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

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

на тему *: Дослідження та розробка мікроелектронної системи керування двигуном постійного струму*

Виконав: студент *II* курсу, групи *8.1764*
спеціальності *176 Мікро- та наносистемна техніка*
(код і назва спеціальності)
освітньої програми *176 Мікроелектронні інформаційні системи*
(код і назва освітньої програми)
Книш Іван Андрійович
(ініціали та прізвище)

Керівник *доцент кафедри ЕІСПЗ, доцент, к.т.н., Небеснюк Оксана Юріївна*
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент *інженер-конструктор «Конструкторське бюро Колосова» Григор'єва І.К.*
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя

2025

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 другий (магістерський)
(перший (бакалаврський) рівень
Спеціальність 176 Мікро- та наносистемна техніка
(назва)
Освітня програма Мікроелектронні інформаційні системи
(шифр)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Т. В. Критська

« 01 » грудня 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Книшу Івану Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкту) *Дослідження та розробка мікроелектронної системи керування двигуном постійного струму*
керівник роботи *Небеснюк О.Ю., к.т.н.,доцент*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від " 27 " лютого 2025 року № 313-с

2.Строк подання студентом роботи 28.11 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: *високомоментний двигун постійного струму зверненого типу: номінальний момент 47Нм, Uн =65±5В, Iн=65,5 А, номінальна частота обертання 750 хв $^{-1}$, максимальна частота обертів 1500 хв -1, максимальний момент інерції 0,12 кгм2, момент при максимальній частоті обертання 23 Нм*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *1 Двигун постійного струму. Принцип роботи та характеристики. 2 Дослідження та розробка системи керування двигуном на базі мікроконтролера AVR 3 Техніко-економічне обґрунтування 4 Охорона праці та техногенна безпека*

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

Л1 Принцип дії двигуна постійного струму Л2 Структура системи електронно-перетворюючої системи керування двигуном постійного струму Л3 Структурна схема блоку імпульсно-фазового керування Л4. Розробка блоку імпульсно-фазового керування Л5 Схема електрична принципова системи керування

двигуном Л6 Алгоритм роботи мікроконтролера в якості системи автоматичного регулювання Л7 Результати моделювання системи автоматичного керування в програмі MATLAB Л8 Результати моделювання системи автоматичного керування в програмі MATLAB. Л9 Топологія друкованої плати

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
I	Небеснюк О.Ю., доц. каф. ЕІСПЗ	21.10.24	23.12.24
II	Небеснюк О.Ю., доц. каф. ЕІСПЗ	24.12.24	06.10.25
III	Небеснюк О.Ю., доц. каф. ЕІСПЗ	13.10.25	03.11.25
IV	Небеснюк О.Ю., доц. каф. ЕІСПЗ	10.11.25	24.11.25

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магітсра

7. Дата видачі завдання *21.10.2024 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи магістра	Примітка
1	*Аналіз матеріалу за темою кваліфікаційної роботи*	*04.11. -29.11.24*	
2	*Аналіз та класифікація двигунів постійного струму*	*01.12.24 -23.12.24*	
3	*Розробка блоку імпульсно-фазового перетворення*	*24.12.24 -26.02.25*	
4	*Розробка блоку автоматичного керування*	*03.03-30.04.25*	
5	*Розробка схеми електричної принципової та топології друкованої плати*	*05.05.25-23.09.25*	
5	*Оформлення другого розділу*	*29.09 -06.10.25*	
6	*Розділ «Техніко-економічне обґрунтування»*	*13.10-03.11.25*	
7	*Розділ «Охорона праці та техногенна безпека»*	*10.11. -24.11.25*	
8	*Оформлення пояснювальної записки, виконання креслень*	*24.11. -27.11.25*	

Студент _____ *Книш І.А.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проєкту) _____ *Небеснюк О.Ю.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ *Верьовкін Л. Л.*
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота містить 83 сторінки, 28 рисунків, 14 таблиць, 22 джерела літератури.

Об'єкт проектування – системи керування двигунами постійного струму

Ціль роботи –дослідження сучасних систем керування двигуном постійного струму та розробка системи автоматичного керування на базі мікроконтролера.

Задачі роботи - -провести аналіз систем керування двигунами постійного струму; розробити структурну схему системи автоматичного керування; розробити та розрахувати блок імпульсно-фазового керування; розробити та розрахувати блок автоматичного керування; розробити схему електричну принципову та топологію друкованої плати системи автоматичного керування.

Методика досліджень – моделювання та розрахунки в MATLAB

Короткий виклад результатів досліджень – повністю цифрове рішення блоку автоматичного регулювання і блоку імпульсно-фазового курування із застосуванням мікроконтролера дозволило збільшити функціональність, розширити сервісні функції двигуна, зменшити габаритні розміри та масу приладу. Покращена система захисту від струмів короткого замикання та перевантажень. Система дає високий коефіцієнт корисної дії і енергозбереження та зниження витрат на матеріали при ремонті.

ДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, ІМПУЛЬСНО-ФАЗОВЕ КЕРУВАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, МІКРОКОНТРОЛЕР, ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА, ДРУКОВАНА ПЛАТА

Робота виконана на кафедрі електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення в період з 01 вересня по 28 листопада 2025 р.

ЗМІСТ

ВСТУП 5

1 ДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ. ПРИНЦИП РОБОТИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ 6

1.1 Конструкція та принцип роботи двигуна постійного струму 7

1.2 Види обмоток збудження 10

1.3 Робочі харатеристики двигуна постійного струму 11

1.4 Керування двигуном 14

1.4.1 Класичні методи керування 14

1.4.2 Сучасні системи керування 16

Недоліки такої системи: 17

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА AVR 20

2.1 Структурна схема електронно-перетворюючої системи керування двигуном постійного струму 20

2.2 Розробка системи керування 22

2.2.1 Розробка блоку імпульсно-фазового керування (БІФК) 23

2.2.2 Розрахунок та моделювання фільтру 26

2.2.3 Розрахунок та моделювання граничних елементів 29

2.2.4 Розрахунок та моделювання схема вимірювання напруги на якорі двигуна 31

2.2.5 Розрахунок та моделювання схеми випрямляча 33

2.3 Розробка та розрахунок блоку автоматичного керування 35

2.3.1. Розробка та розрахунок подільника напруги для зворотного зв’язку за швидкістю 40

2.3.2 Розробка та розрахунок схеми зворотного зв’язку за струмом 43

2.3.3 Розробка та розрахунок схеми визначення напряму обертання двигуна 45

2.4 Розробка схеми електричної принципової та топології друкованої плати системи керування 46

2.5 Моделювання системи автоматичного керування в MATLAB 49

2.6 Розробка алгоритму роботи мікроконтролера 51

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ 60

3.1 Розрахунок витрат на елементну базу 60

3.2 Порівняльний аналіз систем керування 62

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 67

4.1 Характеристика потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів 67

4.2. Заходи з поліпшення умов праці, виробнича санітарія 68

4.3. Електробезпека 71

4.4. Пожежна та техногенна безпека 72

4.5 Дослідження засобів захисту від ураження струмом при дотику до фазового дроту 75

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ 77

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ 78

ВСТУП

Розвиток техніки та промисловості неможливий без широкого застосування електричних машин. Серед них особливе місце займають двигуни постійного струму (ДПС), які завдяки своїм конструктивним особливостям і можливостям регулювання швидкості обертання знайшли застосування в різних сферах – від побутової техніки до складних промислових комплексів.

На відміну від двигунів змінного струму, які більш поширені у сучасних електроприводах, двигуни постійного струму мають ряд унікальних характеристик: плавне регулювання швидкості, високий пусковий момент, можливість реверсу, тобто зміни напряму обертання. Саме ці властивості роблять їх незамінними в електротранспорті, металургії, системах автоматизації та керування.

Сучасні системи електропривода вимагають ефективного і надійного керування двигунами. Електронна перетворювальна система (ЕПС) для керування двигуном постійного струму призначена для забезпечення управління швидкістю та моментом двигуна за допомогою електроніки, без механічних регуляторів. Основна функція системи — перетворення постійної напруги живлення у регульовану напругу та струм, необхідні для керування ДПС. Але системи управління, побудовані у кінці 70-х морально застаріли, відпрацювали свій ресурс і безнадійно відстали від сучасних систем з більш високим коефіцієнтом корисної дії. Тож розробка автоматизованої системи керування двигуном постійного струму, що покращіть функціональність і розширити сервісні функції є достатньо актуальним питання.

1 ДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ. ПРИНЦИП РОБОТИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ

Електричні машини поділяються на:

- Генератори – перетворюють механічну енергію в електричну.
- Двигуни – перетворюють електричну енергію в механічну.
- Машини подвійного призначення (наприклад, синхронні, які можуть працювати і як генератор, і як двигун).

За видом струму:

- машини постійного струму,
- машини змінного струму (синхронні й асинхронні).

Двигуни змінного струму (особливо асинхронні) набули великого поширення завдяки простоті конструкції, надійності та низькій вартості. Проте, у багатьох випадках переваги мають саме ДПС:

- можливість плавного та широкого регулювання швидкості;
- високий пусковий момент, що дозволяє запускати важкі механізми;
- простота реалізації реверсу.

Завдяки цим властивостям двигуни постійного струму широко застосовувалися у транспорті, кранах, підйомних механізмах, верстатах, а з розвитком напівпровідникової техніки отримали «друге життя» у високоточних системах керування.

Недоліки ДПС:

- наявність колектора та щіток, які зношуються і потребують обслуговування;
- складність конструкції порівняно з асинхронними двигунами;
- нижча надійність у важких умовах експлуатації [1].

1.1 Конструкція та принцип роботи двигуна постійного струму

Двигуни постійного струму (ДПС) відносяться до класу колекторних електричних машин. Їх конструкція сформувалася ще наприкінці XIX століття і збереглася донині з незначними модифікаціями. Основні елементи двигуна забезпечують перетворення електричної енергії в механічну та можливість керування цим процесом.

Будова ДПС включає дві основні частини:

- статор – нерухома частина, що створює магнітне поле;
- ротор (якір) – обертовий елемент, на який подається струм, і в якому виникає електромагнітний момент.

Крім того, до складу двигуна входять:

- комутатор,
- щітковий вузол,
- підшипники та корпус.

Магнітне поле статора створюється нерухомими постійними магнітами, а на роторі (інакше – якорі) розташована обмотка. Якір жорстко з’єднаний з валом і може обертатися довкола свої осі. Таким чином, конструктивно двигун постійного струму є оберненою синхронною машиною.

Принцип дії двигуна постійного струму пояснює рис. 1.1. Поле статора створюють постійні магніти або електромагніти (обмотки збудження). На феромагнітному осерді якоря розміщена обмотка, яка складається з двох послідовно ввімкнених частин (їх з’єднує показаний пунктиром провідник). На якорі також розташовані ізольовані одна від одної колекторні пластини, до яких під’єднані кінці обмотки якоря. До колекторних пластин через нерухомі графітні щітки від джерела живлення подається електричний струм. Якщо верхню щітку підключити до позитивного полюсу джерела живлення, а нижню – до від’ємного, обмоткою якоря протікатиме струм I, позначений на рис. 1.1. За правилом гвинта

лівий полюс якоря стане північним, правий – південним. Полюси якоря та статора відштовхуватимуться один від одного, викликаючи поворот якоря за годинниковою стрілкою. Якір, повертаючись, за інерцією “проскакує” положення “північний полюс навпроти південного”, і під щітками опиняються інші колекторні пластини. Напрям струму в обмотці якоря змінюється на протилежний, полюси якоря міняються місцями, і обертання якоря продовжується. Для зміни напряму обертання якоря слід змінити полярність напруги, що подана до щіток.

Конструкцію, подібну до зображеної на рис. 1.1, мають малопотужні двигуни (що використовуються, наприклад, у дитячих іграшках). В промислових двигунах для забезпечення плавності руху якір має багато окремих секцій обмотки, з’єднаних з окремими парами колекторних пластин (рис. 1.2). Під час обертання якоря через пару щіток до джерела підключається кожного разу наступна секція якоря, яка за даного положенні якоря має найбільший магнітний зв’язок з полем статора.

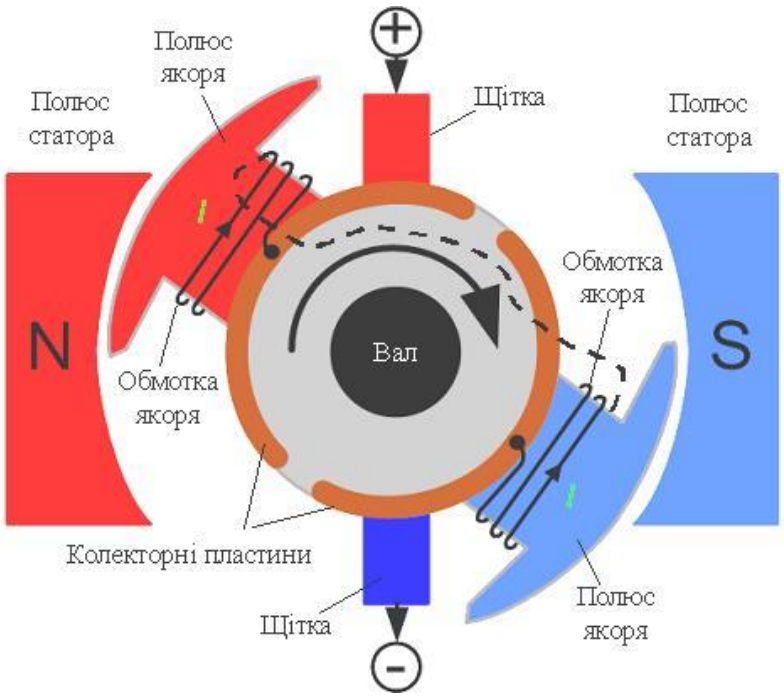


Рисунок 1.1- Принцип дії двигуна постійного струму [2]

Статор двигуна постійного струму складається з:

- магнітопроводу (сталевий циліндр, у якому розміщені полюси),
- полюсів з обмотками збудження (або постійними магнітами).

Призначення статора – створювати необхідний магнітний потік, що взаємодіє зі струмом у роторі.

За способом створення поля розрізняють:

- електромагнітне збудження – обмотка полюсів підключається до джерела постійного струму;
- постійні магніти – у сучасних малопотужних і високоточних двигунах.

Ротор двигуна складається з:

- якорного осердя – циліндр із шихтованої електротехнічної сталі,
- обмотки якоря – провідників, розташованих у пазах ротора,
- колектора – набору мідних пластин, з’єднаних з обмоткою.

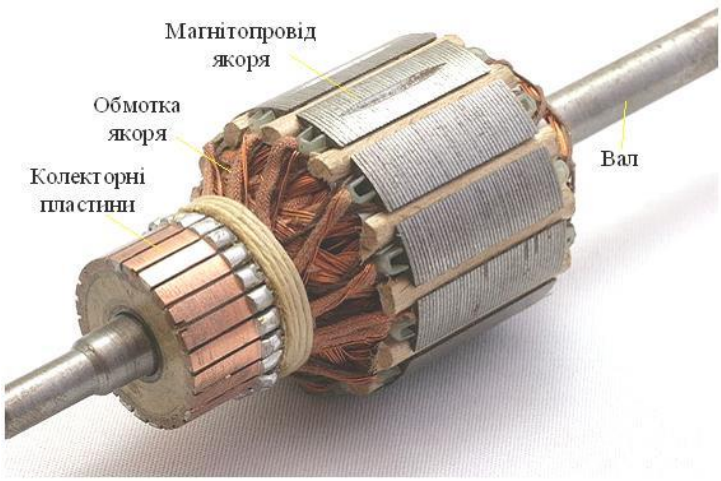


Рисунок 1.2- Якір двигуна постійного струму [3]

Колектор – це циліндр із мідних пластин, ізольованих одна від одної, до яких приєднані кінці секцій обмотки якоря. Щітки, виготовлені з графітових або міднографітових матеріалів, ковзають по колектору й забезпечують:

- підведення струму до обмотки якоря,

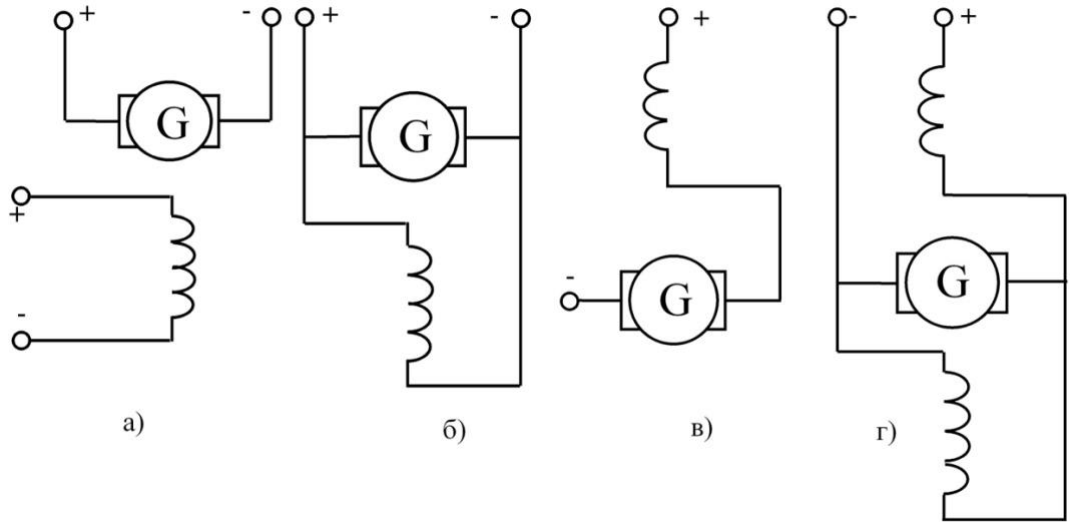
- комутацію, тобто зміну напряму струму в провідниках під час обертання ротора.

Недоліком є механічний знос щіток і іскріння на колекторі, особливо при високих навантаженнях [4].

1.2 Види обмоток збудження

Збудження двигуна постійного струму – це спосіб створення основного магнітного потоку.

1. Двигун постійного струму з незалежним збудженням – двигун, обмотка збудження якого живиться від сторонніх джерел постійного струму (рис. 1.3,а).



а – незалежне збудження, б – паралельне, в – послідовне, г – змішане

Рисунок 1.3 - Способи збудження генератора постійного струму [5]

2. Двигун із паралельним (шунтовим) збудженням (рис.1.3, б)

- Обмотка збудження підключена паралельно до обмотки якоря.
- Швидкість обертання практично не змінюється при зміні навантаження.
- Використовується у верстатах, вентиляторах.

