

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра мікроелектронних та електронних інформаційних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

на тему: Автоматизація та розробка системи
керування електричними приводами

Виконав: студент II курсу, групи 8.15333
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна
техніка

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Мікроелектронні інформаційні
системи

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації _____

(код і назва спеціалізації)

Жбаліра Ігор
(ініціали та прізвище)

Керівник професор, к.т.н. Ніконова З.Н.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент д-р, директорка кафедри Радіоелектроніки НУ
«Дніпровецька політехніка»
Величкова О.Ф.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2020

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ**

Кафедра мікроелектронних та електронних інформаційних систем
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 153 «Мікро- та наносистемна техніка»
(код і назва)
Освітня програма Мікроелектронні інформаційні системи
(код і назва)
Спеціалізація _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Критська Т.В.

“ 07 ” 18 листопада 2020 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)**

Кбайдаш Ігор

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) “Формування та розробка системи керування електричним приводом”

керівник роботи Мікомова З.Н. к.т.н., професор,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом ЗНУ від “ 25 ” 05 2020 року № 600-с

2 Строк подання студентом роботи 28.11.20

3 Вихідні дані до роботи Н-4т) I екср.с = 70А; максім. оберти
двигуна - 1000 об/хв; U двигуна = 120В; момент інерції -
- 0,134 кг/м; U тахометра та генератора - 1000 об/хв.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1- знайти основних вузлів приводу керування робочого інструменту; 2- Розробити електричної схемою керування та системи керування електричним приводом 3- ТЕО, 4- охарактеризувати та оцінити його технічні параметри

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

1- Сх. електричної схеми керування е. приводом; 2- Висновок до роботи. Сх. е. приводиного

- 13-структурне схемі системи іншими-родового Керування
 14-структурна модель коралі робото інструментів
 15-Система керування. Сх. в. призначення;
 16-Алгоритм роботи мікроконтролера;
 17-Коробочне розширення системи керування;
 18-Модуль роботи системи керування;
 19-Технологія з'ясування плати
- 6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
I	Миконова З.А., професор		
II	Миконова З.А., професор		
III	Миконова З.А., професор		
IV	Миконова З.А., професор		

7 Дата видачі завдання 01 листопада 2020р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Приміт
1	Вступ	01.07.20 - 11.08.20	
2	Аналіз системних вихідних умов роботи мікроконтролера	12.08.20 - 21.09.20	
3	Розробка електронної системи керування та системи керування електромотором	22.09.20 - 01.01.20	
4	ТЕО, оптимізація системи безпеки	08.09.20 - 28.09.20	
5	Захист кваліфікаційної роботи	29.09.20 - 28.11.20 11.12.2020	

Студент
(підпис)

Коваленко Тарас
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту)

(підпис)

Миконова З.А.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер

(підпис)

Верховкін А.А.
(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра мікроелектронних та електронних інформаційних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

на тему **Дослідження волоконно-оптичні системи передачі інформації
та розробка фотоприймального пристрою**

Виконав: студент II курсу, групи 8.1539-з
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна
техніка

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Мікроелектронні інформаційні
системи

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації _____

(код і назва спеціалізації)

Кбайдат Імад

(ініціали та прізвище)

Керівник Ніконова З.А.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент _____

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2020

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить 105 стор., 35 рис., 28 табл., 5 додатків, 26 джерел літератури.

Об'єкт дослідження - привод подачі робочого інструмента металообробних верстатів.

Ціль роботи – розробка електронної перетворювальної системи для керування електричним приводом.

Задачі роботи - розробка структурної схеми привода; розрахунок та вибір трансформатора й керованого випрямляча; розрахунок ланцюга захисту від перевантаження; розробка системи імпульсно-фазового керування та алгоритму роботи мікроконтролера як СІФК; розробка системи автоматичного керування та системи автоматичного регулювання.

Методика досліджень – математичні розрахунки та схемотехнічне моделювання.

Результати впроваджень - розроблений привід має повністю цифрове рішення системи автоматичного регулювання і системи імпульсно-фазового керування, що дозволило збільшити функціональність.

Прогнозні пропозиції - привод може застосовуватись у промисловості для керування двигунами постійного струму металообробних верстатів

СИСТЕМА ІМПУЛЬСНО-ФАЗОВОГО КЕРУВАННЯ,
ТИРИСТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, МІКРОСХЕМА,
МІКРОКОНТРОЛЛЕР, КОМПАРАТОР, ТЕТРОІД.

Дипломна робота виконана на АТ «Запорізький феросплавний завод» та в ІННІ ЗНУ на кафедрі мікроелектронних та електронних інформаційних систем в період з 01.02.2020 по 28.11.2020 року.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
I АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ВУЗЛІВ ПРИВОДУ ПОДАЧІ РОБОЧОГО ІНСТРУМЕНТА	8
1.1 Випрямлячі	12
1.2 Система керування	17
1.3 Система регулювання.....	22
2 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ.....	24
2.1 Розробка структурної схеми привода	24
2.2 Розрахунок силової частини	26
2.2.1 Розрахунок трансформатора.....	28
2.2.2 Розрахунок керованого випрямляча	31
2.2.3 Розрахунок ланцюга захисту від перенавантаження	34
2.3 Розробка системи імпульсно-фазового керування.....	36
2.4 Розрахунок системи імпульсно-фазового керування.....	43
2.4.1 Розрахунок схеми фільтра	43
2.4.2 Розрахунок граничного елемента.....	45
2.4.3 Розрахунок схеми вимірювання напруги на якорі двигуна	46
2.4.4 Розрахунок схеми випрямляча	47
2.4.5 Розробка алгоритму роботи мікроконтролера як СІФК	48
2.4.6 Розробка алгоритму вирахування помилок	50
2.5 Розробка системи автоматичного керування.....	55
2.6 Розрахунок системи автоматичного регулювання	63
2.6.1 Розрахунок схеми подільника напруги зворотного зв'язку за швидкістю.....	63
2.6.2 Розрахунок схеми зворотного зв'язку за струмом	64
2.6.3 Розрахунок схеми визначення напрямку обертання двигуна	65
2.6.4 Розробка алгоритму роботи мікроконтролера.....	65

