrum-soft.com/download/download.shtm

28. Програма Diptrace. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://diptrace.com/

29. Гандзюк М.П. Желібо Є. П. Основи охорони праці. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ктеп.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/12/Gandzyuk-osnovy_ohorony_prac.pdf

30. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція і кондиціонування. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1018 (дата звернення: 18.02.2026).

31. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень

32. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. — Київ: Мінрегіонбуд України, 2018.

33. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. — Київ: Міненерговугілля України, 2017.

34. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою

35. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні

36. Попова В.Д. Методичні вказівки до виконання економічної й організаційної частини дипломної роботи – Запоріжжя, 2005,-36с.

37. Мінімальна заробітна плата в Україні 2026. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://index.minfin.com.ua/ua/labour/salary/min/ (дата звернення: 18.02.2026).

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
				Документація		
А1			ЕІСПЗ Д.23661.00.00.00.00 Е1	Система керування трифазним двигуном на основі мікроконтролера. Схема електрична структурна		
А1			ЕІСПЗ Д.23661.00.00.00.00 Е3	Система керування трифазним двигуном на основі мікроконтролера. Схема електрична принципова		
А4			ЕІСПЗ Д.23661.00.00.00.01 Е3	Система керування трифазним двигуном на основі мікроконтролера. Блок живлення. Схема електрична принципова		
А1			ЕІСПЗ Д.23661.00.00.00.00 Д1	Система керування трифазним двигуном на основі мікроконтролера. Економічні показники		
А1			ЕІСПЗ Д.23661.00.00.00.01	Система керування трифазним двигуном на основі мікроконтролера. Плата друкована		
А1			ЕІСПЗ Д.23661.00.00.00.00.Д2	Система керування трифазним двигуном на основі мікроконтролера. Охорона праці		
А1						

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	ЕІСПЗ Д.23661.00.00.00.00		
Розроб.		Катеринич		8.06.26	Системи керування трифазним двигуном на основі мікроконтролера	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Шмалій		8.06.26				1
Н.контр.		Туришев		8.06.26		ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ 6.1713-с2		
Затверд.		Критська		8.06.26				

Зона	Поз. позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
		Конденсатори		
	C1	KF 1000 мкФ 25В	1	Сархоп
	C2 .. C3	К73-5-0.1 мкФ 50В +/-5%	2	
	C4..C5	KF 100 мкФ 25В	2	Сархоп
	C6..C7	К73-5-0.1 мкФ 50В +/-5%	2	
	DA1	Мікросхема LM7805	1	ST
	DA2	Мікросхема LM7833	1	ST
	FU1	Запобіжник ВПБ6-1 0,5А 220В	1	
	SB	Кнопковий перемикач R13-502	1	
	TV	Трансформатор ТТП-50-220/15	1	
	VD1../VD4	Діодна сборка 2W10	1	
	XS	Вилка TS-407	1	TRIACE
	XS	Розетка B5B-PH-K-S	1	JST

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	ЕІСПЗ Д.23661.00.00.00.01 ПЕЗ		
Розроб.		Катеринич		8.06.26	Система керування трифазним двигуном на основі мікроконтролера Блок живлення Перелік елементів	Літ.	Аркуш 1 / Аркушів 2
Перевір.		Шмалій		8.06.26			
Н.контр.		Туришев		8.06.26		ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ 6.1713-с2	
Затверд.		Критська		8.06.26			

Зона	Поз. позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
		Конденсатори		
	C1..C3	К73-5-0.1 мкФ 450В +/-5%	3	
	C4	К73-5-0.1 мкФ 50В +/-5%	1	
	C5..C6	К10-7В-22 пФ 25В	2	
	C7..C9	HC2G227M30030HA 220мкФ 400В	3	SAMWHA
	DA1	Модуль IRAM 136-3063B	1	ST
	DD1	Мікроконтролер AT32UC3L064	1	Microchip
	FU1..FU3	Запобіжник ПН-2-10А	3	
	HG	Індикатор W1602	1	Winstar
	K1	Реле 20А 12В	1	
	L1	Реактор 10А/0,05мГн	1	
	R1	Резистор 10 Ом 10W +/-10%	1	
	R2	Резистор С2-23-2 10кОм +/-10%	1	
	R3..R6	Резистор С2-23-2 10кОм +/-10%	3	
	R7	Резистор підлаштування RM-063 10кОм +/-10%	1	
	SB1..SB3	Кнопка тактова ТАСТА-64N-F	3	
	TV	Трансформатор ТСН-3кВА/10-У3	1	
	VD1..VD6	Діод D8015L	6	
	VT1	Транзистор IRLU024N	1	
	XP1	Клема SAK-16KRG	1	
	XP2	Разъем BH2-3	1	
	XP3..XP4	Разъем BH5B-PH-K-S	2	
	ZQ1	Кварцевий резонатор КХО-210 16.0 MHz	1	

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	ЕІСПЗ Д.23661.00.00.00.01 ПЕ3		
Розроб.		Катеринич		8.06.26	Система керування трифазним двигуном на основі мікроконтролера Перелік елементів	Літ.	Аркуш 1 / Аркушів 2
Перевір.		Шмалій		8.06.26			
Н.контр.		Туришев		8.06.26		ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ 6.1713-с2	
Затверд.		Критська		8.06.26			

Копіював Формат А4