3. Двигун із послідовним збудженням (рис.1.3, б)

- Обмотка збудження підключена послідовно з обмоткою якоря.
- Має великий пусковий момент, але швидкість залежить від навантаження.
- Використовується у кранах, ліфтах, транспорті.

4. Двигун із змішаним збудженням

- Поєднання паралельного і послідовного збудження.
- Має властивості обох типів: стабільна швидкість і достатній пусковий момент.
- Застосовується у відповідальних механізмах.

1.3 Робочі харатеристики двигуна постійного струму

Для практичного використання двигуна постійного струму важливо знати, як змінюються його параметри при різних умовах роботи. Основними характеристиками вважають залежності між електричними та механічними величинами: швидкістю обертання, струмом, моментом і напругою.

При роботі ДПС виконується рівняння електричної рівноваги:

$$U = E + I_a R_a,$$

де [6]:

- U – напруга, підведена до якоря;
- E – ЕРС якоря;

- I_a – струм якоря;
- R_a– опір обмотки якоря.

ЕРС якоря визначається за формулою:

$$E = C_e \cdot \Phi \cdot n,$$

де:

- C_e – конструктивний коефіцієнт,
- Ф– магнітний потік,
- n – частота обертання (об/с).

Крутний момент двигуна:

$$M = C_m \cdot \Phi \cdot I_a,$$

де C_m – конструктивний коефіцієнт моменту.

Ці рівняння показують, що швидкість обертання і момент двигуна залежать від струму якоря та магнітного потоку.

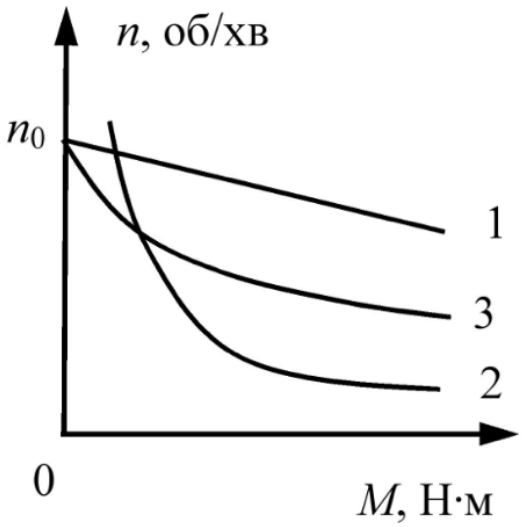
Механічною характеристикою називають залежність швидкості обертання ротора n від моменту навантаження M[7]:

$$n = f(M).$$

Для двигуна з паралельним (шунтовим) збудженням характеристика майже горизонтальна – швидкість мало залежить від навантаження. Це робить його придатним для приводів, де важлива сталість обертів.

Для двигуна з послідовним збудженням характеристика крута: при зростанні навантаження швидкість різко зменшується. Це дозволяє отримати великий пусковий момент, але робота без навантаження небезпечна (може відбутися “розгін”).

Для двигуна зі змішаним збудженням характеристика проміжна.



з незалежним або паралельним збудженням (крива 1), послідовним збудженням (крива 2) та змішаним збудженням (крива 3)

Рисунок 1.4- Зразковий вид механічних характеристик для двигунів постійного струму [8]

Електромеханічна характеристика - це залежність між частотою обертання n і струмом якоря I_a [9]:

$$n = f(I_a).$$

- При малих струмах швидкість близька до номінальної.
- При збільшенні струму (тобто навантаження) швидкість знижується.
- Крутість характеристики залежить від типу збудження.

Характеристика моменту

З рівнян $M = C_m \cdot \Phi \cdot I_a,$ прямо пропорційний струму якоря.

- Для двигуна з паралельним збудженням момент зростає лінійно зі струмом.

- Для двигуна з послідовним збудженням магнітний потік також зростає зі струмом, тому момент росте пропорційно квадрату струму при малих навантаженнях. Це забезпечує високий пусковий момент.

Пускові властивості

Двигуни постійного струму мають високий пусковий момент, проте при включенні їх до мережі без обмеження струму через низький опір обмотки якоря може пройти надмірний струм. Тому застосовуються пускові реостати або електронні системи плавного пуску.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна визначається співвідношенням [10]:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%,$$

де:

- P_2 – корисна механічна потужність на валу,
- P_1 – електрична потужність, спожита двигуном.

Втрати енергії у двигуні поділяються на:

- електричні (у міді обмоток якоря та збудження),
- магнітні (у сталі статора та ротора),
- механічні (тертя в підшипниках, вентиляційні втрати).

1.4 Керування двигуном

1.4.1 Класичні методи керування

- Регулювання швидкості зміною напруги якоря

З рівнян $n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$ швидкість двигуна прямо пропорційна прикладеній напрузі.

У класичних схемах регулювання напруги здійснювали за допомогою реостатів**,** підключених послідовно з якорем. Це було просто, але мало недолік: значні втрати енергії на нагрівання резисторів.

- Регулювання швидкості зміною магнітного потоку (реостат у колі збудження)

Магнітний потік створюється обмоткою збудження. Якщо в коло цієї обмотки включити регулювальний реостат, то струм збудження можна зменшити → зменшиться магнітний потік → збільшиться швидкість [11]:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}.$$

Цей метод використовують для підвищення швидкості понад номінальну**.** Недолік: момент двигуна при цьому зменшується, тому такий спосіб застосовують у приводах без великих навантажень.

- Регулювання моменту і пуск двигуна (реостат у колі якоря)

При пуску двигуна обмотка якоря має малий опір → виникає великий пусковий струм, небезпечний для обмоток і колектора. Щоб обмежити цей струм, у коло якоря включають пусковий реостат**.**

- На початку пуску опір великий → струм обмежується.
- У міру розгону двигуна опір поступово виводиться з кола.

Такий самий принцип застосовують і для регулювання моменту під час роботи.

Недолік: великі енергетичні втрати.

- Реверсування двигуна

Зміна напрямку обертання двигуна постійного струму можлива двома способами:

1. Зміною полярності напруги на обмотці якоря.
2. Зміною напрямку струму в обмотці збудження.

Але змінювати обидва напрямки одночасно не можна, інакше ротор продовжить обертатися в той самий бік. Класичні схеми реверсу будувалися на контакторах або перемикачах, які міняли полярність підключення.

- Гальмування двигуна

Існує кілька класичних способів гальмування:

Динамічне гальмування – після відключення від мережі якоря двигуна підключають до реостату. Якір працює як генератор, енергія розсіюється на опорі.

Рекуперативне гальмування – при зменшенні швидкості ЕРС стає більшою за прикладену напругу, і двигун починає віддавати енергію назад у мережу.

Протипуск (гальмування противключенням) – змінюють полярність напруги на якорі, і двигун створює момент, протилежний руху. Використовується рідко через великі струми [6].

1.4.2 Сучасні системи керування

У 1960–70-х роках із розвитком силової напівпровідникової техніки з’явилися тиристорні перетворювачі, які замінили неекономні реостати. Вони дозволили плавно змінювати напругу на якорі двигуна за рахунок фазового керування випрямленим струмом.

Тиристор — це керований напівпровідниковий прилад, який може пропускати великий струм після подачі імпульсу на керуючий електрод. Завдяки цьому він використовується як електронний “вимикач”, який дуже швидко реагує на команди системи керування.

Схема роботи такої системи:

- Джерелом живлення є мережа змінного струму.
- Через випрямляч на тиристорах струм перетворюється на постійний.

- Кут відкривання тиристорів регулюється керуючою системою, що дозволяє змінювати середню напругу на якорі двигуна.

Таким чином, швидкість двигуна регулюється плавно, без великих втрат енергії.

До переваг такої системи керування можна віднести [12]:

- Високий ККД, оскільки енергія не витрачається на нагрівання реостатів.
- Компактність порівняно з класичними схемами.
- Можливість дистанційного та автоматичного керування.
- Зручна реалізація реверсу (зміна полярності випрямленої напруги).
- Можливість роботи у складі систем автоматичного регулювання**.**

Недоліки такої системи:

- Наявність пульсацій напруги після випрямлення → це може викликати додаткові втрати й вібрації.
- Потреба у фільтрах і згладжувальних реакторах.
- Складніша схема захисту від коротких замикань.

Після тиристорів почали широко застосовувати біполярні та польові транзистори (особливо IGBT – транзистори з ізольованим затвором). На відміну від тиристорів, які можуть лише вмикатись і вимикатись у певні моменти напівперіоду мережі, транзистори дозволяють працювати з високочастотними імпульсами, що відкрило шлях до імпульсно-широтно модульованого (ШІМ) керування**.**

Принцип роботи такої системи керування [13]:

- Джерелом живлення є постійна напруга (наприклад, від випрямляча або акумулятора).
- Транзистори працюють у ключовому режимі – вони швидко вмикаються та вимикаються з частотою десятки кілогерц.
- За допомогою ШІМ регулюється середня подана напруга на якорі двигуна.

Це дозволяє:

- плавно змінювати швидкість у широкому діапазоні,
- отримувати високий ККД,
- мінімізувати втрати енергії.

Переваги транзисторних систем:

- Висока енергоефективність (ККД до 95%).
- Малі габарити і маса силових блоків порівняно з тиристорними.
- Точне регулювання швидкості та моменту завдяки високій частоті комутації.
- Можливість реалізації автоматизованих систем приводу з датчиками струму, швидкості та положення.
- Простота реалізації динамічного гальмування та реверсу.
- Менші електромагнітні перешкоди при правильному застосуванні фільтрів.

З появою потужних мікропроцесорів та мікроконтролерів керування електроприводами перейшло на якісно новий рівень. Якщо тиристорні та транзисторні системи регулювали лише напругу і струм, то мікропроцесорні системи дозволяють реалізувати адаптивне, інтелектуальне керування**.**

Такі системи складаються з:

- мікроконтролера / DSP-процесора (цифрового сигнального процесора),
- силових ключів (IGBT, MOSFET),
- датчиків струму, швидкості та положення,
- програмного забезпечення, що реалізує алгоритми керування.

Принцип роботи такої системи [14]:

- Сигнали від датчиків (струму, напруги, швидкості, положення ротора) надходять до мікроконтролера.
- Мікропроцесор у реальному часі розраховує оптимальні параметри ШІМ.
- Силові транзистори формують імпульси живлення двигуна.

- Таким чином забезпечується замкнена система керування, яка реагує на зміни навантаження практично миттєво.

До переваг мікропроцесорних систем можна віднести:

- Висока точність регулювання швидкості (похибка < 1%).
- Широкий діапазон керування – від дуже малих швидкостей до значного перевищення номінальної.
- Енергоефективність – оптимізація режимів роботи, зменшення втрат.
- Гнучкість – параметри легко змінюються програмно без перебудови апаратної частини.
- Інтелектуальні функції – самодіагностика, прогноз технічного стану, підключення до мереж (індустрія 4.0).

Тож мета кваліфікаційної роботи - дослідження сучасних систем керування двигуном постійного струму та розробка системи автоматичного керування на базі мікроконтролера.

Для досягнення поставленої мети необхідно було виконати наступні завдання:

-провести аналіз систем керування двигунами постійного струму;

-розробити структурну схему системи автоматичного керування;

- розробити та розрахувати блок імпульсно-фазового керування;

- розробити та розрахувати блок автоматичного керування;

- розробити схему електричну принципову та топологію друкованої плати системи автоматичного керування.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА AVR

2.1 Структурна схема електронно-перетворюючої системи керування двигуном постійного струму

Електронно-перетворююча система керування двигуном постійного струму (ДПС) — це система, яка використовує електронні компоненти для регулювання роботи ДПС, трансформуючи вихідну потужність (наприклад, від змінного струму до постійного) та керуючи швидкістю обертання, напрямком та іншими параметрами роботи двигуна. Такі системи забезпечують точне та ефективне керування, що використовується в автоматиці, промисловості та транспорті.

Електронно-перетворююча система складається з таких основних блоків (рис.2.1) [15]:

1. Джерело живлення
    - Забезпечує постійну напругу (DC) для роботи системи.
    - Може бути батарея, акумулятор або випрямлена змінна мережна напруга.
2. Перетворювач напруги/струму
    - Найчастіше використовується DC–DC перетворювач (для зміни рівня напруги) або інвертор для регулювання струму.
    - Забезпечує плавне або ступінчасте регулювання напруги на якорі двигуна.
3. Система керування (контролер)
    - Виконує алгоритми регулювання швидкості та моменту.

- Може бути аналоговою (операційні підсилювачі, транзисторні схеми) або цифровою (мікроконтролер, DSP).
- Реалізує різні методи керування, наприклад:
  - ШІМ (широтно-імпульсна модуляція) для плавного регулювання напруги;
  - Пропорційно-інтегральне-регуляторне (ПІД) управління для стабілізації швидкості.

4. Датчики та зворотний зв’язок
   - Датчик швидкості (енкодер або тахогенератор) контролює обертання ротора.
   - Датчики струму захищають систему від перевантажень.

Інформація зі зворотного зв’язку надходить у контролер для корекції сигналів керування. Контролер отримує сигнал команди на швидкість або момент. На основі зворотного зв’язку контролер формує керуючий сигнал для перетворювача. Перетворювач регулює напругу та струм на якорі ДПС. Двигун реагує зміною швидкості або моменту, контролер коригує сигнал для підтримки заданого режиму.

До переваг такої системи можна віднести:

- Висока точність регулювання швидкості та моменту.
- Можливість програмного керування та інтеграції з автоматизованими системами.
- Зменшення механічного зносу та підвищення ефективності.
- Реалізація різних режимів роботи: швидкісного, пускового, гальмівного.

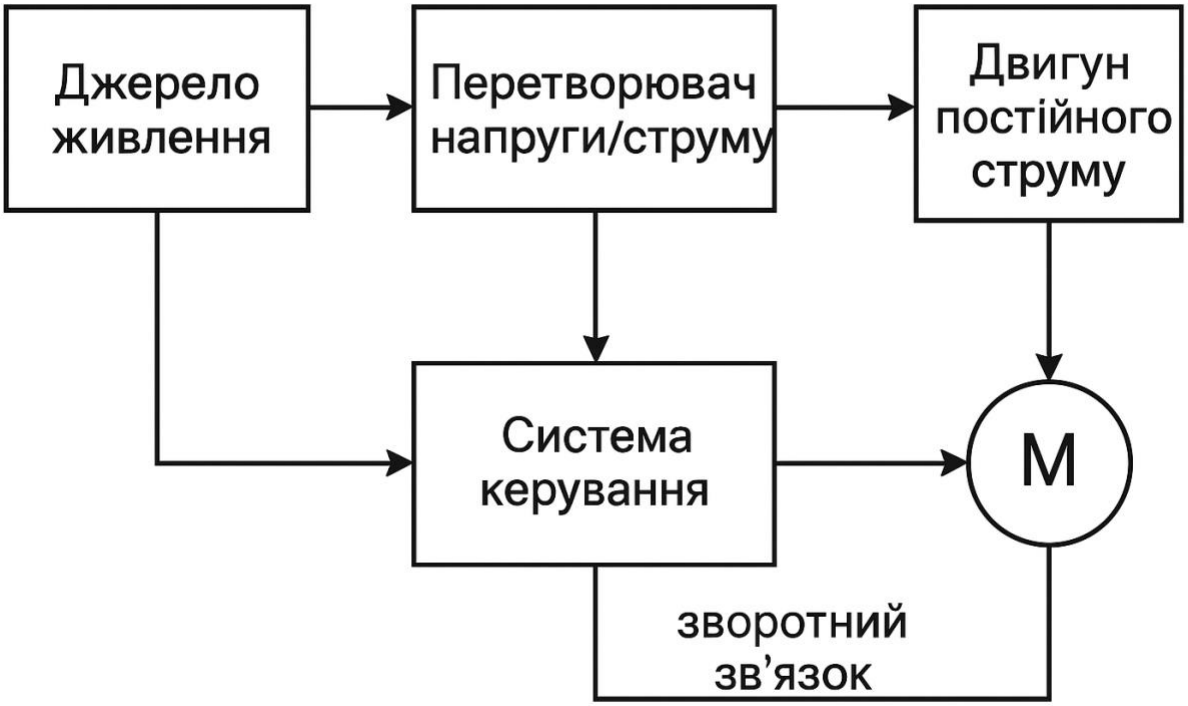


Рисунок 2.1- Структурна схема електронно-перетворюючої системи керування ДПС

2.2 Розробка системи керування

До складу запропонованої системи керування входять: блок імпульсно-фазового керування (надалі БІФК), що призначений для формування керуючих імпульсів, які синхронно, відповідно до фаз мережі живлення, вмикають тиристори; блок автоматичного регулювання (БАР), що забезпечує плавне регулювання параметрів напруги завдання та зворотного зв'язку.

2.2.1 Розробка блоку імпульсно-фазового керування (БІФК)

БІФК реалізовано на базі мікроконтролера фірми AVR сімейства ATmega64 – 16Aw, що виконуватиме порівняння напруги від блоку автоматичного керування з пилкоподібною напругою, що формуватиметься за допомогою таймер-лічильника та формуватиме керуючі імпульси (рис.2.2).

Блок живлення забезпечує систему керування (СК) стабілізованою напругою +5 В, +15 В, -15 В, +24 В, -24 В. Уразі необхідності з трьох фаз, що йдуть на блок живлення, можливе заведення фаз для синхронізації формування керуючих імпульсів.

Мікроконтролер ATmega64 [16]— це мікросхема, яка інтегрує в собі центральний процесор, пам'ять (флеш-пам'ять для програм, ОЗП для даних) та периферійні пристрої (таймери, АЦП, комунікаційні інтерфейси) на одному кристалі. Базується на популярній та потужній архітектурі AVR, що забезпечує високу продуктивність та низьке енергоспоживання. Містить процесорне ядро, флеш-пам'ять для зберігання коду програми, статичну пам'ять (SRAM) для змінних даних, та ряд периферійних модулів, таких як АЦП (аналого-цифровий перетворювач), таймери/лічильники, UART, SPI, TWI (I2C) для зв'язку з іншими пристроями. ATmega64 використовується в широкому спектрі додатків, де потрібна інтелектуальна обробка даних, керування пристроями та збір інформації, наприклад, у промисловій автоматизації, системах контролю, побутовій електроніці та робототехніці.