	6
2.6.4.1 Розробка основного алгоритму	65
2.6.4.2 Розробка роботи ПД – регулятора	69
2.6.5 Моделювання	72
3 ТЕХНІКО - ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	75
3.1 Визначення витрат на матеріали напівфабрикати і комплектуючі вироби	76
3.2 Порівняльний аналіз подібних систем керування за критеріями	79
СІФК	80
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА	85
4.1 Умови промислової санітарії.....	85
4.2 Електробезпека	88
4.3 Пожежна безпека	92
4.4 Розрахунок захисного заземлення приладу	94
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	99
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	100

ВСТУП

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, що задає 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 сигнали від пристрою, що задає, а 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 органа, перетворюються у пропорційні цим параметрам електричні сигнали, які й подаються в керуючий пристрій. У ньому поточний стан системи й технологічного процесу рівняється із заданим і при наявності неузгодженості виробляється керуючий сигнал, що впливає через перетворювач на всю систему в напрямку усунення виниклої неузгодженості з необхідною точністю й швидкодією[1,2].

I АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ВУЗЛІВ ПРИВОДУ ПОДАЧІ РОБОЧОГО ІНСТРУМЕНТА

На електронну перетворювальну систему покладають дві найважливіші взаємно зв'язані функції: електромеханічне перетворення енергії і керування технологічним процесом установки. При керуванні технологічним процесом установки необхідно управляти потоком електричної енергії таким чином, щоб механічні змінні (момент двигуна, швидкість, прискорення, положення його робочого органа й т.п.) або підтримувалося на необхідному рівні, або змінювалися за заданими законами з необхідної за умовами технології точністю.

Тому що електрична енергія генерується й розподіляється головним чином у вигляді змінного струму, то для живлення електродвигунів постійного струму від мереж змінного струму необхідний керований перетворювач, за допомогою якого здійснюється перетворення енергії змінного струму в енергію постійного струму й регулюється її величина.

Регулювання можна здійснити найпростішими засобами - шляхом зміни параметрів α (поток двигуна), $R_{\text{яц}}$ (опору обмотки якоря), $U_{\text{я}}$ (напруги якоря) у розімкнутій системі електропривода. Однак точність цього способу регулювання обмежена, тому в багатьох випадках таке регулювання не може забезпечити необхідні режими роботи й відповідні показники. У зв'язку з удосконалюванням технологій й автоматизацій робочих процесів вимоги до точності та якості регулювання безупинно зростають, які можуть бути досягнуті застосуванням більш якісних систем регулювання електропривода замкнених різними зворотними зв'язками, так званих замкнених систем регулювання[2].

Відомі два способи автоматичного регулювання змінних систем: регулювання по відхиленню координати від заданого значення за допомогою зворотного зв'язку по регульованій змінній і регулювання по збудженню.

На практиці необхідно управляти наступними функціями двигуна постійного струму: швидкістю, крутним моментом і напрямком обертання. Швидкість пропорційна зворотній електрорушійній силі якоря та зворотно пропорційна магнітному потоку. Крутний момент пропорційний току якоря та магнітному потоку. Напрямок обертання залежить тільки від відповідності полярностей напруги на якорі та напруги на обмотці збудження. Отже, необхідно управляти:

а) напругою на якорі. Зворотна електрорушійна сила є складовою напруги якоря. Таким чином, думаючи, що поле постійно, керування напругою якоря забезпечує повне керування швидкістю аж до точки, у якій напруга досягне максимального значення, на яке розрахований якір. Струм якоря також є функцією напруги на якорі, тому в діапазоні швидкостей до швидкості, що відповідає максимальній напрузі, крутний момент також управляється напругою. При наявності повного збурення максимальний крутний момент звичайно забезпечується від нульової швидкості до максимальної напруги якоря (номінальна швидкість).

б) напругою на обмотці збудження. Дозволяє визначити струм збудження й, отже, електрорушійну силу магнітного поля. Якщо напруга на обмотці збудження може змінюватися незалежно від напруги на якорі, швидкість може збільшуватися при повній потужності (максимальній напрузі якоря) за межами точки, в якій прикладена напруга і струм якоря максимальні, тому що крутний момент прямо пропорційний електрорушійній силі поля[3].

Максимальний крутний момент знижується, якщо швидкість збільшується шляхом ослаблення поля. Тому, власне кажучи, приводи постійного струму зі змінюваною швидкістю забезпечують керування напругою, що прикладається до якоря двигуна, а значить і струмом, що подаються до електродвигуна. Якщо потрібні швидкості вище номінальної, привод може обла-

днатися засобами керування полем. Для забезпечення керування швидкістю й крутним моментом у розширеному діапазоні для більше складних випадків використання електродвигуна, також може використатися окреме керування полем у межах робочого діапазону аж до номінальної швидкості. Якщо є відповідний зворотний зв'язок, стає можливим керування положенням.

Керування швидкістю привода здійснюється в такий спосіб: однофазна напруга, що прикладається до повністю керованої тиристорної мостової схеми та резистивного навантаження, створює пульсуючий струм, що починає протікати при відмиканні тиристора й припиняється при проходженні напруги живлення через нуль наприкінці кожного напівперіоду. Максимальна напруга забезпечується, коли кут відмикання α стане рівним нулю. Збільшення кута відмикання приводить до зменшення значення струму на виході. При роботі з індуктивним навантаженням, наприклад, двигуном, або при досить великому куті відмикання струм стає безперервним. Характерне запізнювання струму щодо напруги обумовлено частково індуктивною природою навантаження, частково затримкою кута відмикання.