Параметри мікроконтролера наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 –Основні параметри мікроконтролера ATmega64 – 16Aw

Параметри		Граничні значення
Робоча температура, ^{0}C		-55…+125
Напруга на виводах (окрім RESET) відносно виводу GND, В		-1,0…V_{cc} + 0,5
Напруга на виводі RESET відносно виводу GND, В		-1,0…+13
Напруга живлення V_{cc}, В		4,5…6,0
Максимальний струм каналу ввід/вивід, мА		60
Максимальний струм виводів V_{cc} та GND, мА		200
Робоча частота, МГц		0…16
Пам'ять програм (FLASH), Кбайт		64
Пам'ять EEPROM, байт		2К
Пам'ять SRAM, байт		4К
Кількість команд		130
Кількість ліній вводу/виводу		53
Кількість джерел внутрішніх переривань		26
Кількість джерел зовнішніх переривань		8
Таймери	8 – розрядний	2
	16 – розрядний	2
Широтно-імпульсний модулятор		6+2
Аналогово-цифровий перетворювач 10 – розрядний (каналів)		8/(7+2)
Вбудований RC - генератор		є

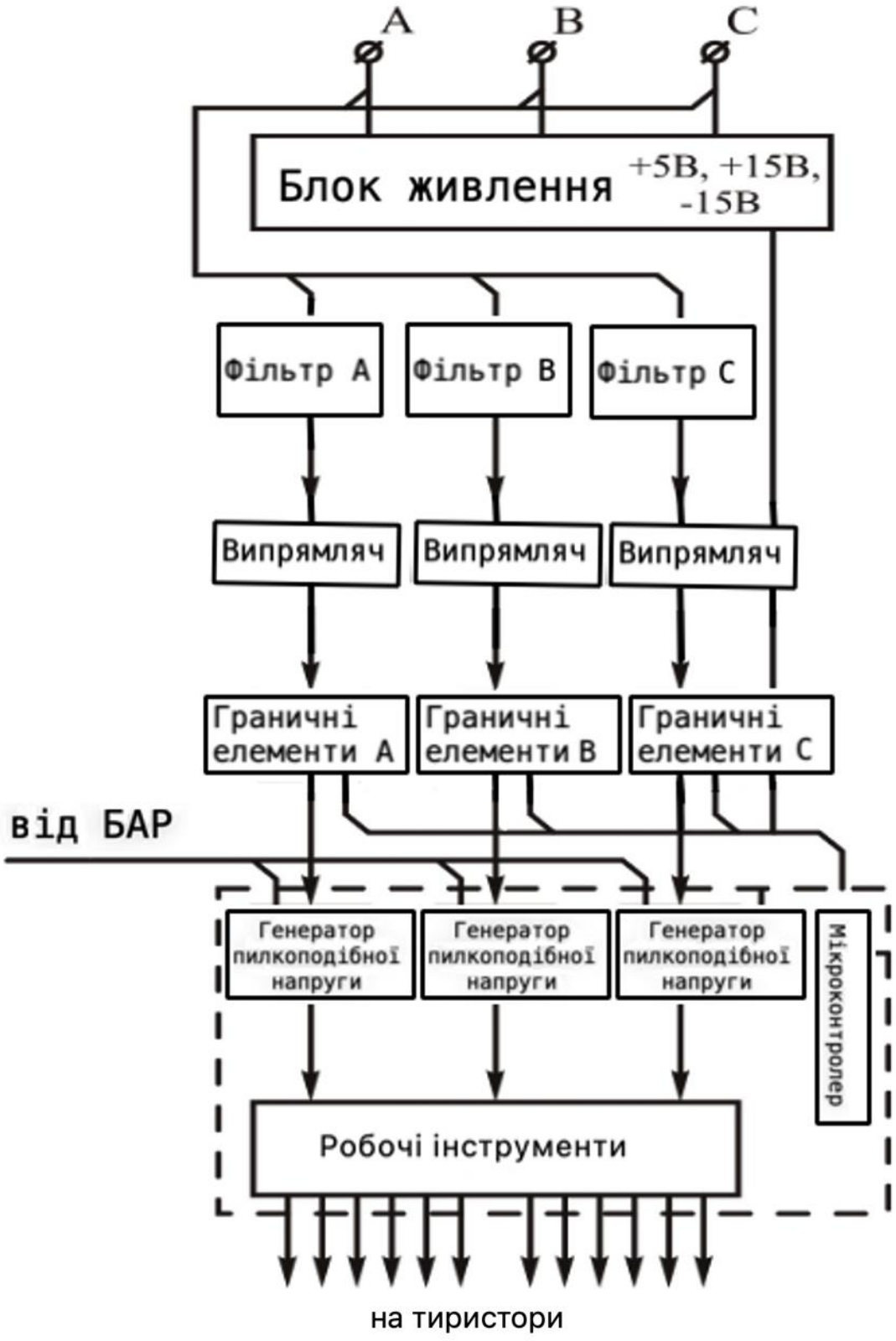


Рисунок 2.2 – Структурна схема блоку імпульсно-фазового керування

2.2.2 Розрахунок та моделювання фільтру

Фільтрів побудований на резисторах та конденсаторі, що забезпечують зміщення синусоїди синхронізуючої напруги на кут 30 електричних градуси. До складу фільтра входить подільник напруги на резисторах R1 та R3. Затримка на 30 електричних градуси відбувається завдяки заряду конденсатора C1. Схема електрична принципова фільтра наведена на рисунок 2.3.

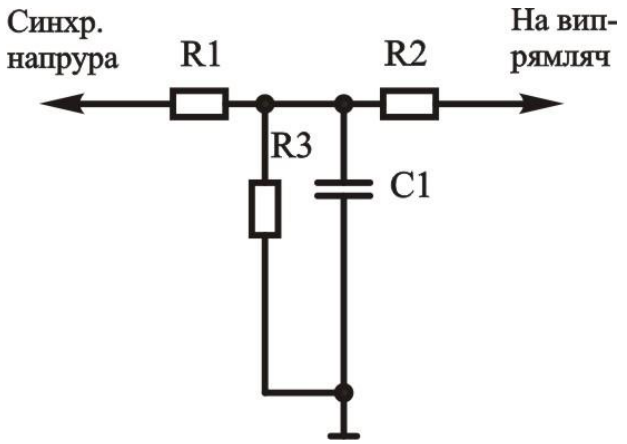


Рисунок 2.3 – Схема електрична принципова фільтра

Розрахуємо подільник напруги на резисторах R_1 та R_3, що входить до схеми фільтра (2.1).

$$U_{вих} = \frac{U_{вх} \cdot R_3}{R_1 + R_3}, \tag{2.1}$$

де $U_{вих}$ – вихідна напруга подільника, В;

$U_{вх}$ – вхідна напруга подільника, В;

Розрахунок проводимо для максимальної напруги синхронізації, що може бути подана на схему $U_{вх}$ = 127 (В). Задаємо розмір резистора R_3 = 20 (кОм). Розмір напруги з урахуванням зміщення нуля на граничному елементі та зменшені напруги обираємо п’ять, шість вольт. За таких умов знаходимо значення опору резистора R_1 (2.2).

$$R_1 = \frac{U_{вх} \cdot R_3}{U_{вих}} - R_3 , \tag{2.2}$$

$$R_1 = \frac{127 \cdot 20000}{5} - 20000 = 508000(Ом)$$

Обираємо резистор R_1 МЛТ-0,125-510к ±10%

Схема фільтра збудована на конденсаторі C_1 та резисторі R_2 (2.3).

$$\tau_{30} = R_3 \cdot C_1 , \tag{2.3}$$

де τ_{30} – постійна часу схеми фільтра, що визначає тривалість у 30 електричних градуси, с.

Постійна часу визначається за формулою (2.4).

$$\tau_{180} = \frac{1}{2 \cdot f_м} , \tag{2.4}$$

де τ_{180} – постійна часу, що визначає тривалість у 180 електричних градуси,с

$f_м$ – частота мережі живлення, Гц.

$$\tau_{180} = \frac{1}{2 \cdot 50} = 0{,}01(c)$$

Постійна τ_{180}, це тривалість проходження однієї напівхвилі синхронізуючої напруги тривалість якої 180 електричних градуси.

Постійна часу τ_{30} схеми фільтра, що визначає тривалість у 30 електричних градуси визначається за формулою (2.5).

$$\tau_{30} = \frac{30 \cdot \tau_{180}}{180}, \tag{2.5}$$

$$\tau_{30} = \frac{30 \cdot 0{,}01}{180} = 0{,}0017(c)$$

Обираємо резистор R_2 МЛТ-0,125-20к ±10% [17].

З рівняння (2.3) знаходимо конденсатор C_1.

$$C_1 = \frac{\tau_{30}}{R_2} = \frac{0{,}0017}{20000} = 85 \cdot 10^{-9}(Ф)$$

Обираємо конденсатор C_1 91 нФ

2.2.3 Розрахунок та моделювання граничних елементів

Граничні елементи збудовані на операційних підсилювачах, що працюють як компаратори, до інвертуючих входів яких під'єднані ланцюги зміщення нуля. Напруга, що надходить від випрямлячей на компаратори зміщується за допомогою ланцюга зміщення нуля та формує прямокутну напругу тривалістю 176 електричних градуси. Тривалість імпульсів визначає зону, що дозволяє формування керуючих імпульсів відповідно для тиристорів анодної і катодної груп. Тривалість імпульсів у 176 електричних градуси виключає одночасне формування керуючих імпульсів у двох протифазних тиристорах випрямляючого моста. Схема електрична принципова граничного елемента наведена на рисунку 2.4. Діаграми роботи граничного елемента наведені на рисунку 2.5.

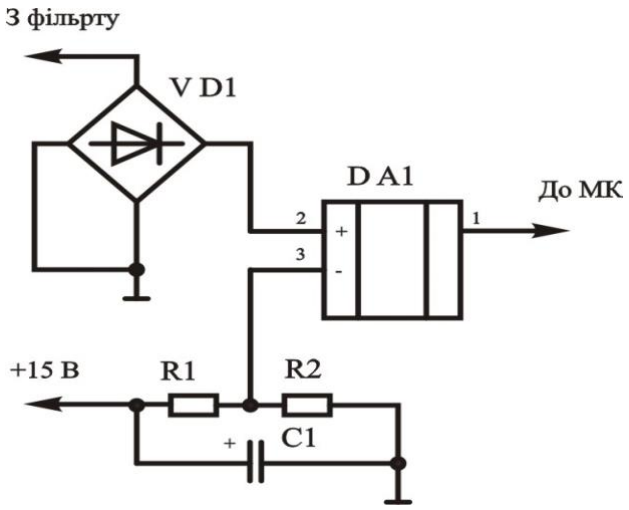


Рисунок 2.4 – Схема електрична принципова граничного елемента

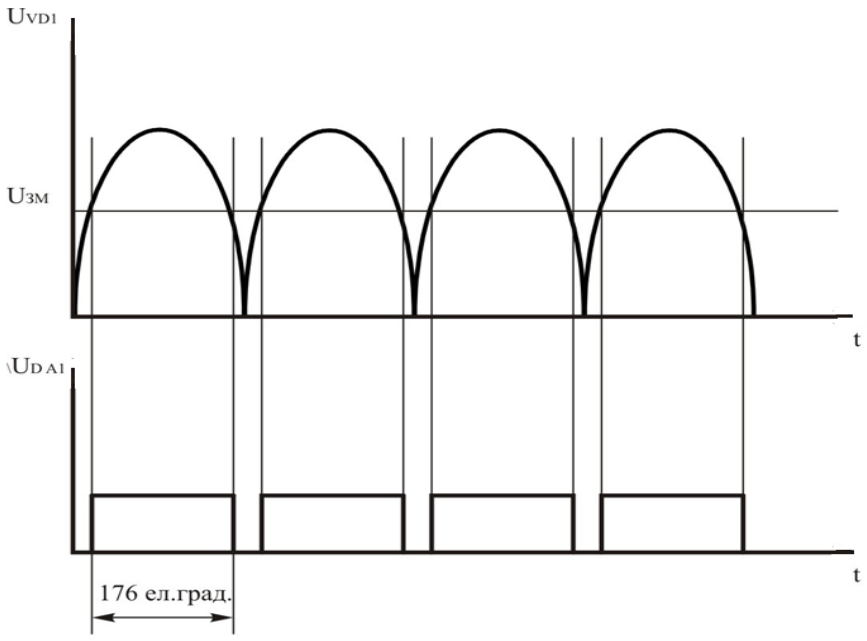


Рисунок 2.5 – Часові діаграми роботи граничного елемента

З урахуванням вимог до формування прямокутних імпульсів тривалістю 176 електричних градуси у схемі граничного елемента передбачена схема зміщення нуля, побудована на основі подільника напруги розрахунок якої здійснюється за формулою (2.1).

Задаємося значенням резистора R_1, що зображено на рисунку 2.4 24 (кОм). Щоб забезпечити формування імпульсу тривалістю 176 ел. град. нуль зміщуємо відповідно на 0,11 Вольта. Тобто $U_{вих} = 0,11$ (В), а $U_{вх} = 15$ (В).

Визначаємо R_2 за формулою (2.26).

$$R_2 = \frac{U_{вих} \cdot R_1}{U_{вх} - U_{вх}}, \tag{2.6}$$

$$R_2 = \frac{0,11 \cdot 10000}{15 - 0,11} = 73,875(Ом)$$

Обираємо резистор R_2 МЛТ-0,125-75 Ом ±10% [17]

Конденсатор C_1 обираємо з міркувань зменшення пульсацій у напрузі 15 В, К53 – 16 100мк на 25 В.

В якості двополуперіодного випрямляча використовуємо діодний міст типу КД906А.

2.2.4 Розрахунок та моделювання схема вимірювання напруги на якорі двигуна

До системи імпульсно-фазового керування входить схема електрична принципова вимірювання напруги на якорі двигуна (рисунок 2.6.).

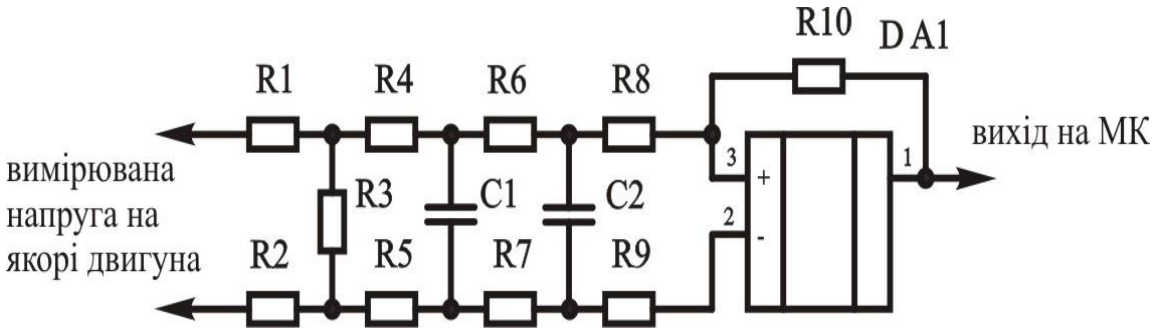


Рисунок 2.6 – Схема електрична принципова вимірювача напруги якоря

Схема призначена для вимірювання наявності напруги на якорі двигуна та видачі напруги на мікроконтролер який у свою чергу виробляє сигнал заборони переключення груп вентилів, що запобігає короткому замиканню.

Напруга, що надходить від двигуна поділяється на резисторах R1, R2, R3 та зменшується резисторами R4, R6, R8 та R5, R7, R9 відповідно по резистора зворотного зв’язку R10.

Розрахунок схеми проводимо на основі формули 2.1, оскільки резистори R_1, R_2, R_3 утворюють подільник напруги. Приймаємо резистори R_1 та R_2 опором у 300 (кОм), вихідну напругу з подільника приймаємо 30 (В). Виходячи з цих параметрів знаходимо R_3 за формулою (2.7).

$$R_3 = \frac{30 \cdot 300000}{120 - 30} = 100(кОм)$$

Обираємо резистор R_3 типу МЛТ-0,125-100 кОм.

Резистори R_1 та R_2 типу МЛТ-0,125-300 кОм.

Оскільки на резисторах розсіюється достатньо велика потужність, а з розташуванням їх на печатній платі доцільніше застосувати послідовно з'єднані резистори меншої потужності.

Вихідна напруга з операційного підсилювача повинна дорівнювати п'яти вольтам за надходження максимальної напруги з якоря двигуна. Приймаємо резистор R_{10} розміром 10 (кОм). З урахування цих вимог коефіцієнт посилення повинен дорівнювати: $k_п = 0,167$

Вхідний опір $R_{вх}$ на операційний подільник знаходимо за формулою (2.8).

$$R_{вх} = \frac{R_{зв}}{k_п}, \qquad (2.8)$$

$$R_{вх} = \frac{10000}{0,167} = 59880(Ом)$$

Обираємо резистори R4, R6, R8 та R5, R7, R9 типу МЛТ-0,125 20 кОм

2.2.5 Розрахунок та моделювання схеми випрямляча

У відповідності до вимог, що є необхідними для правильної роботи мікроконтролера, параметрів з таблиці 2.1 необхідно використати схему перетворення напруги в однополярну або схема випрямлення. Схема принципіальна наведена на рисунок 2.7.

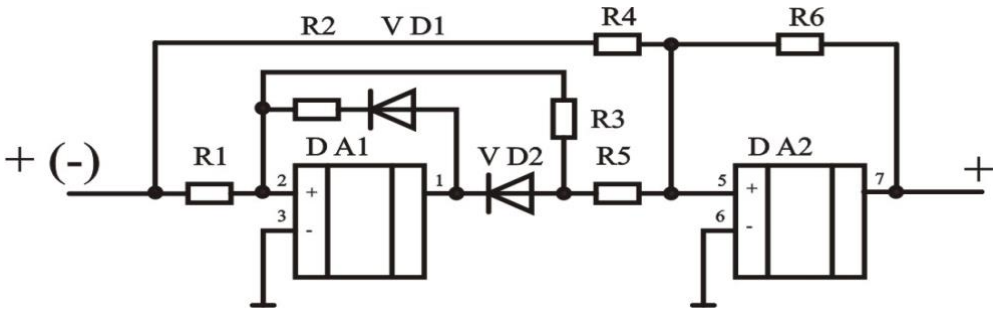


Рисунок 2.9– Схема електрична принципова однополярного перетворювача напруги

Схема побудована на двох операційних підсилювачах DA1 та DA2. Розглянемо роботу схеми за умов надходження на неї негативної і позитивної напруги.

При надходженні негативного сигналу з керуючого пристрою напруга надходить до входу операційного підсилювача DA2 через ланцюг резистора R_4, негативна напруга, що надходить до мікросхеми DA1 інвертується, але діод VD2 не дозволяє проходженню цього сигналу далі. Тому в роботі з негативною напругою працює перший вище згадані ланцюг. Зворотній резистор R_6 операційного підсилювача DA2 обирається таким чином, щоб коефіцієнт підсилення сигналу від R_4 дорівнював одиниці. Це дозволяє операційному підсилювачу працювати лише з напругою від резистора R_4. На DA2 напруга інвертується й ми отримуємо напругу позитивної полярності пропорційну до вхідної.

За надходження напруги з позитивною полярністю на схеми випрямлення до DA2 сигнал надходить через ланцюг резистора R_4 та через операційний підсилювач DA1 на якому вона інвертується і через резистор R_5 надходить до DA2. Резистор R_5 обирається таким, щоб коефіцієнт підсилення в відповідності до R_6 дорівнював двом. Як було віще зазначено коефіцієнт підсилення в співвідношенні R_6 до R_4 дорівнює одиниці. Це дозволяє DA2 працюючи як суматор, скласти напругу, що надходить до нього від R_4 та R_5 завдяки чому отримуємо таку ж саму напругу, що й на вході, але потрібної полярності.

Схема випрямлення повинна забезпечувати той же самий розмір напруги, що й на вході, тому резистори R_2 та R_3 повинні дорівнювати R_1, це дозволяє операційному підсилювачу DA1 працювати як інвертуючий повторювач, резистори R_4, R_5, R_6 обираються у відповідності до вищезгаданих умов. Для забезпечення правильної роботи схеми випрямлення, повинна забезпечуватись висока точність напруг, що надходять на операційні підсилювачі, тому резистори, що встановлюються у схемі повинні мати малу похибку.

Для посилення керуючих імпульсів від мікроконтролера застосовуються підсилювачі ULN2003A (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Параметри підсилювача [18]

Напруга живлення, В	Струм входу, мА	Напруга входу, В	Струм виходу, В	Напруга виходу, В	Температурні параметри, ^{0}C
30	350	3	1,35	30	- 40…+85

Задаємося опором резистора R_1 22,1 (кОм), отже $R_2 = R_3 = 22,1$ (кОм). Опір резистора R_6 обираємо 44,2 (кОм), отже опір R_4 дорівнюватиме 44,2 (кОм). Опір резистора R_5 дорівнює 22,1 (кОм), щоб виконувались задані технічні умови.

Максимальні струми в схемі випрямлення, та й у загалі всієї схеми системи автоматичного керування не перевищуватимуть вихідних струмів операційних підсилювачів, а напруги не перевищуватимуть напруги живлення мікросхем. Максимальна потужність, що розсіюватимуть резистори схеми не перевищуватиме значення 0,125 (Вт).

Виходячи з цих параметрів обираємо до встановлення резистори типу С2-23 ± 1% номіналами 22,1 (кОм) та 44,2 (кОм).

Діоди VD1 та VD2 встановлюємо КД522Б.

DA1 та DA2 виконуємо на базі зчетвереного операційного підсилювача LM348J. Параметри операційного підсилювача наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Параметри операційного підсилювача LM348J

Напруга живлення, $U_{нж}$, В	Вхідний струм, $I_{вх}$, нА	Коефіцієнт посилення, $K_п$	Вхідний опір, $R_{вх}$, Ом	Струм споживання, $I_{сп}$, мА
± 18	≤ 200	≥ 25 10^3	≥ 0,8 10^6	≤ 4,5

2.3 Розробка та розрахунок блоку автоматичного керування

Для забезпечення потрібного режиму роботи, постійної підтримки заданих обертів двигуна та зменшення пускового струму, застосовується блок автоматичного регулювання (бАР). З розвитком мікроконтролерних технологій є доцільним побудова цього блоку на базі мікроконтролера, що за допомогою математичних рахувань буде здійснювати потрібне регулювання аналогічне до систем побудованих на основі аналогових елементів.

За основу для побудови математичної моделі використовуємо двоконтурну систему автоматичного регулювання з контуром швидкості та контуром струму. Для забезпечення більш жорсткішого регулювання, зменшення перерегулювання, внутрішній і зовнішній контури організуємо за схемою пропорційно-інтегрально-диференційного (ПІД) регулятору. ПІД – регулятор вимірює відхилення величини, що стабілізується, від заданого значення (уставки) і видає керуючий сигнал, що є сумою трьох складових, перше з яких пропорційне цьому відхиленню, друге пропорційне інтегралу відхилення та третє пропорційне похідній відхилення (або, що є теж саме, похідної вимірюваної величини) [17].

Пропорційна складова усуває безпосередньо помилку в значенні величини, що стабілізується, яка спостерігається в цей момент часу. Вихідний сигнал пропорційної складової тим більше, чим сильніше регульована величина відхиляється від уставки. Якщо вхідний сигнал дорівнює уставці, то вихідний дорівнює нулю.

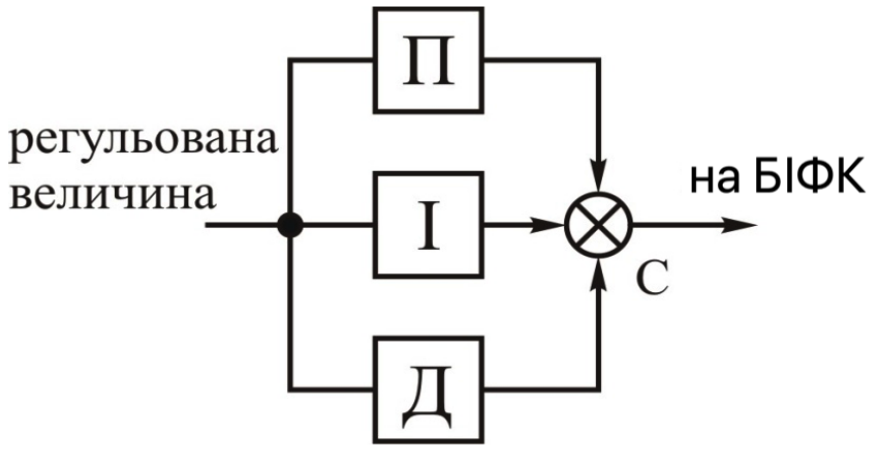
При використанні пропорційного регулятора, значення регульованої величини ніколи не стабілізується на заданому значенні. Існує, так звана, статична помилка, що дорівнює такому відхиленню регульованої величини, що забезпечує вихідний сигнал, що стабілізує вихідну величину саме на цьому значенні.

Чим більше коефіцієнт пропорційності між вхідним і вихідним сигналом (коефіцієнт підсилення), тим менше статична помилка, однак при занадто великому коефіцієнті підсилення можуть початися автоколивання [18].

Для усунення статичної помилки використають інтегральну складову. Вона дозволяє регулятору "вчитися" на попередньому досвіді. Якщо система не зазнає зовнішніх збурень, то через якийсь час регульована величина стабілізується на заданому значенні, сигнал пропорційної складової буде

дорівнювати нулю, а вихідний сигнал буде повністю забезпечувати інтегральна складова [16].

Диференціальна складова протидіє відхиленням, що їх припускають регульовані величини, які можуть відбутися в майбутньому. Ці відхилення можуть бути викликані зовнішніми збуреннями або запізнюванням впливу регулятора на систему. Чим швидше регульована величина відхиляється від уставки, тим сильніше протидія, що створюється диференційною складовою. Структурна схема ПІД – регулятора приведена на рисунку 2.10. Схема електрична принципіальна наведена на рисунку 2.11.



П – пропорційна складова ПІД регулятору;

І – пропорційна складова ПІД регулятору;

Д – диференційна складова ПІД регулятору;

С – суматор.

Рисунок 2.10 – Структурна схема ПІД - регулятора

ПІД – регулятор складається з пропорційної, інтегральної та диференційної частин, тому передатну функцію можна представити у виді формули (2.9) та (2.10).

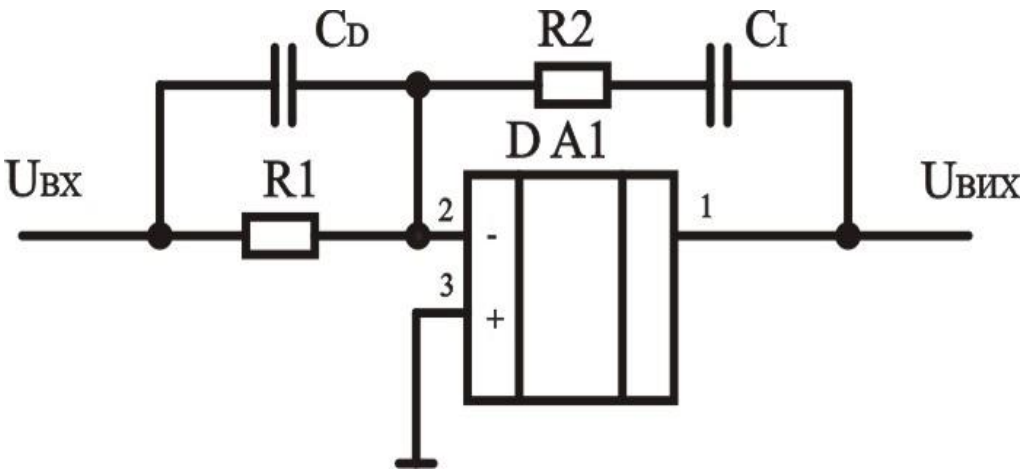


Рисунок 2.11 – Схема електрична принципова ПІД – регулятора

$$W_{ПІД}(p) = W_{П}(p) + W_{І}(p) + W_{Д}(p), \tag{2.9}$$

де $W_{ПІД}(p)$ – передатна функція ПІД – регулятора;

$W_{П}(p)$ – передатна функція П – регулятора;

$W_{І}(p)$ – передатна функція І – регулятора;

$W_{Д}(p)$ – передатна функція Д – регулятора.

$$W_{ПІД}(p) = k_{П} \cdot \frac{T_{І} \cdot T_{Д} \cdot p^2 + T_{І} \cdot p + 1}{T_{І} \cdot p}, \tag{2.10}$$

де $k_{П}$ – коефіцієнт перетворення П – регулятора;

$T_{І}$ – постійна часу І – регулятора, с;

$T_{Д}$ – постійна часу Д – регулятора, с.

Беручи за основу двоконтурну систему автоматичного регулювання з базового приводу, побудовану на основі ПІД – регулятору швидкості та струму, вдосконалюємо її і будуємо на базі мікроконтролеру фірми AVR сімейства ATmega64 –16Aw. Параметри мікроконтролера наведені в таблиці 2.1.

Параметри ПІД-регуляторів, що встановлені на базовому приводі SDC-1 наведені в таблиці 2.4, 2.5.

Таблиця 2.4 – Параметри ПІД-регулятора швидкості

Коефіцієнт пропорційної складової K_p	Коефіцієнт інтегральної складової K_i	Коефіцієнт диференційної складової K_d
17	0,033	0,1689

Таблиця 2.5 – параметри ПІД-регулятора струму

Коефіцієнт пропорційної складової K_p	Коефіцієнт інтегральної складової K_i	Коефіцієнт диференційної складової K_d
1	31	0,00286

Для вирішення побудови ПІД-регулятора на базі мікроконтролера приймаємо формулу (2.11).

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt}, \quad (2.11)$$

де u – величина для підтримки заданого значення x_0;

e – неузгодженість системи;

K_p – коефіцієнт посилення пропорційної складової регулятора;

K_i – коефіцієнт інтегральної пропорційної складової регулятора;

K_d – коефіцієнт диференціальної пропорційної складової регулятора.

Неузгодженість системи визначається за формулою (2.12).

$$e = (x_0 - x), \quad (2.12)$$

2.3.1. Розробка та розрахунок подільника напруги для зворотного зв’язку за швидкістю

Оскільки технічні параметри мікроконтролера не дозволяють підключення безпосередньо до входів контурів зворотного зв’язку за швидкістю, де напруга з тахогенератору може сягати більше 20 В на 1000 обертів, використовуємо у схемі подільники вхідної напруги побудовані на основі операційних підсилювачів з встановленням малого коефіцієнту підсилення за допомогою резисторів [14,15].

Приймаємо, що розмір граничної напруги на вході мікроконтролера не повинен перевищувати п’яти вольт, а отже й напруга керування тому в разі необхідності в тих схемах з’єднання перетворювача з системами числового програмного керування, де напруга на керування приводом є більшою за п’ять вольт є можливість підключення її до подільників напруги на основі резисторів. Відповідно до параметрів наведених у таблиці 2.1 напруга на каналах ввід/вивід повинна бути однополярною, а саме позитивна. використовуємо схему випрямляча.

Схема подільника напруги для зворотного зв’язку за швидкістю будується на операційному підсилювачі з коефіцієнтом підсилення, що можна регулювати за допомогою зміни опору вхідних резисторів. Схема електрична принципова наведена на рисунку 2.12

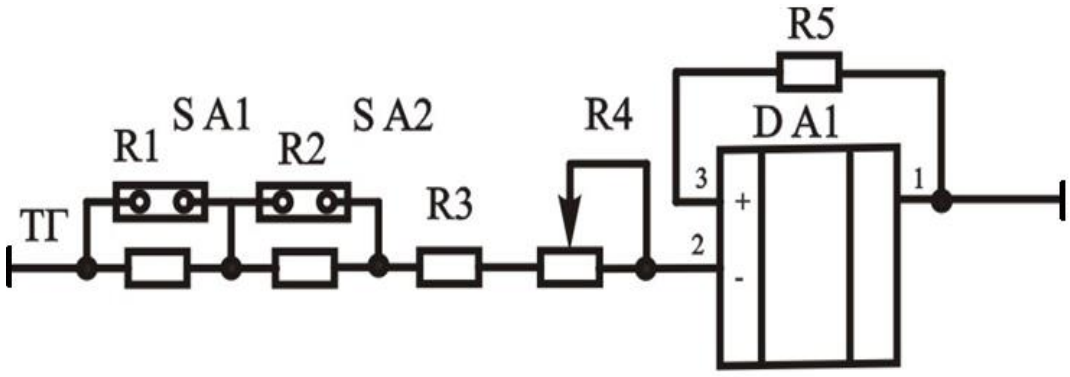


Рисунок 2.12– Схема електрична принципова подільника напруги

Це досягається завдяки введенню у зворотній зв'язок резистору з малим опором відносно опору на вході, так щоб виконувалось рівняння наведене у формулі (2.13).

$$K_n = \frac{R_{зв}}{R_{вх}} = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}, \quad (2.13)$$

де $K_п$ – коефіцієнт підсилення;

$R_{зв}$ – опір ланцюга зворотного зв’язку, Ом;

$R_{вх}$ – опір вхідного ланцюга, Ом.

$U_{вих}$ – вихідна напруга операційного підсилювача, В;

$U_{вх}$ – вхідна напруга операційного підсилювача, В.

За номінальних обертів тахогенератор, що використовується у моделях двигунів 47 МВН, видає напругу в 20 В, потрібно щоб напруга зворотного зв’язку за швидкістю, на вході регулятору дорівнювала, та була пропорційною до напруги керування.

Напруга керування в даній схемі не повинна перевищувати п’яти вольт – це є гранично припустима напруга на вході мікроконтролера, що за встановленими параметрами відповідатиме досягненню максимальних обертів двигуна, перевищення цього значення видаватиме помилку «Перевищення максимальних обертів».

Відповідно до рівняння 2.13 можна визначити коефіцієнт підсилення за вихідною та вхідною напругою, де вихідна напруга операційного підсилювача дорівнює максимальній напрузі керування, тобто на вході мікроконтролера повинна приходити напруга в 5 В за 1500 об/хв. двигуна, а тахогенератор видаватиме за цих умов 30 В.

$$K_n = \frac{5}{30} = 0{,}1667$$

Задаємося розміром опору резистора в ланцюгу зворотного зв’язку 10 кОм. Знаходимо розмір опору резистора $R_{вх}$ в вхідному ланцюзі подільника напруги:

$$R_{вх} = \frac{10000}{0{,}1667} = 59988(Ом)$$

Приймаємо $R_{вх}$ = 60 кОм.

Для більш універсального застосування привода для тахогенераторів чиї параметри відношення напруги тахогенератора ($U_{тг}$, В) до обертів двигуна (n, об/хв) не будуть перевищувати параметри встановлені у цій роботі, застосовуємо ланцюг масштабування. Це ланцюг із послідовно підключеними резисторами до входу операційного підсилювача, сума яких і складає опір $R_{вх}$.

Для використання більшого діапазону масштабування застосовуємо резистори з номіналом R_1 = 15 (кОм), R_2 = 24 (кОм), R_3 = 10 (кОм), та підстроювальний резистор R_4 = 20 (кОм), цей резистор забезпечуватиме плавне регулювання параметрів масштабування.

До резисторів R_1 та R_2 паралельно підключені перемички ХР1 і ХР2, що в разі необхідності відключають ці резистори та збільшують коефіцієнт підсилення.

Операційний підсилювач обираємо LM348 .

2.3.2 Розробка та розрахунок схеми зворотного зв’язку за струмом

Для забезпечення зворотного зв’язку за струмом використовуємо датчик струму компенсаційного типу. Датчики такого типу дозволяють безконтактним засобом вимірювати постійний, змінний та імпульсний струм у діапазоні ±5…±1200 А. Струм, що протікає через провідник, що контролюється, створює магнітне поле, пропорційне розміру цього струму, яке концентрується всередині кільцевого магнітопроводу та діє на лінійний інтегрований датчик Хола. Сигнал датчика посилюється операційним підсилювачем, навантаженням якого є котушка негативного зворотного зв’язку. Котушка створює в магнітопроводі протилежне за напрямком магнітне поле, що повністю компенсує вихідне. Виходом датчика слугує другий вивід котушки. Таким чином, вихідний сигнал – це струм, пропорційний розміру струму в провіднику, що контролюється та числу витків котушки зворотного зв’язку. Струмовий вихід конвертується в напругу за допомогою зовнішнього резистора. В таблиці 2.6 наведені технічні параметри датчика струму та опір конвертуючого резистора. Схема підключення датчика струму наведена на рисунку 2.13.