Зміна напрямку обертання виконується двома способами, залежно від конфігурації мостової схеми привода. Найпростіший повністю керованою тиристорною мостовою схемою, призначеної для роботи від 3-фазного джерела живлення змінного струму, є двополуперіодна схема. Однак така схема випрямляючого моста не дозволяє змінювати полярність на виході. Для такого типу, називаного одно квадрантним або однокінцевим, для зміни напрямку обертання потрібне забезпечення можливості зовнішньої комутації клем двигуна. Для деяких застосувань дана проста система є гарним, практичним рішенням. Однак якщо застосування двигуна таке, що потрібне здійснення повного керування його роботою в обох напрямках з можливістю швидкої й частішої зміни напрямку крутного моменту, необхідно використати два зустрічно-паралельних мости. Така конфігурація забезпечує повне керування, як при прямому, так і зворотному напрямку обертання привода, а також гальмування у зворотному напрямку без необхідності зміни полярності підключення

контакторів. Дана конфігурація називається чотириквADRантною. Якщо потрібне гальмування при роботі з одно квADRантним приводом, необхідно використати зовнішню схему (динамічне гальмування). У цьому випадку вповільнення не буде ні керованим, ні лінійним.

Сучасні засоби цифрової обчислювальної техніки дозволяють розширити функції систем керування, регулювання й контролю стану перетворювачів і за рахунок цього поліпшити основні техніко-економічні показники останніх. Так, наприклад, можуть бути поліпшені енергетичні, динамічні, характеристики перетворювачів, точність та надійність, а також реалізовані більш якісні системи контролю, захисту й діагностики. При цьому може бути досягнутий високий рівень уніфікації апаратних засобів різних типів перетворювальних пристроїв за рахунок можливості їхнього програмування під конкретні функції й завдання. Основні функції, які виконуються програмувальними засобами обчислювальної цифрової техніки в перетворювачах, є наступні:

- а) реалізація законів формування керуючих імпульсів ключових елементів перетворювача;
- б) керування режимами роботи перетворювача;
- в) захист основних вузлів і елементів при виникненні зовнішніх і внутрішніх аварій і ушкоджень;
- г) контроль і діагностика стану функціональних вузлів і елементів перетворювача;
- д) обмін інформацією між перетворювачем і іншими об'єктами або оператором.

Реалізація законів проходження керуючих імпульсів ключових елементів, як правило, містить у собі процеси автоматичного регулювання вихідних параметрів перетворювача. Крім того, при необхідності може здійснюватися формування заданого гармонійного складу вхідних і вихідних струмів і напруги перетворювача, коефіцієнта потужності по входу або виходу та інші параметри[3].

1.1 Випрямлячі

За завданням запропоновано розглянути перетворювач постійного струму, у структуру якого входить керований випрямляч, система автоматичного регулювання та система керування.

Випрямляч - це пристрій, призначений для перетворення змінної напруги в постійне. Основними елементами випрямляча є трансформатор і вентиля (тиристри), за допомогою яких забезпечується протікання струму в навантаженні, у результаті чого змінна напруга перетвориться в пульсуюче. Розглянемо далі трифазну двонаправлену шестипульсну схему випрямлення.

Схема трифазного мостового випрямляча містить випрямний міст із шести тиристорів. У нижній групі вентиля з'єднані катодами (катодна група), а у верхньої – анодами (анодна група). Навантаження підключається між точками з'єднання катодів і анодів вентилів. Схема допускає з'єднання як первинних, так і вторинних обмоток трансформатора зіркою або трикутником. Вона може бути застосована й без трансформатора.

Зміна величини напруги, що прикладається до якоря двигуна досягається шляхом, моментів відмикання тиристорів у функції керуючого сигналу U_k та зображена на рисунку 1.1. СК призначена для генерування й формування імпульсів керування певної тривалості та форми, розподіл їх по відповідних фазах і зміни моментів подачі цих імпульсів на керуючі електроди тиристорів.

У трифазній мостовій схемі одночасно повинні працювати два тиристири: один з катодної (непарної) групи, іншої з анодної (парної) групи, і навантаження в будь-який момент часу приєднуються до двох фаз вторинної обмотки трансформатора. Керуючі імпульси, що відмикають тиристири непарної групи подаються з випередженням на 180° стосовно тиристорів парної групи, приєднаним до тих же виводів вторинної обмотки, тому що перші працюють при позитивних значеннях фазних напруг на анодах, другі - при негативних на катодах.

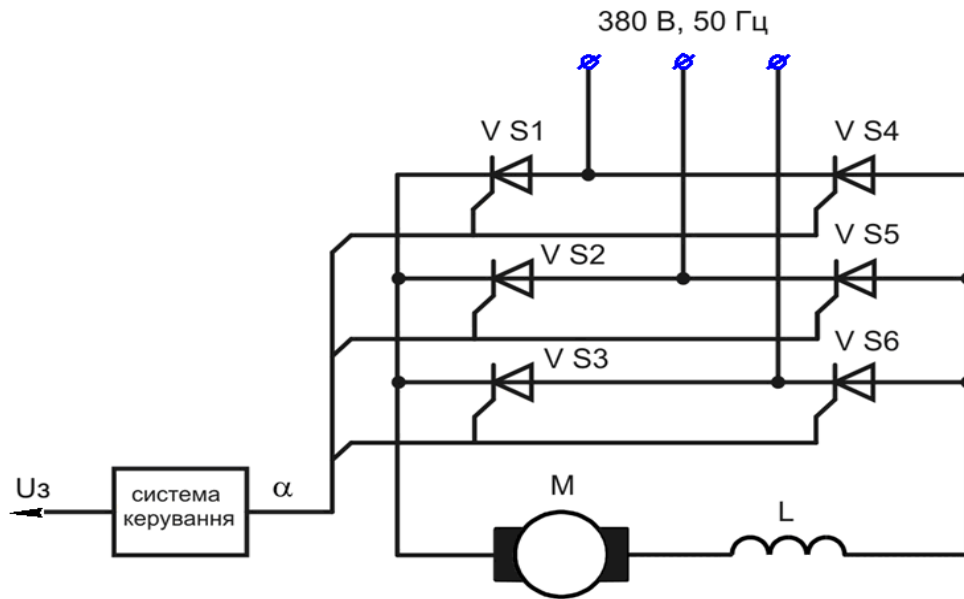


Рисунок 1.1 - Принципова схема трифазного мостового тиристорного перетворювача

Роботу схеми випрямлення проілюстровано при роботі на активне навантаження, діаграмами: миттєві значення фазних напруг на тиристорах; криві випрямленої напруги, яке отримуємо шляхом підсумовування миттєвих значень напруг працюючої в цей момент часу вентилів, криві анодного струму зображені на рисунку 1.2.