Таблиця 2.6 – Технічні параметри датчика струму

Тип	Діапазон вимірювань, А	Напруга живлення, В	Характеристики котушки		Опір конвертуючого резистора, Ом	Електрична міцність ізоляції, кВ	Точність, %
			n	R, Ом			
CSNP661	± 90	± 12…15	1000	30	70…195	3,0	± 0,5

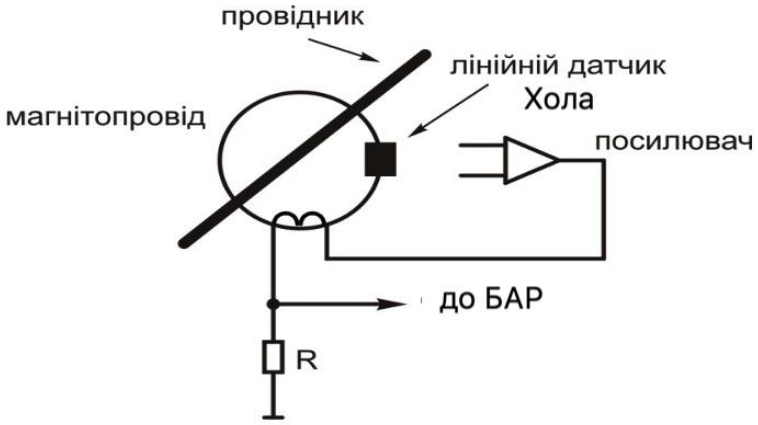


Рисунок 2. 13 – Схема підключення датчика струму

За умов використання конвертуючого резистора R у схемі підключення датчика струму розміром 100 (Ом). Напруга пропорційна до струму знаходиться за формулою (2.14).

$$U = \frac{R}{n}, \tag{2.14}$$

де U – вихідна напруга датчика струму, В;

R – опір конвертуючого резистора, Ом;

n – кількість витків компенсуючої котушки.

$$U = \frac{100}{1000} = 0{,}1(B)$$

Це означає, що на величину струму в 1 (А) приходиться напруга в 0,1 (В).

Задаємося значенням резистора R3 10 (кОм). Знаходимо R2:

$$R_2 = \frac{U_{вх} \cdot R_3}{U_{вих}} = \frac{9 \cdot 10000}{5} = 18000(Ом)$$

Обираємо резистор R2 типу МЛТ-0,125-18 кОм. Резистор R1: МЛТ-0,125-4,7 кОм, резистор R3 приймаємо МЛТ-0,125-10 кОм.

Операційний підсилювач обираємо LM348.

Ланцюг подільника напруги для схеми зворотного зв’язку наведено на рисунку 2.14.

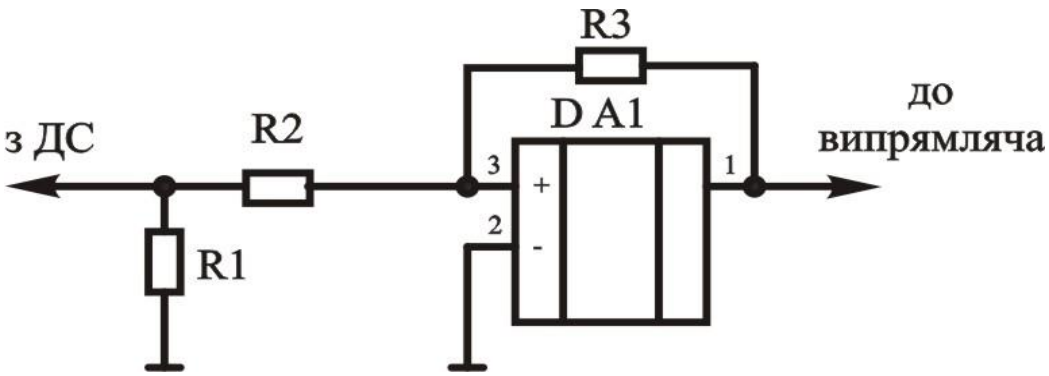


Рисунок 2.14 – Схема електрична принципова подільника напруги схеми зворотного зв’язку за струмом

Робота схеми подібна до роботи схеми ланцюга зворотного зв’язку за швидкістю. Резистор R1 підключений на корпус використовується для того, щоб у разі відсутності сигналу від датчика струму, на вході операційного підсилювача був відсутній потенціал напруги, що може вплинути на роботу пристроїв [16,17].

2.3.3 Розробка та розрахунок схеми визначення напряму обертання двигуна

Для визначення напрямку обертання двигуна, а саме роботи прямого чи реверсного моста випрямляча передбачена схема побудована на операційному підсилювачі DA1 та діоді VD1. Схема електрична принципова зображене на рисунку 2.15.

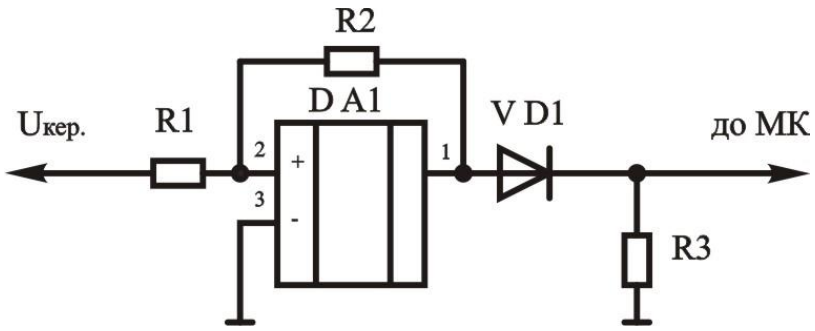


Рисунок 2.15 – Схема електрична принципова визначення напрямку обертання двигуна

Діод VD1, що стоїть на виході операційного підсилювача не дозволяє проходження негативної напруги, завдяки чому на вході мікроконтролера у разі надходження позитивної напруги встановлюється високий потенціал, що дає команду на включення вентилів прямого обертання двигуна. За надходження негативної напруги встановлюється нуль, що включає вентилі зворотного зв’язку. Схема працює як повторювач: резистори R1 та R2 - МЛТ-0,125-10 кОм; діод КД522Б; операційний підсилювач LM348.

2.4 Розробка схеми електричної принципової та топології друкованої плати системи керування

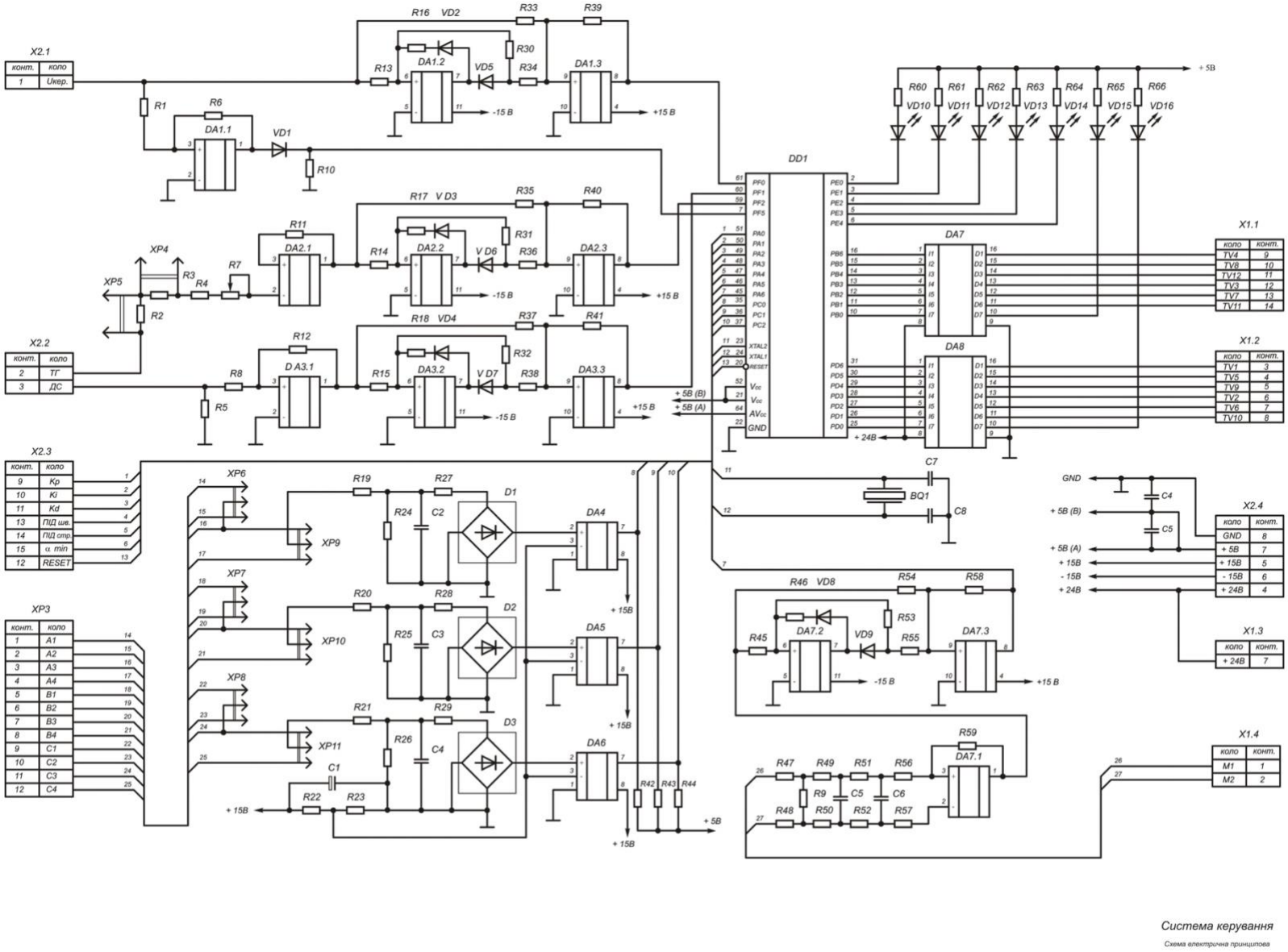
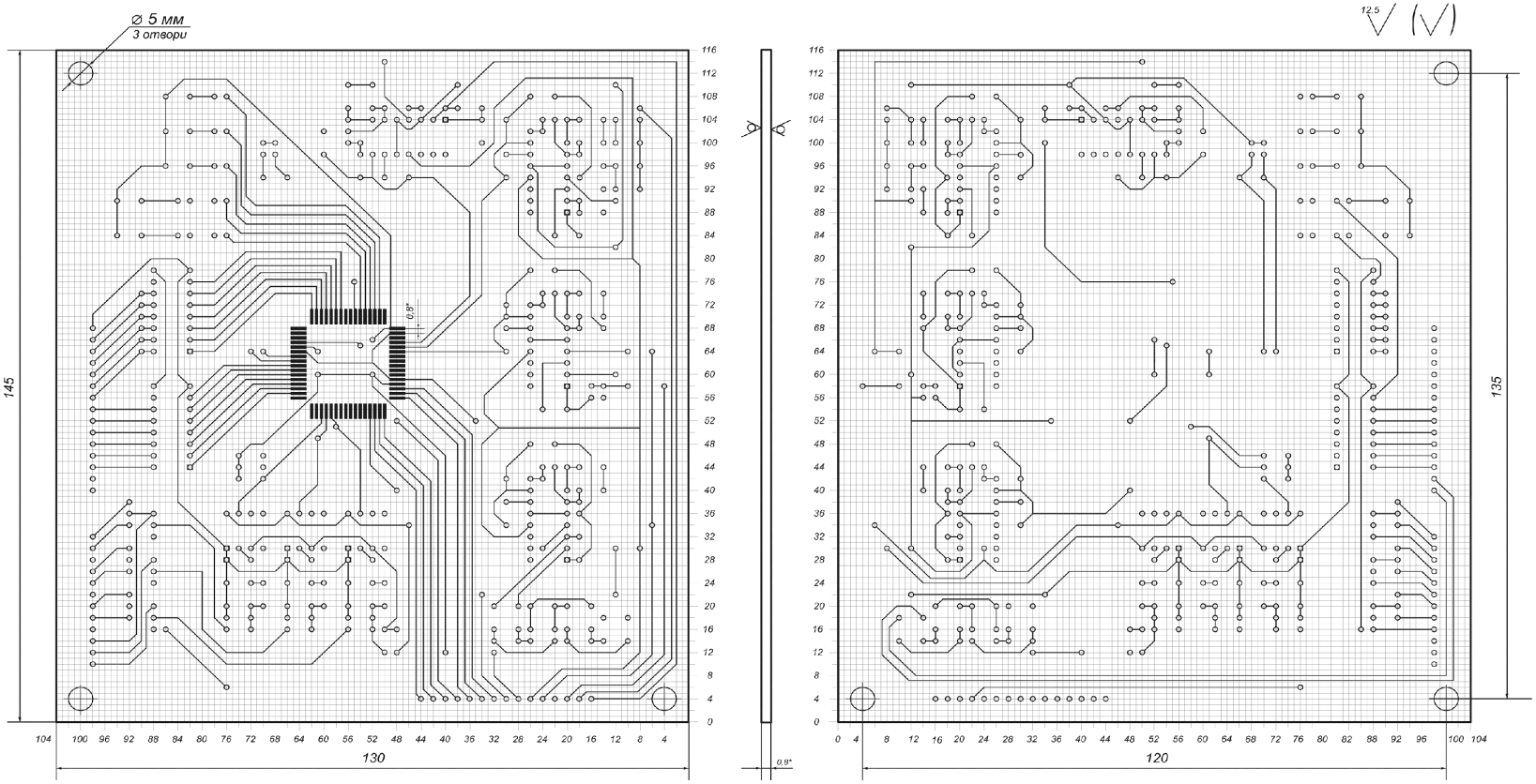


Рисунок 2.16 – Схема електрична принципова системи керування двигуном постійного струму



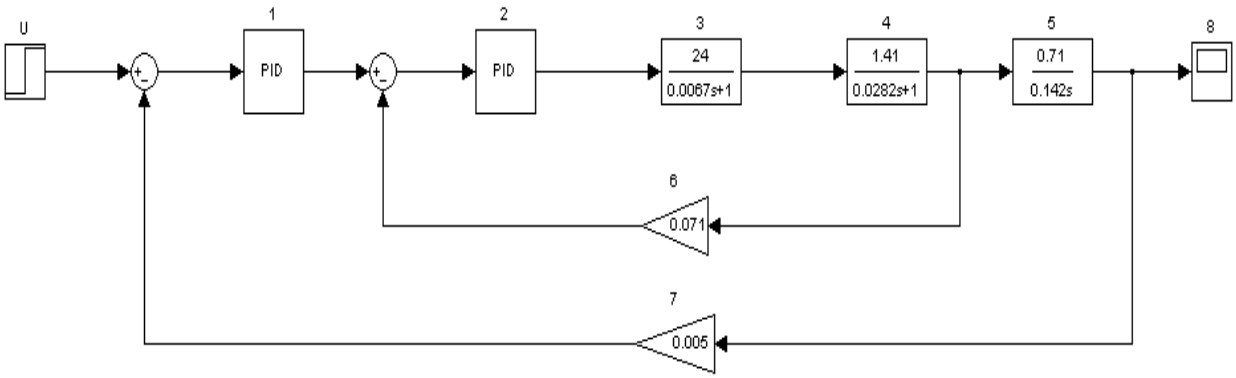
Позначення елементів	Діаметр отв.. мм	Наявність металізації отворів	Діаметр контактної площадки, мм	Кільк.	Прим.
○	0,7	Металізація	1,00	411	

1 Виготовити хімічним способом.
2 * Розмір для справок.
3 Невказані граничні відхилення розмірів H 12, h12, $\pm \frac{t_n}{2}$
4 Шаг координатної сітки 1,25 мм.
5 Ширина провідників 0,25 мм.
6 Відстань між провідником та контактною площадкою не менше 0,25 мм.
7 Покриття провідників та контактних площадок сплав "Розе" ТУ6-09-4065-88.
8 Плата повинне відповідати ГОСТ 23752-79.

Рисунок 2.17 – Топологія друкованої плати системи керування

2.5 Моделювання системи автоматичного керування в MATLAB

Для перевірки працездатності схеми проведемо моделювання контуру регулювання за швидкістю (рис. 2.18) та контуру моделювання за струмом (рис.2.20).



U – Напруга керування;

1 – ПІД-регулятор швидкості;

2 – ПІД-регулятор струму;

3 – Передавальна функція перетворювача;

4 – Передавальна функція електричної складової двигуна;

5 – Передавальна функція механічної складової двигуна;

6 – Коефіцієнт зворотного зв’язку за струмом;

7 – Коефіцієнт зворотного зв’язку за швидкістю.

Рисунок 2.18 – Модель контуру регулювання за швидкістю

Вихідна характеристика за швидкістю, що відображає роботу контуру при зміні керуючої напруги наведена на рисунку 2.19

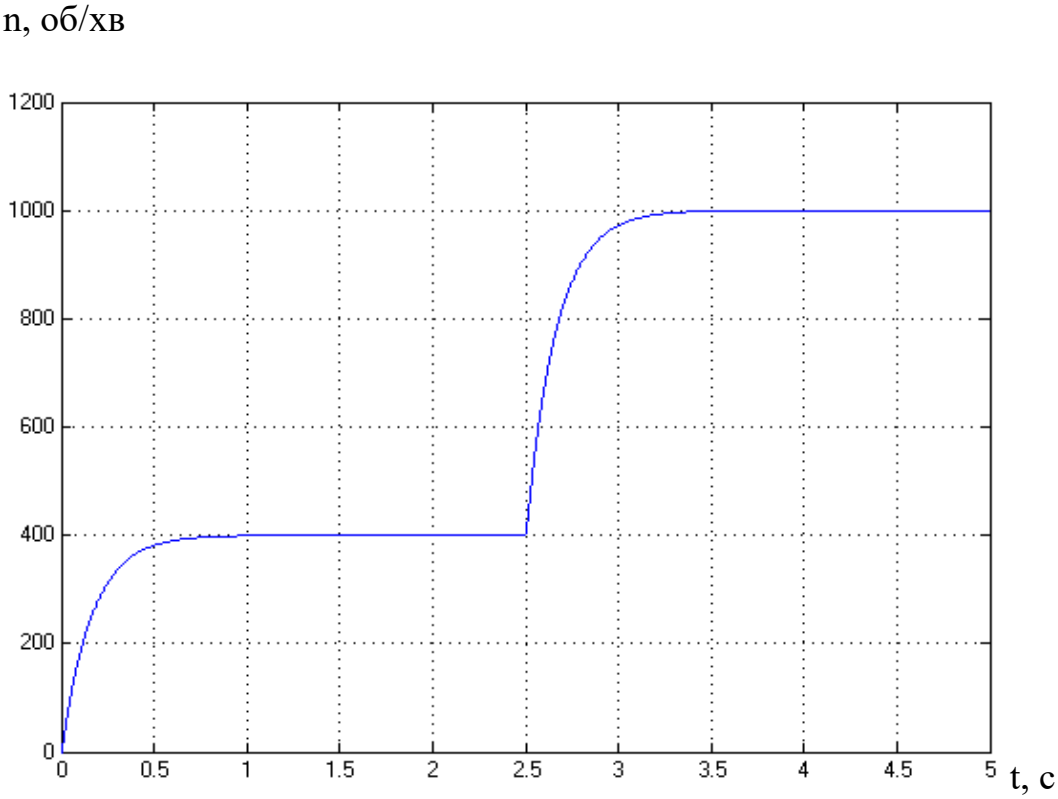


Рисунок 2.19 – Вихідна характеристика за швидкістю



U – Напруга керування;

1 – ПІД-регулятор струму;

2 – Передавальна функція перетворювача;

3 – Передавальна функція електричної складової двигуна;

4, 5 – Коефіцієнт зворотного зв’язку за струмом.

Рисунок 2.20 – Контур регулювання за струмом

Вихідна характеристика за струмом, що відображає роботу контуру при керуючій напрузі у п’ять вольт наведена на малюнку 2.21

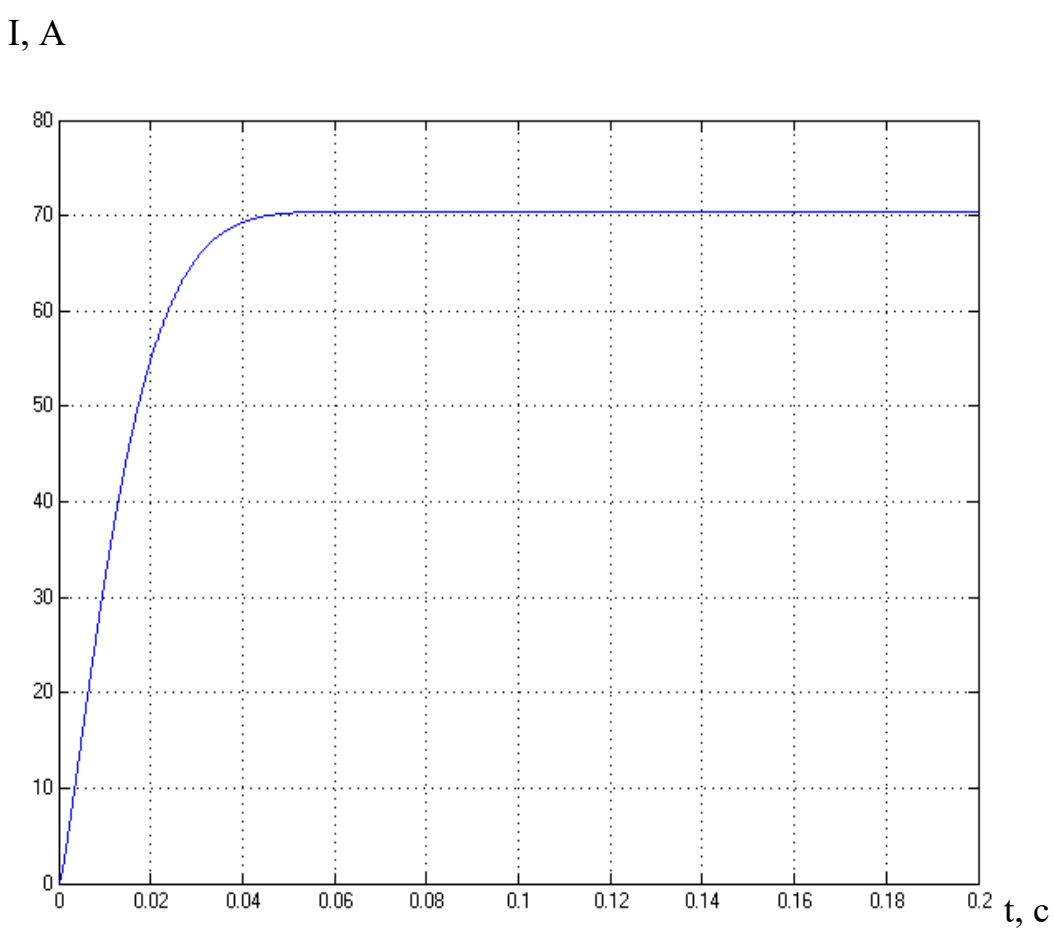


Рисунок 2.21 – Вихідна характеристика струму

2.6 Розробка алгоритму роботи мікроконтролера

Основний алгоритм роботи мікроконтролера в якості блоку автоматичного регулювання наведено на рисунку 2.22.

Ініціалізуємо входи мікроконтролера PF0, PF1, PF2 як аналогові встановленням почергово розряду MUX [3...0] = 00_b, MUX [3...0] = 01_b, MUX

[3...0] = 10_b регістра ADMUX, відповідно. Обираємо внутрішнє джерело опорної напруги, встановивши розряди REFS [1...0] = 11_b. Для роботи АЦП обираємо режим одиночного перетворення, встановивши розряд ADFR = 1 регістра ADCSRA. Вирівнювання результату в реєстровій парі встановлюємо по лівому краю розрядом ADLAR = 1. зчитування повинне відбувається в наступному порядку: спочатку зчитується вміст регістра ADCL, а потім регістра ADCH. Це необхідно, для того щоб при зчитуванні результату цифро-аналогового перетворення обидві частини результату гарантовано були підсумком того самого перетворення. Після зчитування молодшого байта ADCL схема блокує доступ АЦП до його регістра даних ADCH:ADCL. Якщо до цього моменту нове перетворення завершилось, результат губиться. При зчитуванні ADCH знову забезпечується доступ АЦП до регістра даних.

Опис роботи:

а) початок роботи. Регістр ADEN встановлюється в нуль, чим забороняє роботу АЦП. Встановленням розряди MUX [3...0] = 00_b регістру ADMUX підключаємо вхід PF0 до АЦ – перетворювача.

б) для дозволу перетворення аналогового сигналу в цифровий встановлюється розряд ADEN = 1 регістра керування АЦП ADCSRA, після чого відбувається перетворення аналогового сигналу, що надходить у десятеричне число.

в) результат перетворення заноситься у регістри даних АЦП ADCH:ADCL (старший і молодший байти відповідно). Про те, що дані перетворення занесені в регістри даних, свідчить розряд ADIF, що встановлюється в одиницю. Як тільки розряд ADIF установлюється в одиницю відбувається переривання перетворення, і розряд ADEN скидається в нуль. Подальше перетворення заборонене.

г) результати перетворення з регістрів ADCH:ADCL переписуються в пам'ять операційно запам’ятовуючого пристрою (ОЗП) за адресою $\$0010_h$.

д) після завершення запису даних у ОЗП розряди MUX [3...0] регістру ADMUX встановлюється 01_b тим самим дозволяючи роботу входу PF1.

Операції е, є подібні до операцій роботи б, в.

ж) результати перетворення перезаписуються в ОЗП за адресою $\$0012_h$.

з) розряди MUX [3...0] регістру ADMUX встановлюється 10_b тим самим дозволяючи роботу входу PF2.

Робота за пунктами і, к аналогічна до роботи за пунктами б,в.

л) результати перетворення з ADCH:ADCL записуються в ОЗП за адресою $\$0014_h$.

м) за умов що параметри вимірювань та перетворень внесені до адрес ОЗП $\$0010_h$, $\$0012_h$ та $\$0014_h$ мікроконтролер ініціалізує друге коло вимірювань, але с занесенням параметрів обчислення за адресами $\$0011_h$, $\$0013_h$ та $\$0015_h$ вони позначені в лапках. Це необхідно для обчислення інтегральної та диференційної складової ПІД регулювання.

н) після проходження двох циклів перетворення вміст ОЗП за адресами $\$0010_h$ та $\$0011_h$, $\$0012_h$, $\$0013_h$ вносяться до блоку ПІД регулятора швидкості.

о) результат перетворення заноситься в ОЗП за адресою $\$0016_h$.

п) вміст ОЗП за адресами $\$0014_h$, $\$0015_h$ та $\$0016_h$ вносяться до блоку ПІД регулятора струму (робота ПІД регулятора струму наведена на малюнку 2.21, оскільки вона є ідентичною до роботи ПІД-регулятора швидкості).

р) отриманий результат записується за адресою $\$0018_h$ та надходить до системи імпульсно-фазового керування.

Робота ПІД-регулятора швидкості та струму ідентичні тому розглянемо алгоритм роботи ПІД-регулятора швидкості. Алгоритм роботи ПІД регулятора наведено на рисунку 2.23.

Основні параметри регулятора записані до ПЗП (EEPROM), як константи. константа К1 ініціалізується як коефіцієнт пропорційної складової $К_р$. Константа К2 ініціалізується як інтегральна складова, що містить значення $К_i$. Константа К3 містить значення диференційної складової $К_d$.

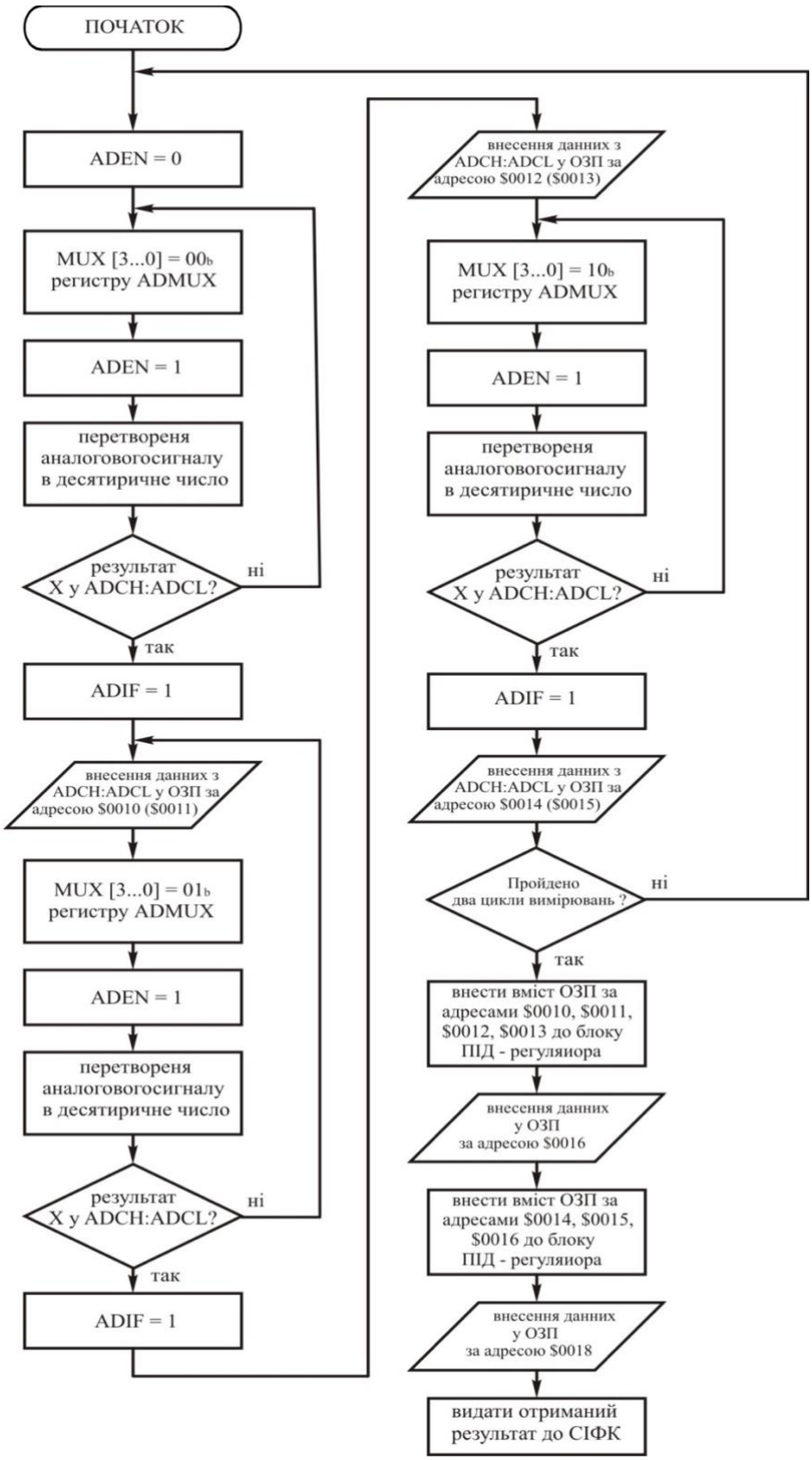


Рисунок 2.22 – Алгоритм роботи мікроконтролера

Опис роботи:

За допомогою арифметичних операцій закладених у мікроконтролер призводимо обчислення значень імітуючи роботу ПІД-регулятора побудованого на аналогових елементах.

а) Для визначення y_1 за командою SUB вираховуються значення, що зберігаються в ОЗП за адресами $\$0010_h$ та $\$0012_h$. Та результат заноситься до ОЗП за адресою $\$0030_h$;

б) Для визначення y_2 за командою SUB вираховуються значення, що зберігаються в ОЗП за адресами $\$0011_h$ та $\$0013_h$. Та результат заноситься до ОЗП за адресою $\$0031_h$;

в) Визначаємо значення змінної dy вирахуванням значення $\$0030_h$ з $\$0031_h$. Отримане число заноситься до ОЗП за адресою $\$0032_h$.

г) Визначення змінної dt відбувається за допомогою обчислення кількості пройдених машинних циклів помножених на тривалість одного машинного циклу. Отриманий результат заноситься до ОЗП $\$0033_h$.

д) Зміщуємо значення dt для отримання результату 1/dt за командою ASR. Результат заноситься до ОЗП $\$0034_h$.

е) Вираховується значення $1/y_1$ за допомогою команди зміщення ASR. отримане значення заноситься до ОЗП за адресою $\$0035_h$.

є) Вираховується значення y_2/y_1 за допомогою команди помноження MUL. Результат заноситься до ОЗП за адресою $\$0036_h$.

ж) Визначається значення пропорційної складової регулятора. Значення K_p, що зберігається як постійна К1 за командою MUL помножується з вмістом $\$0036_h$. результат розрахунків зберігається у ОЗП $\$0037_h$.

з) За командою MUL відбувається помноження значень, що зберігаються за адресами $\$0032_h$, $\$0034_h$. Тим самим визначаючи значення dy*dt. Результат заноситься за адресою $\$0038_h$.

і) Визначається значення інтегральної складової регулятора. Значення K_i, що зберігається як постійна К2 за командою MUL помножується з вмістом $\$0038_h$. Результат записується за адресою $\$0039_h$.

к) Визначення dy/dt відбувається за допомогою команди MUL, що перемножує значення $\$0032_h$ та $\$0034_h$. Тобто dy*(1/dt). Результат заноситься до $\$003A_h$.

л) Визначається значення диференційної складової регулятора. Значення K_d, що зберігається як постійна К3 за командою MUL помножується з вмістом $\$003A_h$. Результат записується за адресою $\$003B_h$.

м) Для визначення значення ПІД регулятора почергово складаються за командою ADD отримані значення пропорційної складової ($\$0037_h$) з інтегральною ($\$0039_h$) з занесенням результату до $\$003C_h$. Потім значення $\$003C_h$ складається з значенням диференційної складової ($\$003B_h$). Отриманий результат є регульованим значенням ПІД-регулятора і видається до СІФК.

Таким чином розроблений пристрій має повністю цифрове рішення системи автоматичного регулювання і системи імпульсно-фазового курування, що дозволило збільшити функціональність і розширити сервісні функції. Заміна мікроконтролером систем і ланцюгів релейного керування, функції яких до сьогоднішнього дня виконували аналогові елементи, дозволило так само поліпшити масогабаритні показники.

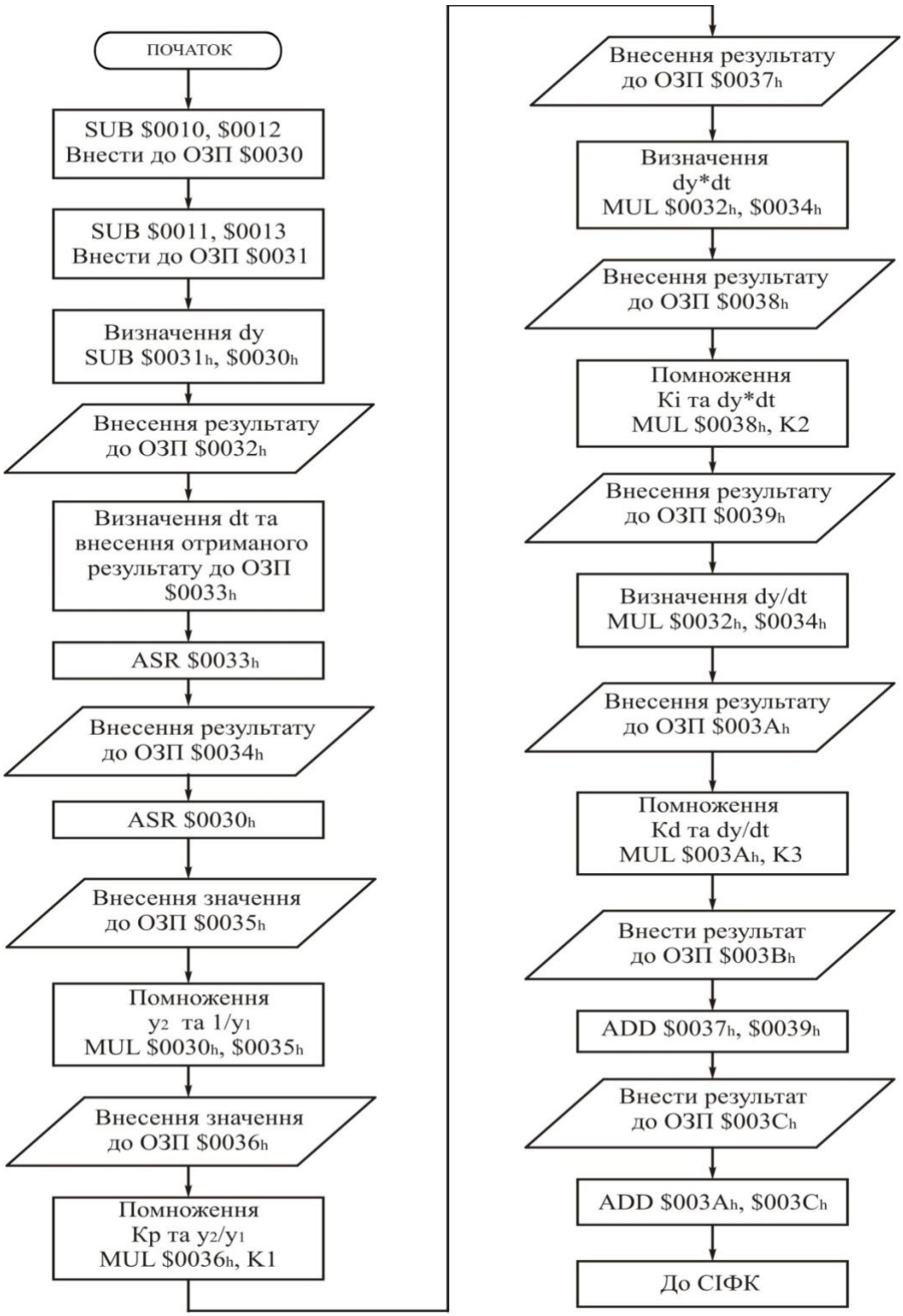


Рисунок 2.23 – Алгоритм роботи ПІД-регулятора

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Системи автоматичного керування двигуном постійного струму мають ряд переваг, а саме: точність регулювання швидкості та крутного моменту, що забезпечує стабільність у складних умовах роботи; висока енергоефективність, яка знижує витрати завдяки регулюванню швидкості відповідно до навантаження; плавна робота з мінімізацією механічних ударів; а також широкий діапазон швидкостей для гнучкого застосування.