Для цього режиму ($0^{\circ} \leq \alpha \leq 60^{\circ}$) величина середнього значення випрямленої напруги визначається за формулою (1.1).

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha, \quad (1.1)$$

де U_d – середнє значення випрямленої напруги, В;

U_{d0} - величина випрямленої напруги при $\alpha = 0^{\circ}$, В;

α - кут регулювання, градус.

З рисунку 1.3 бачимо, що через тиристор, що вступає в роботу, струм може проходити тільки за умови, що одночасно відкривається або вже відк-

ритий відповідний (суміжний по порядковому номеру) тиристор іншого плеча моста.

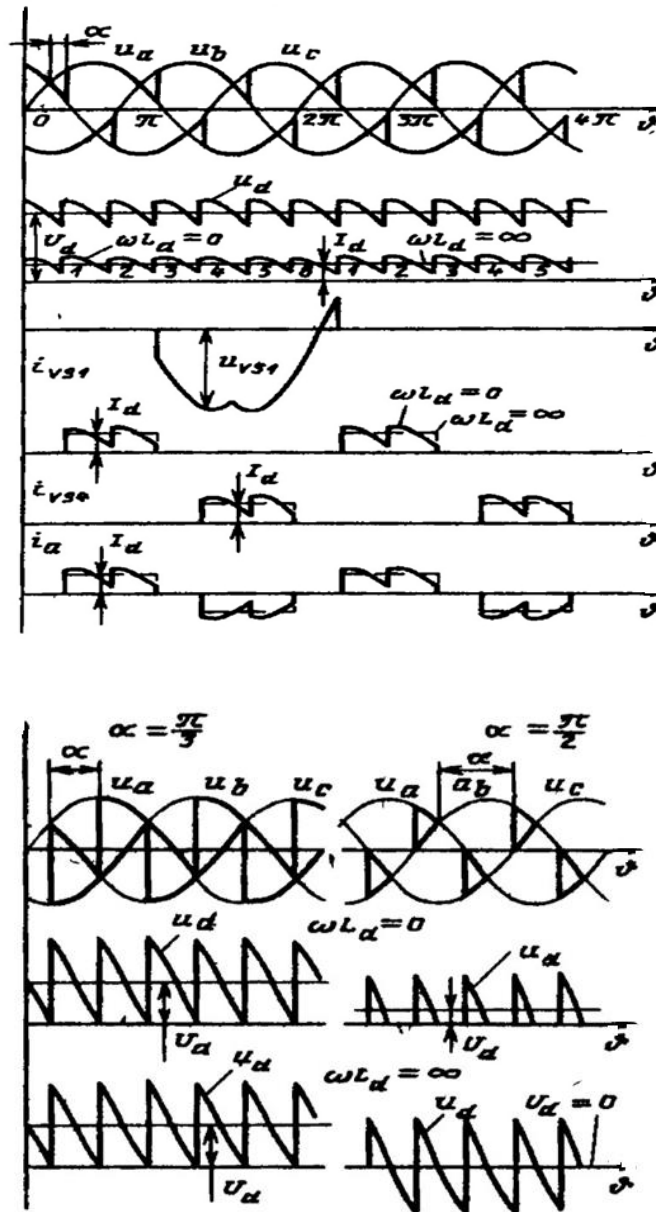


Рисунок 1.2 – Криві миттєвих значень фазної напруги, випрямленої напруги та анодних токів при роботі на активне навантаження

$$U_d = U_d \cos(60^\circ - \alpha) \quad (1.2)$$

Звідси слідує, що граничний кут регулювання, при якому $U_{d0} = 0$, є кут $\alpha_{\max} = 120^\circ$.

Залежність середнього значення випрямленої напруги від кута α являє собою регулювальну характеристику перетворювача: $U_d = f(\alpha)$

На рисунку 1.4 представлені регулювальні характеристики побудовані за рівняннями (1.1) і (1.2).

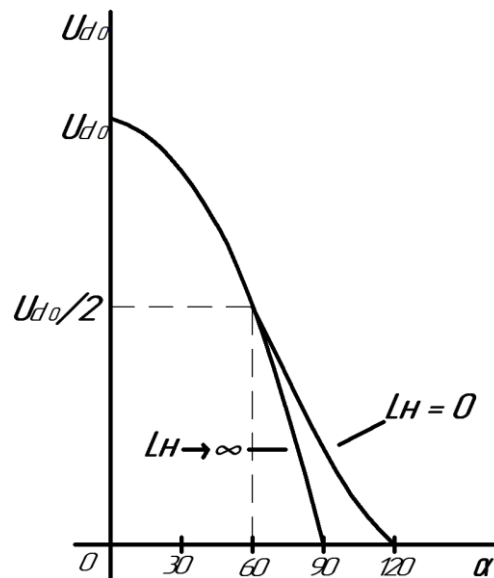


Рисунок 1.4 – Регулювальні характеристики трифазного мостового керованого випрямляча

З формули (1.1) і (1.2) випливає, що змінюючи кут регулювання α шляхом зміни величини сигналу керування U_d який подається на вхід СК, можна змінювати величину випрямленої напруги, яка прикладена до якоря двигуна [3,4].

1.2 Система керування

Системи для керування тиристорними випрямлячами будуються на основі систем імпульсно-фазового керування. Основною задачею системи імпульсно-фазового керування середнім значенням випрямленої напруги U_d тиристорного перетворювача є отримання потрібних залежностей U_d від напруги керування $U_{кер}$. В ідеальному випадку випрямлена напруга визначається за формулою (1.3).

$$U_d = K U_{кер}^2, \quad (1.3)$$

де K – постійна величина, не залежна від режимів мережі живлення та від навантаження в ланцюзі випрямленого струму.

Дія на напругу U_d відбувається шляхом зміни кута керування α . Пристрій, що змінює кут керування в залежності від напруги керування й є системою імпульсно-фазового керування. Вихідні сигнали СІФК представляють собою імпульси, параметри яких обираються відповідно до параметрів керуючих ланцюгів тиристорів і силової схеми тиристорного перетворювача.

Керування кутом α відбувається в основному двома способами:

а) синхронний спосіб характеризується відліком кута керування від визначеної фази напруги мережі живлення та визначається за формулою (1.4):

$$\alpha_i = \omega t_i - \theta_i, \quad (1.4)$$

де α_i – кут подачі i -го імпульсу керування, $\alpha_i = \omega t_i$ ($i = 1, 2, \dots$), град;

ω – кутова частота мережі, рад/с;

t – час, с;

p – число пульсацій перетворювача за період мережі;

θ_i – кут затримки, що регулюється, град;

θ – кут початку відліку фази за відношенням до напруги мережі, град;

б) асинхронний спосіб характеризується регулюванням інтервалів між імпульсами керування без однозначної явно вираженої «прив'язки» до фази мережі живлення та визначається за формулою (1.5).

$$\theta_i = \theta_{i1} + \frac{2d}{p} \int e_i f(t) dt, \quad (1.5)$$

Ця фазировка виконується за допомогою зворотного зв'язку за вихідним параметром тиристорного перетворювача: напруги U_d або току I_d .

Синхронні системи імпульсно-фазового керування можуть бути:

а) багатоканальними, що мають індивідуальний відлік кута керування для кожного каналу;

б) одноканальною, що має синхронізацію одного або декількох каналів.

Асинхронні системи керування звичайно бувають одноканальні.

Одноканальні СІФК мають загальний складовий інтегратор для отримання регульованого кута затримки $\theta_i = \theta(U_{\text{кер}})$. Це спрощує отримання великої симетрії імпульсів керування за симетрії напруги мережі живлення, оскільки виконання декількох інтеграторів з малою відмінністю їх параметрів становить собою складну технічну задачу.

Для реалізації залежностей $\theta_i = \theta(U_{\text{кер}})$ застосовують способи вертикального та тангенціального керування.

Перший спосіб заснований за принципом розгортаючого перетворення, сутність якого складається в визначенні моментів часу, в які змінюється знак суми періодичного сигналу, що розгортається, синхронного з напругою мережі живлення та сигналу керування. Імпульси керування видаються в ті моменти часу з урахуванням знаку похідної вказаної суми сигналів.

Другий спосіб складається з інтегрування сигналу керування починаючи з моменту синхронізації. Кут затримки α є пропорційним до часу зміни інтеграла до заданого рівня.

Сучасні СІФК будуються головним чином за першим способом. Другий спосіб доцільний лише в простіших малопотужних перетворювачах.

На сьогоднішній час найбільшого поширення отримала система імпульсно-фазового керування з напругою, що лінійно змінюється (зростає або спадає). Ця система використовується у таких перетворювачах як ЭТУ 3601, ТЕ, ТЕР, та у багатьох більш сучасних перетворювачах вона взята за основу, але з деякими змінами[4,5].

Система імпульсно-фазового керування складається із трьох ідентичних каналів фазозміщення та керуючого органа. Кожен канал системи імпульсно-фазового керування виконаний за принципом одноканального керування двома протифазними вентилями випрямляючого моста, що практично виключає асиметрію протифазних керуючих імпульсів. Канали фазозміщення виконані за "вертикальним" принципом керування з лінійно зростаючою однополярною опорною напругою.

Система імпульсно-фазового керування містить у собі наступні вузли:

- а) джерело напруги, що синхронізує формувач імпульсів;
- б) три формувачі імпульсів;
- в) керуючий орган;
- г) шість підсилювачів імпульсів;
- д) джерело живлення.

Формувач імпульсів, у свою чергу, складається з фільтра, двох граничних елементів, формувача синхронізуючих імпульсів, генератора пилкоподібної напруги, нуль-органа, RS – тригера, формувача тривалості імпульсів, розподільника імпульсів і двох підсилювачів імпульсів.

Схема працює в такий спосіб: синхронізуюча напруга, що надходить із джерела синхронізуючої напруги (вторинної обмотки трансформатора), зрушується фільтром на кут 30 електричних градусів. З виходу фільтра напруга

за допомогою двох граничних елементів перетворюється відповідно в проти-фазні прямокутні імпульси. Тривалість зазначених імпульсів визначає зону дозволу формування керуючих імпульсів відповідно для тиристорів анодної та катодної груп, що становить приблизно 176 електричних градуси, що викликає одночасне формування керуючих імпульсів у двох протифазних вентилях випрямного моста.

За сигналом "0" на виходах обох граничних елементів на виході формується синхроімпульс (сигнал "1"), яким здійснюється розряд інтегруючої ємності генератора пилкоподібної напруги до нуля. У момент зникнення синхроімпульсу напруга на виході генератора пилкоподібної напруги починає знову лінійно наростати від нуля до 10В.

Момент, коли напруга на виході генератора пилкоподібної напруги стає більше керуючої напруги (яке подається від керуючого органа), фіксується нуль-органом, що змінює свій стан з "1" на "0". При цьому RS – тригер перемикається і на його виході з'являється сигнал "0", що викликає появу на виході керуючого імпульсу тривалістю 10 – 15 електричних градусів. Цей імпульс проходить на вхід одного з підсилювачів "а" або "х" через розподільвач імпульсів відповідно до сигналів першого та другого граничних елементів.

Посилені імпульси для тиристорів анодної і для тиристорів катодної груп надходять на ввідні пристрої комплектів "Вперед" або "Назад", що здійснюють гальванічну розв'язку ланцюгів керування та силового ланцюга. RS – тригер після появи "0" на виході нуль-органа зберігає свій стан доти, доки з формувача синхронізуючих імпульсів на інший його вихід не надходить синхроімпульс, що підготовляє RS – тригер для видачі чергового керуючого імпульсу. RS – тригер може також підготуватися до видачі керуючого імпульсу сигналом із блоку логіки.