Саме тому системи керування можуть бути засновані на різних фізичних елементах: блок імпульсно-фазового керування (БІФК), ШІМ (широтно-імпульсна модуляція) на транзисторах, тиристорний перетворювач ТЕ-8, ПНТТЕ-160 (перетворювач напруги), кожен має свої позитивні та негативні якості. Тож виконаємо порівняльний аналіз систем за критеріями відносної важливості.

Розрахуємо вартість комплектуючих для схеми електричної принципової автоматичної системи керування.

3.1 Розрахунок витрат на елементну базу

Усі витрати представлено в таблиці 3.1

Таблиця 3.1- Визначення вартості комплектуючих виробів

№ п/п	Найменування	Кількість, шт.	Ціна, грн/шт	Сума, грн.
1	2	3	4	5
	Мікроконтролер			

1	Atmega 64-16Aw	1	23,32	23,32
	Посилювач			
2	ULN2003A	2	1,15	2,30
	Компаратор			
3	LM311	3	0,83	2,49
	Операційний посилювач			
4	LM348J	4	1,24	4,96
	Світлодіод			
5	АЛ307	7	0,15	1,05
	Діод			
6	КД522А	9	0,10	0,90
	Діодна зборка			
7	КД906А	3	4,00	12,00
	Резистори:			
8	МЛТ-0.125-4.7к ±10%	12	0,20	2,40
9	МЛТ-0.125-10к ±10%	7	0,20	1,40
10	МЛТ-0.125-20к ±10%	12	0,25	3,00
11	МЛТ-0.125-15к ±10%	1	0,25	0,25
12	МЛТ-0.125-24к ±10%	1	0,25	0,25
13	МЛТ-0.125-510к ±10%	3	0,15	0,45
14	МЛТ-0.125-75 ±10%	1	0,15	0,15
15	МЛТ-0.125-100к ±10%	1	0,20	0,20
16	МЛТ-0.125-300к ±10%	2	0,15	0,60
17	МЛТ-0.125-18к ±10%	1	0,15	0,15
18	С2-23-22,1к ±10%	16	0,15	2.40
19	С2-23-44,2к ±10%	8	0,15	1,20
20	СП3-19а-20к ±10%	1	1,00	1,00
	Конденсатори			
21	КМ5б-Н90-91н	3	0,73	2,19
22	КМ5б-Н90-27п	2	0,30	0,60
23	КМ5б-Н90-220н	2	0,83	1,66
24	КМ5б-Н90-100н	2	0,50	1,00
25	К50-35-100мк-25В	1	0,30	0,30

Загалом	65,92

3.2 Порівняльний аналіз систем керування

Проведемо аналіз ієрархії чотирьох варіантів систем автоматичного керування (табл. 3.2) враховуючи шкалу відносної важливості (табл.3.3).

Таблиця 3.2 – Системи автоматичного керування

Система	Короткий опис (види систем керування)
A	блок імпульсно-фазового керування (БІФК)
B	ШІМ (широтно-імпульсна модуляція) на транзисторах
C	тиристорний перетворювач ТЕ-8
D	ПНТТЕ-160 (перетворювач напруги)

Таблиця 3.3 – Шкала відносної важливості

Інтенсивність відносної важливості	Визначення
1	рівна важливість
3	помірна перевага
5	сильна перевага
7	значна перевага
9	дуже сильна перевага
2,4,6,8	проміжні судження

Вибір робимо за критеріями, наведеними в таблиці 3.3, встановлюємо відносну вагу кожного критерію на основі матриці попарних порівнянь для обраних критеріїв.

Таблиця 3.4 – Попарне порівняння критеріїв

Критерій	1	2	3	4	5	$\sqrt[6]{\prod_{i=1}^{6}\omega_i}$	X_i
1. Точність регулювання швидкості та крутного моменту	1	1	1/3	1/7	7	0,782	0,119
2. Енерговитрати	1	1	5	7	5	2,809	0,427
3. Захист від перенавантажень	3	1/5	1	1/5	3	0,815	0,124
4. Простота обслуговування	7	1/7	5	1	5	1,896	0,288
5. Вартість	1/7	1/5	1/3	1/5	1	0,279	0,042
∑						6,581	1,00

Далі аналогічно складаємо 6 матриць попарних порівнянь альтернатив стосовно кожного критерію (таблиці 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8,). Оскільки тепер порівнюються 4 технології по одному критерію , то i = 1, 2, 3, 4;

$$X_i=\frac{\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}}{\sum_{i=1}^{4}\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}};\ \sum \text{ - сума по стовпці } \sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}.$$

Таблиця 3.5 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «точність регулювання швидкості та крутного моменту»

Система	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	5	7	5	3,64	0,47
B	1/5	1	1/3	1	1,26	0,16
C	1/7	3	1	3	1,63	0,21
D	1/5	1	1/3	1	1,26	0,16
∑					7,79	1,00

Таблиця 3.6 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «енерговитрати»

Система	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	7	5	7	2,11	0,34
B	1/7	1	1	3	1,50	0,23
C	1/5	1	1	3	1,51	0,24
D	1/7	1/3	1/3	1	1,16	0,19
∑					6,28	1,00

Таблиця 3.7 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «захист від перенавантаження»

Система	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	7	5	5	2,06	0,33
B	1/7	1	1	3	1,50	0,25

C	1/5	1	1	1	1,34	0,22
D	1/5	1/3	1	1	1,26	0,20
∑					6,16	1,00

Таблиця 3.8 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «простота обслуговування»

Система	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	3	5	7	2,00	0,31
B	1/3	1	3	5	1,75	0,27
C	1/5	1/3	1	5	1,59	0,25
D	1/7	1/5	1/5	1	1,11	0,17
∑					6,45	1,00

Таблиця 3.9 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «вартість»

Система	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	3	7	3	1,93	0,30
B	1/3	1	5	1	1,65	0,26
C	1/7	1/5	1	5	1,59	0,25
D	1/3	1	1/5	1	1,26	0,19
∑					6,43	1,00

Глобальний пріоритет для кожної альтернативи обчислюється як сума добутків кожного локального пріоритету на його ваговий коефіцієнт.

Таблиця 3.10-– Глобальний пріоритет для кожної альтернативи

Пріоритети	№1	№2	№3	№4	№5	Глобальний
Вага	0,119	0,427	0,124	0,288	0,042	
БІФК	0,47	0,34	0,33	0,31	0,30	0,342
ШІМ	0,16	0,23	0,25	0,27	0,26	0,236
ТЕ-8	0,21	0,24	0,22	0,25	0,25	0,237
ПНТТЕ-160	0,16	0,19	0,20	0,17	0,19	0,182

З порівняння глобальних пріоритетів різних видів систем керування (табл.3.10) можна зробити висновок, що найбільшим є пріоритет у блоку імпульсно-фазового керування.

За допомогою методу аналізу ієрархій проведене порівняння чотирьох видів систем керування за наступними критеріями: 1) точність регулювання швидкості та крутного моменту; 2) енерговитрати; 3) захист від перенавантажень; 4) простота обслуговування; 5) вартість. Найбільший локальний пріоритет у критерію «енерговитрати». За даними таблиць глобальний пріоритет за багатьма критеріями є найвищим для блокуімпульсно-фазового керування.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Характеристика потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів

На робочому місці інженер-електронщик піддається впливу наступних несприятливих умов:

— недостатнє освітлення;

— шум від працюючих машин (комп’ютерів, робочих стендів). Джерелом шуму є робочі стенди. Шум діє на робітника протягом 70% робочого часу;

— електромагнітне випромінювання, джерелом якого є персональні комп'ютери з системними блоками і моніторами;

— виділення надлишків теплоти;

— підвищена запиленість.

Розвитку стомлюваності на робочому місці сприяють такі чинники:

— характер протікання праці. Трудовий процес організований таким чином, що інженер-електронщик змушений з перших хвилин робочого дня вирішувати найбільш складні і трудомісткі задачі, у той час як у перші хвилини роботи функціональна рухливість нервових клітин мозку низька. Важливе значення має чергування праці та відпочинку, зміна одних форм роботи іншими.

— неправильна ергономічна організація робочого місця, нераціональні зони розміщення обладнання по висоті від підлоги, по фронту від осі симетрії;

Джерела небезпечних та шкідливих чинників на інженера – електронщика:

— рівень шуму в приміщенні протягом робочого дня непостійний. При цьому протягом однієї години діє шум з рівнем звуку 83 дБА, протягом наступних двох годин з рівнем звуку 86 дБА, останній час 81 дБА при тому що

норматив повинен бути не більше 70 дБА. Значить, робоче місце по показнику рівня шуму відноситься до класу умов праці 3.2 – шкідливий.

— основним джерелом електромагнітного випромінювання приміщення є персональні комп'ютери з системними блоками і моніторами.

— іонізація повітря приміщення. Рівні позитивних і негативних аероіонів в повітрі приміщень, де розташовані ПЕОМ, повинні відповідати санітарно-епідеміологічним нормативам, що діють.

Так як у приміщенні присутнє лабораторне устаткування, комп’ютери, шафи та робоча документація, то спостерігається деяка запиленість. За нормою запиленість в приміщенні не повинна перевищувати 4 мг/м³[19].

4.2. Заходи з поліпшення умов праці, виробнича санітарія

Для запобігання дещо підвищеної запиленості рекомендується встановлювати витяжні пристрої, а також проводити вологе прибирання приміщення лабораторного приміщення.

Раціональне колірне оформлення приміщення направлено на поліпшення санітарно-гігієнічних умов праці, підвищення її продуктивності та безпеки. Забарвлення приміщень впливає на нервову систему людини, його настрій і в кінцевому рахунку на продуктивність праці. Основні виробничі приміщення доцільно офарблювати відповідно до кольору технічних засобів. Освітлення приміщення і устаткування має бути м'яким, без блиску [19].

Температура в приміщеннях є одним з провідних чинників, що визначають метеорологічні умови виробничого середовища. Високі температури надають негативну дію на здоров'я людини. Робота в умовах високої температури супроводжується інтенсивним потовиділенням, що приводить до обезводнення організму, втрати мінеральних солей і водорозчинних вітамінів, викликає

серйозні і стійкі зміни в діяльності серцево-судинної системи, збільшує частоту дихання.

При низькій температурі висока відносна вологість збільшує тепловтрати організму в результаті інтенсивного поглинання водяними парами енергії випромінювання людини. Це веде до переохолодження організму – гіпотермії. Низька вологість викликає пересихання слизистих оболонок дихальних доріг того, що працює.

В даному приміщенні допустима температура повітря в теплий період для роботи складає 22-24ºС (в холодний період 21-23ºС), відносна вологість 40-60 %, швидкість руху повітря 0,1-0,2 м/с.

Фактичні параметри: в теплий період температура – 23-25 ºС, відносна вологість 45-60%, швидкість руху повітря 0,15-0,2 м/с, категорія робіт – 1а, в холодний період – температура 18-24^{0}С, відносна вологість 40-60 %, швидкість руху повітря 0,15-0,2 м/с, категорія робіт 1б [20], що відповідає нормам.

У приміщеннях, обладнаних ПЕВМ, повинна проводиться щоденне, вологе прибирання і систематичне провітрювання після кожної години роботи на ПЕВМ.

Світло є природною умовою життя людини, необхідною для збереження здоров'я і високої продуктивності праці, і заснованим на роботі зорового аналізатора. Недостатнє освітлення робочого місця утрудняє тривалу роботу, викликає підвищене стомлення і сприяє розвитку короткозорості. Дуже низькі рівні освітленості викликають апатію, сонливість, а в деяких випадках сприяють розвитку відчуття тривоги.

За правилами, світло при роботі з комп’ютером повинно падати зліва. Крім того, крісло слід відрегулювати так, щоб очі були на одному рівні з центром монітора. Саме очі найбільш страждають при роботі з комп’ютером. Виявляється, коли довго дивишся на екран, перестаєш моргати. Тому очі червоніють, сльозяться, а значить, знижується зір. Невелика

відстань до екрану, дрібний шрифт, мерехтіння, різне освітлення призводять, в остаточному підсумку, до короткозорості.

З метою зниження мерехтіння екрану рекомендується встановлювати частоту кадрів не менше 75 Гц для ЕЛТ-моніторів, та для ЖК-моніторів достатньою є мінімальна частота кадрів у 60 Гц.

Екран відеомонітора повинен знаходитися від очей на оптимальній відстані 700мм, але не ближче 500 мм. Перед початком роботи необхідно переконатися, що монітори комп'ютера мають антіблоковое покриття з коефіцієнтом відбиття не більше 0,5. Покриття повинне також забезпечувати зняття електростатичного заряду з поверхні екрана, іскріння і накопичення пилу. Корпус монітора повинен забезпечувати захист від іонізуючих та неіонізуючих випромінювань[18].

Для зниження рівня шуму стіни і стеля приміщень, де встановлені комп'ютери, можуть бути фанеровані звукопоглинальними матеріалами, а також застосування різних звукопоглинальних пристроїв. Зниження шуму в джерелі випромінювання можна забезпечити застосуванням м'яких килимків з синтетичних матеріалів, а під ніжки столів, на яких вони встановлені, прокладки з м'якої гуми завтовшки 6-8 мм.

У зв'язку з усіма небезпеками досить чітко регламентовані розміри столу і стільця для роботи з комп'ютером. Адже "закам'яніла" постава шкідливо впливає на скелетно-м'язову систему. Стіл повинен бути просторим, із спеціальною підставкою для ніг, а робочий стілець – мати відрегульовану висоту, певний кут нахилу сидіння і спинки. Висота робочої поверхні столу повинна регулюватися а межах 680-800 мм, при відсутності такої можливості висота робочої поверхні столу Робота за комп'ютером повинна бути 725 мм.

Робота за комп'ютером без регламентованої перерви не повинна перевищувати двох годин. Під час регламентованих перерв з метою зниження нервово-емоційної напруги, стомлення зорового аналізатора, усунення впливу

гіподинамії і гіпокінезії, запобігання розвитку захворювань спини треба виконувати комплекси гімнастичних вправ.

Клавіатуру слід розташовувати на поверхні столу на відстані 100-300 мм від краю, зверненого до користувача.

Необхідно перевірити робоче положення комп'ютера та відстань між стіною з віконними прорізами і столом (має бути не менше 0,8 м). При невеликій кількості робочих місць бажано розташовувати столи біля протилежної стіни щодо віконних прорізів. Також відстань між робочими столами повинна бути не менш ніж 1,2 м. Не допускається знаходження другого робочого місця з боку задньої стінки комп’ютера.

Для забезпечення оптимальної працездатності і збереження здоров’я, протягом часу роботи з комп’ютером, повинні встановлюватися регламентовані перерви. Під час регламентованної перерви, з метою зниження нервово-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, усунення впливу гіподинамії та гіпокінезії та запобігання розвитку познотопіческого втоми, доцільно виконувати комплекси вправ.

Щоб відновити загальний баланс атмосфери у приміщенні необхідно, щоб до робочого місця за комп’ютером проникало свіже повітря.

Таким чином, для безпечної роботи людини, лабораторне приміщення, де знаходиться персональний комп’ютер, повинно відповідати діючим санітарно-епідеміологічним нормам [21].

4.3. Електробезпека

Електричні установки, до яких відноситься практично все обладнання ПЕОМ, представляють для людини велику потенційну небезпеку, тому що в процесі експлуатації або проведенні профілактичних робіт людина може торкнутися частин, що знаходяться під напругою. Специфічна небезпека

електроустановок: струмоведучі провідники, корпуси стійок ПЕОМ і іншого устаткування, що опинився під напругою в результаті пошкодження (пробою) ізоляції, не подають будь-яких сигналів, які попереджають людину про небезпеку[20].

У лабораторному приміщенні розрядні струми статичної електрики частіше за все виникають завдяки дотику до будь-якого з елементів ПЕОМ. Такі розряди небезпеки для людини не представляють, але крім неприємних відчуттів вони можуть привести до виходу з ладу ПЕОМ. Для зниження величини виникаючих зарядів статичної електрики в приміщенні покриття технологічних підлог слід виконувати з одношарового полівінілхлоридного антистатичного лінолеуму. Іншим методом захисту є нейтралізація заряду статичного електрики іонізованим газом. У промисловості широко застосовуються радіоактивні нітралізатори. До загальних заходів захисту від статичної електрики в лабораторному приміщенні можна віднести загальні і місцеве зволоження повітря[20].

Щоб захистити людину від ураження електричним струмом, захисне заземлення має задовольняти ряду вимог, викладених у «Правилах безпеки електроустановок для споживачів» (ПЕУС), НПАОП 40.1-1.21-98[21]. Електробезпека. Захисне заземлення. Занулення». Ці вимоги залежать від напруги електроустановок та потужності джерела живлення. В електроустановках змінного струму напругою до 1000 В у мережі з ізольованою нетралю або ізольованим виводом джерела однофазного струму опір заземлювального пристрою не повинен перевищувати 4 Ом [20].

4.4. Пожежна та техногенна безпека

В лабораторії найбільш небезпечна ситуація виникає при пожежах.

Пожежі пов'язані з великими матеріальними втратами. Характерна особливість лабораторних приміщень – невеликі робочі площі. Як відомо пожежа може виникнути при взаємодії горючих речовин, окислення і джерел запалювання. У даному приміщеннях присутні всі три основні чинника, необхідні для виникнення пожежі.

Горючими компонентами в кімнаті є: будівельні матеріали для акустичної і естетичної обробки приміщень, перегородки, двері, підлоги, перфокарти і перфострічки, ізоляція кабелів та ін.

Протипожежний захист – це комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, на запобігання пожежі, обмеження її розповсюдження, а також на створення умов для успішного гасіння пожежі.

Джерелами запалювання в лабораторному приміщенні можуть бути електронні схеми від ПЕОМ, прилади, застосовувані для технічного обслуговування, пристрої електроживлення, кондиціонування повітря, де в результаті різних порушень утворюються перегріті елементи, електричні іскри і дуги, здатні викликати загоряння горючих матеріалів.