Підсилювач імпульсів зібраний за схемою складового транзистора, навантаженням якого є ввідні пристрої імпульсів, має два вводи: один для "свого" імпульсу, іншої для "чужого", що йде з іншого формувача імпульсу. Це

необхідно для одержання здвоювання імпульсів для трифазної схеми випрямлення[5].

Тимчасові діаграми напруг схеми системи імпульсно-фазового керування наведені на рисунку 1.5.

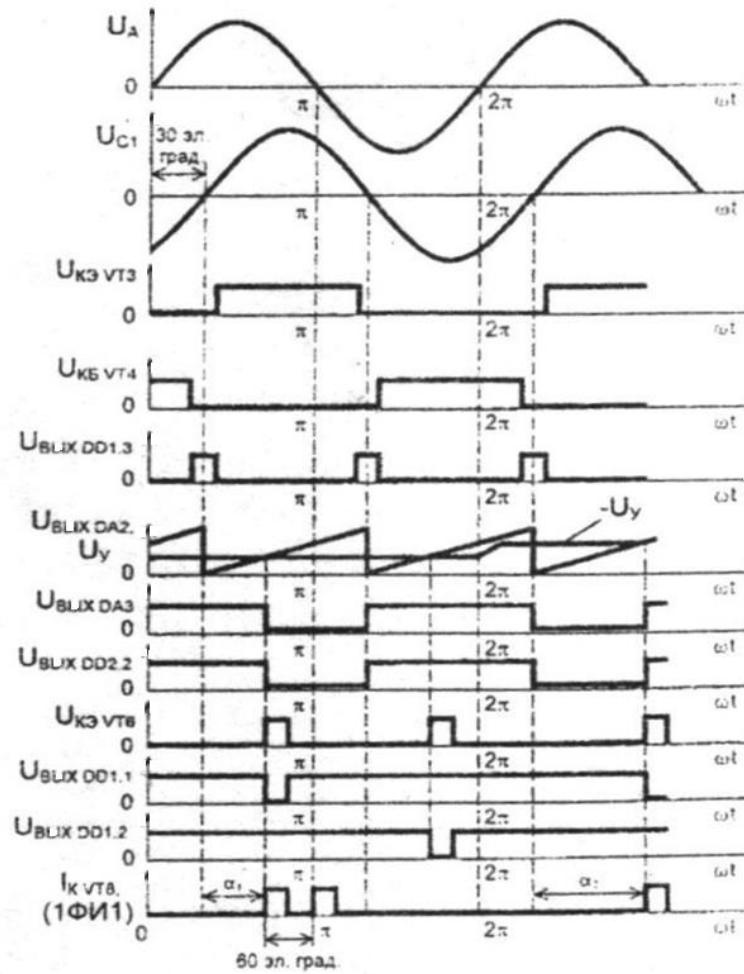


Рисунок 1.5 – Діаграми напруг системи імпульсно-фазового керування

1.3 Система регулювання

Для забезпечення сталої, безперервної роботи перетворювачів під навантаженням на верстатах та багатьох інших пристроях використовуються системи автоматичного регулювання.

Розвиток теорії і практики систем регулювання приводом, а також електроніки привели до створення аналогових систем регуляторів, що забезпечують високу швидкодію та точність роботи приводів. В основі аналогової системи регуляторів знаходиться операційний підсилювач. Операційний підсилювач – це підсилювач постійного струму з дуже великим коефіцієнтом підсилення за напругою та вхідним опором і малим вихідним опором. Застосування операційного підсилювача в якості регулятора визначається можливістю реалізації з високою точністю бажаних передаточних функцій і арифметичних дій із вхідними сигналами, а саме підсумовування, помноження та ділення сигналів, а також можливістю виконання різних функціональних пристроїв. При використанні операційного підсилювача в якості регулятора на його вході відбувається порівняння сигналів завдання та фактичного значення величини, що регулюється в виді сигналів струму, пропорційних вхідним напругам регулятора.

Автоматичні регулятори класифікуються за призначенням, принципом дії, конструктивними особливостями, виду використовуваної енергії, характеру зміни регулюючого впливу й т.п.

За принципом дії вони розділяються на регулятори прямої і непрямой дії. Регулятори прямої дії не використовують зовнішню енергію для процесів керування, а використають енергію самого об'єкта керування (регульованого середовища). Прикладом таких регуляторів є регулятори тиску. В автоматичних регуляторах непрямой дії для його роботи потрібен зовнішнє джерело енергії.

За родом дії регулятори діляться на безперервні та дискретні. Дискретні регулятори, у свою чергу, підрозділяються на релейні, цифрові та імпульсні.

За видом використовуваної енергії вони підрозділяються на електронні, пневматичні, гідравлічні, механічні та комбіновані. Вибір регулятора за видом використовуваної енергії визначається характером об'єкта регулювання та особливостями автоматичної системи.

За законом регулювання вони діляться на дво- чи трипозиційні регулятори, типові регулятори (інтегральні, пропорційні, пропорційно-диференціальні, пропорційно-інтегральні та пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори - скорочено І, ІІ, ІІД, ІІІ та ІІІД – регулятори), регулятори зі змінною структурою, адаптивні (самонастроювальні) та оптимальні регулятори. Двопозиційні регулятори знайшли широке поширення завдяки своїй простоті та малій вартості.

За видом виконуваних функцій регулятори підрозділяються на регулятори автоматичної стабілізації, програмні, коригувальні, регулятори співвідношення параметрів й інші[5,6].

Мета роботи - розробка електронної перетворювальної системи для керування електричним приводом.

Завдання роботи:

- розробка структурної схеми привода;
- розрахунок та вибір трансформатора й керованого випрямляча ;
- розрахунок ланцюга захисту від перевантаження;
- розробка системи імпульсно-фазового керування;
- розробка алгоритму роботи мікроконтролера;
- розробка системи автоматичного керування та регулювання;
- розробка схеми електричної принципової та топологія друкованої

плати.

2 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

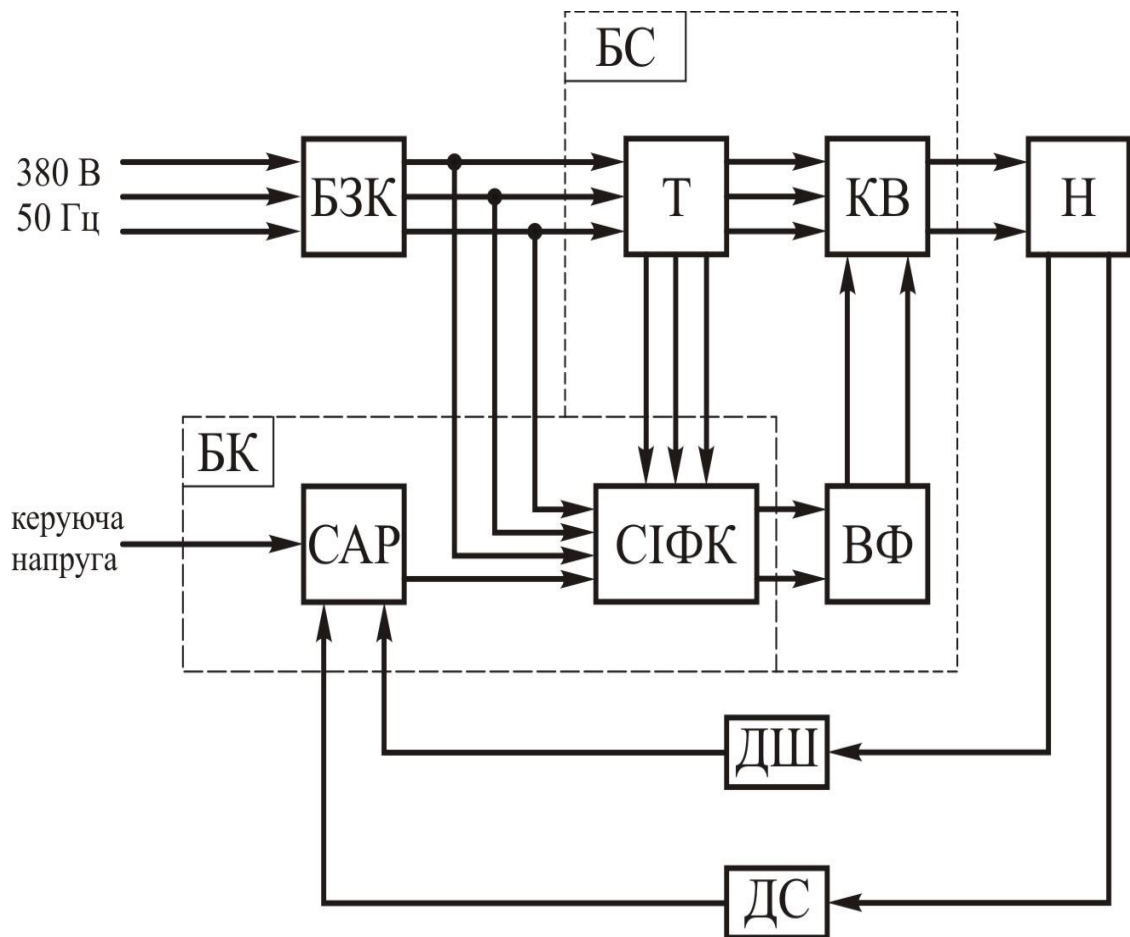
2.1 Розробка структурної схеми привода

Для забезпечення надійної та якісної роботи системи, привід повинен включати в себе наступні блоки:

а) Блок захисної комутації. Для забезпечення захисту привода від токів короткого замикання, перенавантажень, та при необхідності гальванічної розв'язки мережі живлення та силової частини привода. До блоку захисної комутації входять: швидкодіючі запобіжники, автоматичні вимикачі, захисні РС – ланцюги.

б) Блок силовий. Включає в себе силовий трансформатор, що перетворює напругу мережі живлення до напруги, що потребується для живлення навантаження та ланцюгів живлення керування приводом. Керований випрямляч, побудований на тиристорах і призначений для перетворення змінної напруги в постійне та живлення навантаження (двигуна). Вихідні формувачі забезпечують гальванічну розв'язку між низьковольтними ланцюгами керуючої напруги та високовольтною напругою наведеною на тиристорі.

в) Блок керування, до складу якого включені система імпульсно-фазового керування (надалі СІФК), призначену для формування керуючих імпульсів для ввімкнення тиристорів синхронно до відповідних фаз мережі живлення. Система автоматичного регулювання (САР), що забезпечує плавне регулювання параметрів напруги завдання та зворотного зв'язку [7].



- БЗК – блок захисної комутації;
 БС – блок силовий;
 Т – трансформатор;
 КВ – керований випрямляч;
 Н – навантаження;
 БК – блок керування;
 САР – система автоматичного регулювання;
 СІФК – система імпульсно-фазового керування;
 ВФ – вихідний формувач;
 ДШ – датчик швидкості;
 ДС – датчик струму.

Рисунок 2.1 – Структурна схема привода

2.2 Розрахунок силової частини

Вихідними даними для розрахунку привода існує двигун типу 47МВНЗС з параметрами, що наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні параметри двигуна 47МВНЗС

Момент двигуна, Н м	Струм якоря, А	Номінальні оберти двигуна, об/хв.	Напруга двигуна, В	Момент інерції, кг·м	Напруга тахо- генератора на 1000 об/хв
47	70	1000	120	0,134	20

Для найбільш повного використання двигуна за струмом на всіх швидкостях обертання, тиристори включаємо за трифазною мостовою схемою. Забезпечення роботи привода як у прямому напрямку обертання двигуна так і у реверсному, використовуємо двокомплектну зустрічно-паралельну мостову схему. На рисунку 2.1 представлена принципова схема трифазного мостового перетворювача, що працює у прямому та реверсному режимі.