В сучасних ПЕОМ дуже висока щільність розміщення елементів електронних схем. У безпосередній близькості один від одного розташовуються сполучні дроти, кабелі. При протіканні по них електричного струму виділяється значна кількість теплоти. При цьому можливо оплавлення ізоляції. Для відводу надлишкової теплоти відП ЕОМ служать системи вентиляції та кондиціонування повітря. При постійній дії ці системи представляють собою додаткову пожежну небезпеку.

Однією з найбільш важливих завдань пожежного захисту є захист будівельних приміщень від руйнувань та забезпечення їх достатньої міцності в умовах впливу високих температур при пожежі. Враховуючи високу вартість електронного обладнання, а також категорію його пожежної небезпеки, будівлі для лабораторного приміщення і частини будівлі іншого призначення, в яких передбачено розміщення ПЕОМ повинні бути 1 та 2 ступеня вогнестійкості.

Для виготовлення будівельних конструкцій використовуються, як правило, цегла, залізобетон, скло, метал та інші негорючі матеріали. Застосування дерева повинно бути обмежено, а в разі використання необхідно просочувати його вогнезахисними складами.

Для гасіння пожеж на початкових стадіях широко застосовуються вогнегасники. В лабораторних приміщеннях застосовуються головним чином вуглекислотні вогнегасники (ВВК3-5), перевагою яких є висока ефективність гасіння пожежі, збереження електронного устаткування. Діелектричні властивості вуглекислого газу, що дозволяє використовувати ці вогнегасники навіть у тому випадку, коли не вдається знеструмити електроустановку відразу. Вогнегасник (ВВК3-5) переносний з місткістю балона 5 літрів (3,5 кілограма), призначений для гасіння електроустановок, що знаходяться під напругою не більш 10кВ. В даному приміщенні знаходиться один такий вогнегасник [19].

При виявленні пожежі кожен працівник зобов'язаний:

— Негайно викликати пожежну команду за телефоном 101;

— Вимкнути світлову та силову електромережу;

— Видалити з вогнища пожежі джерело запалення;

— Зменшити доступ повітря в зону горіння, ізолюючи вогнище вогнезахисної тканиною.

При виникненні пожежі на електроустановці потрібно негайно знеструмити обладнання і застосувати неелектропровідних вогнегасні засоби (пісок, порошкові вогнегасники, вогнезахисну тканина).

При гасінні одягу на людині потрібно діяти з урахуванням конкретних обставин. Не можна допускати різких рухів і бігати в палаючому одязі, полум'я від цього тільки посилюється. При видаленні тліючих залишків одягу провести екстрені заходи по охолодженню ділянок тіла; не менше 10 хвилин витримати під струменем води, накласти товстий шар тканини, змоченою водою. До лікарської допомоги поверхню опіку ізолювати асептичною пов'язкою або чистою м'якою тканиною, змоченою спиртом.

При виникненні пожежі або іншої надзвичайної ситуації необхідно здійснити негайну евакуацію людей з об’єкту. Евакуація людей здійснюється по шляхах евакуації через евакуаційні виходи. Евакуаційні шляхи і виходи утримуються вільними. Двері на шляху евакуації відчиняються в напрямку виходу з будівлі. Шляхи евакуації постійно освітлюються електричним світлом. Евакуаційні виходи позначені світловими покажчиками з написом "Вихід"[21].

.

4.5 Дослідження засобів захисту від ураження струмом при дотику до фазового дроту

Визначимо напругу дотику та силу струму, що пройде крізь тіло людини, при доторканні до фазового дроту та нульового дроту мережі одночасно. Напруга фазового дроту змінна, U=220В. Частота струму промислова, f=50 Гц. Приймемо власний опір дротів як r=2 Ом, індуктивність мережі L=0,5 Гн, ємність мережі С=1,5 мкФ. Схема дотику представлена на рисунку 3.2. Опір тіла людини Rh=1 кОм.

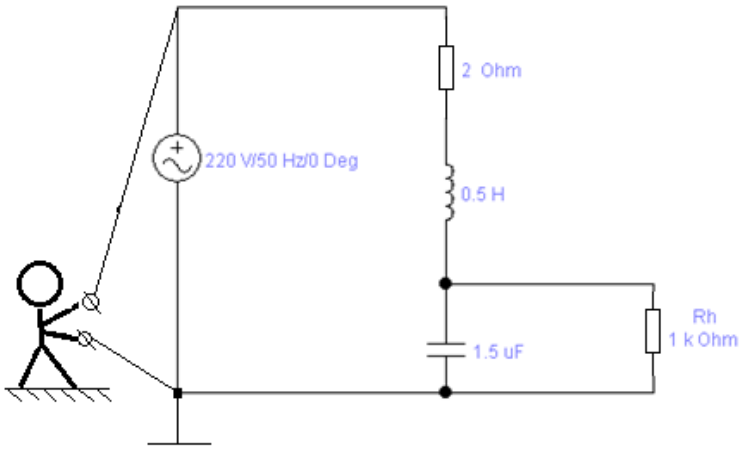


Рисунок 4.1 – Схема дотику

Визначимо індуктивний та ємнісний опір:

$$X_L = wL = 2\pi fL = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}5 = 157 \text{ Ом}$$

де w – циклічна частота;

$$X_C = \frac{1}{wC} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-6}} = 800 \text{ Ом}$$

Опір r=2 Ом незначний, у зрівнянні з X_L та X_C, тому практично не вплине на значення напруги дотику. Тобто цим опором можна знехтувати.

Теж можна і сказати про опір людини Rh, так як паралельне під’єднання опору до конденсатору майже не впливає на проходження струму в ланцюзі. Таким чином, отримуємо силу струму через тіло людини:

$$I = \frac{U}{X_c - X_L} = \frac{220}{800 - 157} = 0{,}344 \text{ А}$$

Тоді, напруга дотику дорівнює:

$$U_{\text{дот}} = IX_C = 0{,}344 \cdot 800 = 276 \text{ В}$$

Таким чином отримуємо,що напруга дотику за рисунком 4.1 буде більше, ніж напруга у ланцюзі. Це явище зв’язано з наявністю у ланцюзі послідовно з’єднаних індуктивності та ємності, за рахунок яких може відбутися резонанс напруг.

Отримана напруга дотику 276 В є набагато більшою за безпечну напругу 42 В. Отриманий струм 344 мА, що набагато перевищує значення смертельного струму 100 мА, тому є дуже небезпечним.

Проаналізувавши даний випадок можна зробити висновок, що при роботі з ланцюгами, де є послідовно з’єднані ємність та індуктивність необхідно використовувати індивідуальні засоби заходу (діелектричні рукавички, тощо), напруга пробою яких більша, ніж напруга ланцюга, тому що через резонансні явища є ризик отримати електричну травму або електричний удар

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Аналіз систем автоматичного керування двигуном показав доцільність розробки блоку, що має повністю цифрове керування двигуном постійного струму і забезпечує стабільність у складних умовах роботи.

Повністю цифрове рішення блоку автоматичного регулювання і блоку імпульсно-фазового керування із застосуванням мікроконтролера Atmega 64-16Aw дозволило збільшити функціональність, розширити сервісні функції двигуна, зменшити габаритні розміри та масу приладу. Покращена система захисту від струмів короткого замикання та перевантажень. Система дає високий коефіцієнт корисної дії і енергозбереження та зниження витрат на матеріали при ремонті.

Результати роботи обговорювались на XVIII університетській науково-практичній конференції студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених «МОЛОДА НАУКА-2025»

Запропоноване технічне рішення може бути використано для оптимізації та автоматизації процесів в галузях промисловості та народного господарства.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Що таке електропривод? URL: https://elprivod.nmu.org.ua/ua/entrant/electricdrive.php (дата звернення: 26.11.2024).

2. Панкратов А.І. Системи керування електроприводами. Видання 2: навч. посіб. Краматорськ: ДДМА, 2018. 225 с.

3. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Основи електроприводу» / Уклад.: Андрійчук В.А, Філюк Я.О. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2024. 49 с.

4. Пижов В.М., Красношапка Н.Д., Островерхов М.Я. Електропривод: Механіка електроприводу. Електромеханічне перетворення енергії та електромеханічні властивості двигунів постійного струму. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 198 с.

5. Донець О. В. Теорія електропривода: консп. лекцій. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 148 с.

6. Пересада С. М., Ніконенко Є. О. Бездавачеве керування двигуном постійного струму. *Електромеханічне перетворення енергії*. 2021. № 58. С. 23–29.

7. Пересада С. М., Ніконенко Є. О., Панченко О. Я., Строєвий С. О. Бездавачеве керування кутовою швидкістю двигунів постійного струму на основі натуральних властивостей стійкості. *Електротехнічні комплекси та системи.* 2025. № 70. С. 51–57.

8. Samotiy V., Horun R. DC Motor Control System with Optimization of the Transient Duration. *Information Systems and Technologies in Modeling and Management.* 2023. Vol. 84, No 4. P. 23–29.

9. Halchenko V. Y., Trembovetska R. V., Tychkov V. V. Design of a Taguchi-GRA Optimized PID and Adaptive PID Controllers for Speed Control of DC Motor. *Archives of Electrical Engineering*. 2021. Vol. 70, No 4. P. 759–775.

10. Nakonechnyi M., Ivakhiv O., Viter O., Nakonechnyi Y., Brezvyn Y. A Motor Speed Control System Simulation. International Journal of Computing. 2023. Vol. 22, No 2. P. 211–220.

11. Messaadi N., Amroun A. Speed Control of DC Motor Using Fuzzy PID Controller. arXiv preprint. URL: https://arxiv.org/abs/2108.05450 (дата звернення: 05.09.2025).

12. Masoud A. A., Abu-Ali M., Al-Shaikhi A. Experimental Determination of an Extended DC Servo-Motor State Space Model. arXiv preprint. URL: https://arxiv.org/abs/2001.03915 (дата звернення: 05.09.2025).

13. Madonski R., Łakomy K., Stankovic M., Shao S., Yang J., Li S. Robust Converter-Fed Motor Control Based on Active Rejection of Multiple Disturbances. URL: https://arxiv.org/abs/2008.12596 (дата звернення: 25.09.2025).

14. Gad E., Pimentel J. An Algebraic Approach for the Stability Analysis of BLDC Motor Controllers. URL: https://arxiv.org/abs/2007.01387 (дата звернення: 11.10.2025).

15. Абрамов І. В., Корнієнко А. С. Порівняння методів ПІД-регулювання швидкості двигуна постійного струму. *Науковий вісник НТУ «ХПІ».* 2022. № 4. С. 47–53.

16. Ігнатенко О. Г., Савченко М. В. Моделювання системи автоматичного керування двигуном постійного струму у MATLAB/Simulink. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2021. № 6. С. 112–118.

17. Prasad P., Kumar R. Performance Analysis of DC Motor Speed Control Using Adaptive Neural Network. *Journal of Electrical Systems and Information Technology.* 2022. Vol. 9, No 1. P. 67–75.

18. Luo X., Zhang Y., Li H. Sliding Mode Control for DC Motor Speed Regulation under Load Disturbance. *IEEE Access.* 2020. Vol. 8. P. 118345–118354.

19. Ткачук К.Н. Охорона праці та промислова безпека: навч. посіб. / К.Н. Ткачук та ін. Київ: Основа, 2014. 823с.

20. Зеркалов Д. В. Охорона праці в галузі. Київ: Основа. 2011. 551с.

21. Кепич Т.Ю. Охорона праці в галузі / Т.Ю. Кепич та ін. Київ: КНУ, 2013. 255с.

22. ДСТУ 7238:2011 Система стандартів безпеки праці. Засоби колективного захисту працюючих. Чинний від 14.03.2011. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2011. 78 с.

«ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Науково-дослідна частина

Наукове товариство студентів, аспірантів і докторантів

Рада молодих вчених

РАДА МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ЗНУ НАУКОВЕ ТОВАРИСТВО ЗНУ

ЗБІРНИК

наукових праць студентів,

здобувачів PhD, докторантів і молодих вчених

«МОЛОДА НАУКА-2025»

Том V

«Секції Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету»

Запоріжжя
2025

2025=УДК: 001 (06)
М 754

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Бондар О.Г. – голова оргкомітету, в.о. ректора;
Васильчук Г.М. – заступник голови оргкомітету, проректор з наукової роботи;.
Амінов Р.Ф. – завідувач навчально-науково-дослідної лабораторії клітинної та організменної біотехнології науково-дослідної частини, голова Ради молодих вчених ЗНУ;
Арабаджиєв Д.Ю. – начальник науково-дослідної частини;
Бєлоконь К.В. – заступник директора з наукової роботи Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні ЗНУ;
Будько Д.З. – голова НТСАД ЗНУ;
Вербицька Т.А. – голова НТСАД біологічного факультету;
Гора С.М. – голова НТСАД факультету іноземної філології;
Євтушенко Д.С. – старший викладач кафедри конституційного та адміністративного права;
Єгорова В.С. – голова НТСАД математичного факультету;
Залужна М.В. – доцент кафедри англійської філології та лінгводидактики;
Зубцова Ю.Є. – доцент кафедри дошкільної та початкової освіти;
Казакова О.М. – доцент кафедри всесвітньої історії та міжнародних відносин;
Кайшева Д.О. – голова НТСАД факультету менеджменту;
Каплун К.Р. – г олова НТСАД факультету історії та міжнародних відносин;
Караулова С.І. – професор кафедри фізичної кульї ури і спорту;
Ковпак В.А. – професор кафедри соціальних комз иікацій та інформаційної діяльності;
Козуб Д.К. – голова НТСАД факультету соціальіної педагогіки та психології;
Копійка В.В. – доцент кафедри фізіології, імунології і біохімії з курсом цивільного захисту та медицини;
Леонгьєва В.В. – доцент кафедри фундаментальної та прикладної математики;
Лепська Н.В. – доцент кафедри політології;
Линенко А.В. – доцент кафедри управління персоналом і маркетингом;
Ляхов Г.І. – голова НТСАД юридичного факультету;
Меркулова О.В. – старший викладач кафедри української мови;
Олійник О.М. – доцент кафедри бізнес-адміністрування і менеджменту зовнішньо-економічної діяльності;
Проскура О.Д. – голова НТСАД економічного факультету;
Рибка Д.О. – голова НТСАД факультету журналістики;
Саражина Є.В. – голова НТСАД факультету фізичного виховання, здоров'я та туризму;
Тарабан Є.В. – голова НТСАД Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні ЗНУ;
Трипольська О.О. – провідний фахівець Центру наукової роботи студентів НДЧ;

Книш Іван
магістрант 2 курсу ІННІ ім. Ю. М. Потебні ЗНУ
Наук. кер.: к.т.н., доц. Небеснюк О.Ю.

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Електронна перетворювальна система - система, що складається з електродвигуна, перетворювального, і керуючого пристроїв, призначена для приведення в рух виконавчих органів робочої машини й керування цим рухом. Так, електронні перетворювальні системи одержали в наш час широке застосування в багатьох сферах промисловості. Основним елементом, що безпосередньо перетворює електричну енергію в механічну, є електричний двигун, що найчастіше управляється за допомогою відповідних перетворювальних і керуючих пристроїв з метою формування статистичних і динамічних характеристик, що відповідають вимогам виробничого механізму[1].

Електродвигун, призначений для перетворення електричної енергії в механічну або навпаки. Система керування, що складається з силового перетворювача, керуючого пристрою, й датчиків зворотних зв'язків. Перетворювач призначений для живлення двигуна й створення керуючого впливу на нього. Він перетворює рід струму або напруга, або частоту або змінює інші показники якості електричної енергії, підведеної до двигуна. Пристрій керування перетворювачем, одержує інформацію про поточний стан системи й технологічного процесу від датчиків зворотних зв'язків. За допомогою цих датчиків струм, напруга, потужність двигуна або інші його електричні параметри, швидкість, момент або зусилля й положення виконавчого органу перетворюються у пропорційні цим параметрам електричні сигнали, які й подаються в керуючий пристрій. Поточний стан системи й технологічного процесу порівнюється із заданим і при наявності неузгодженості утворюється сигнал, що впливає через перетворювач на всю систему в напрямку усунення виниклої неузгодженості з необхідною точністю й швидкодією [2].

Авторами запропоновано електронну систему цифрового керування двигунами постійного струму. Для забезпечення захисту привода від токів короткого замикання, перенавантажень, та при необхідності гальванічної розв’язки мережі живлення та силової частини привода передбачено блок захисної комутації (БЗК). Силовий блок (БС) включає в себе силовий трансформатор (Т), що перетворює напругу мережі живлення до напруги, що потребується для живлення навантаження та ланцюгів живлення керування системи. Керований випрямляч (КВ), побудований на тиристорах і призначений для перетворення змінної напруги в постійну та живлення навантаження (Н). Вихідні формувачі (ВФ) забезпечують гальванічну розв’язку між низьковольтними ланцюгами керуючої напруги та високовольтною напругою наведеною на тиристори. Блок керування, до складу якого включені система імпульсно-фазового керування (СІФК), призначений для формування керуючих

імпульсів для ввімкнення тиристорів синхронно до відповідних фаз мережі живлення. Система автоматичного регулювання (САР) забезпечує плавне регулювання параметрів напруги завдання та зворотного зв’язку. ДШ і ДС - під’єднання датчиків струму та швидкості.

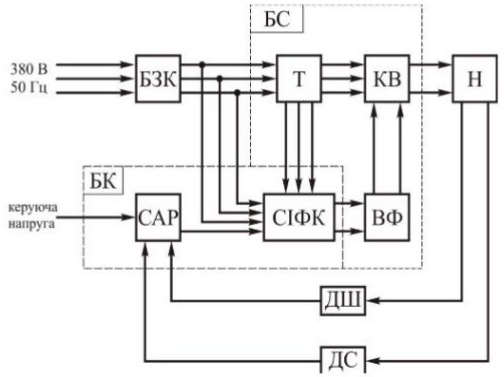


Рисунок – Структурна схема системи керування двигунами

Повністю цифрове рішення системи автоматичного регулювання і системи імпульсно-фазового курування дозволило збільшити функціональність і розширити сервісні функції. Застосування мікроконтролера дозволило поліпшити масогабаритні показники.

Література

1. Електродвигуни постійного струму. Фарватер. URL: https://surl.li/bvuvlv (дата звернення 05.03.2025)
2. Електродвигуни. Приводні системи. URL: https://surl.li/yjvmcz (дата звернення 15.03.2025)

Краснокутський Володимир
здобувач PhD 2 року навчання ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ
Наук. кер.: доктор техн. наук, проф. Критська Т.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ СИЛОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

Макроекономічні підходи McKinsey свідчать, що напівпровідникова промисловість зростає із середньорічними темпами приросту від 6 до 8% і досягне до 2030 року ~ 1 трильйона доларів США Одним із головних орієнтирів