Застосування трифазної мостової схеми дозволяє також:

- 1) створити рівномірне навантаження на всі три фази мережі;
- 2) зменшити пульсацію випрямленої напруги;
- 3) зменшити розрахункову потужність трансформатора;
- 4) підвищити коефіцієнт потужності.

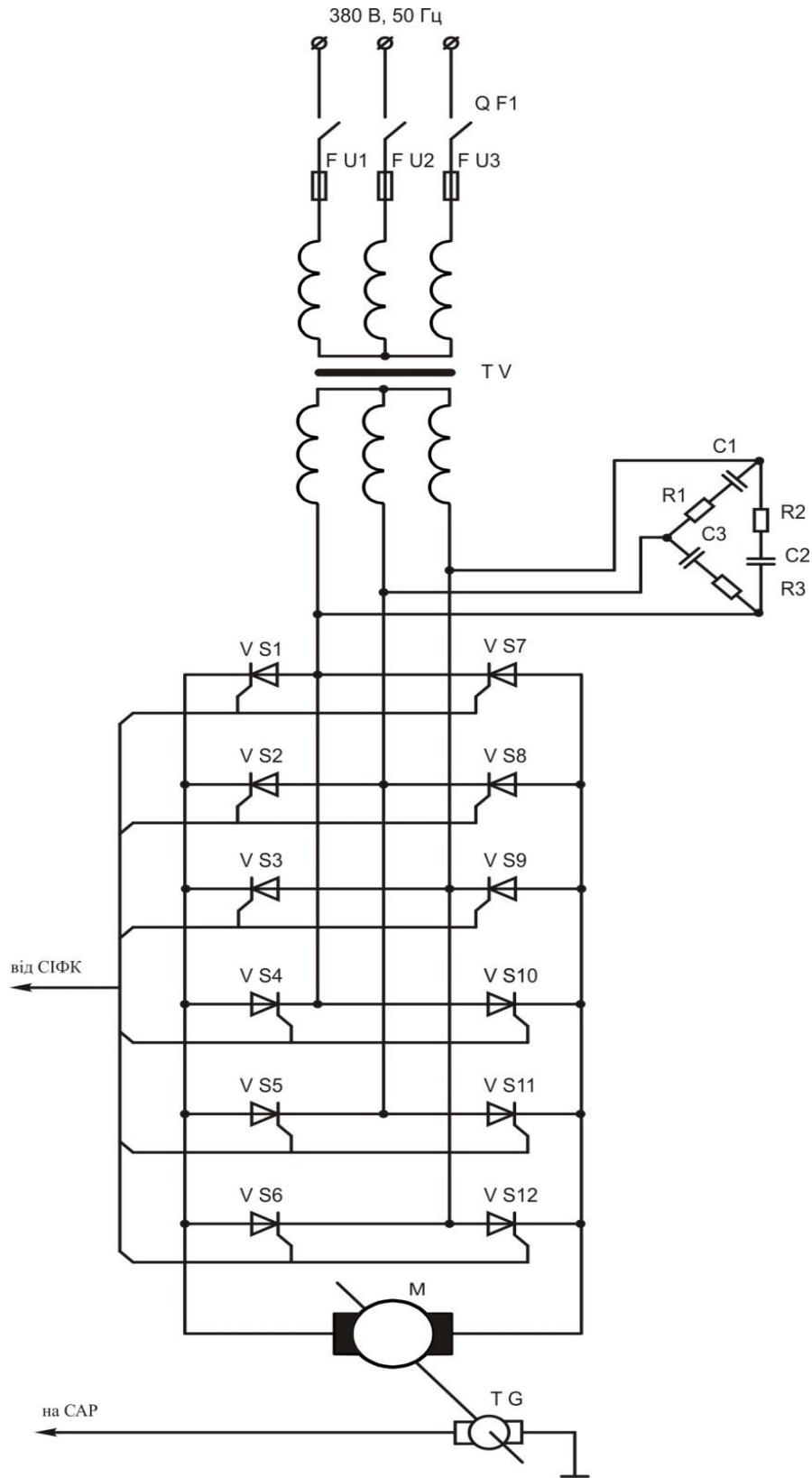


Рисунок 2.2 – Схема принципова трифазного мостового перетворювача

K_u - коефіцієнт схеми, що характеризує співвідношення напруг $U_{2\phi}/U_{d0}$, для трифазної мостової схеми $K_u = 0,428$.

$$U_2 = 1 \cdot 0,428 \cdot 1,15 \cdot 1,1 \cdot 120 = 64,97 \text{ (В)}$$

Приймаємо $U_{2\phi, \text{розр}} = 65 \text{ (В)}$

Лінійна напруга вторинної обмотки трансформатора визначається за формулою (2.3).

$$U_{2л} = 1 \cdot U_2 \cdot \sqrt{3}, \quad (2.3)$$

де $U_{2л}$ – лінійна напруга вторинної обмотки трансформатора, В.

$$U_{2л} = 1 \cdot U_2 \cdot \sqrt{3} = 1 \cdot 65 \cdot \sqrt{3} = 112,58 \text{ (В)}$$

Приймаємо $U_{2л} = 113 \text{ (В)}$.

Розрахункове діюче значення струму вторинної обмотки визначаємо за формулою (2.1.4).

$$I_2 = 1 \cdot I_i \cdot K_1, \quad (2.4)$$

де $I_{2 \text{ розр}}$ – діючий струм вторинної обмотки трансформатора, А;

K_1 – коефіцієнт схеми, що характеризує співвідношення струмів у випрямлячі (для 3-х фазної мостової схеми $K_1 = 0,817$).

$$I_2 = 1 \cdot 0,817 \cdot 1,1 \cdot 120 = 62,91 \text{ (А)}$$

Розрахункове діюче значення струму в первинній обмотці визначаємо за формулою (2.5).

$$I_1 = 1 \frac{I_2}{k}, \quad (2.5)$$

де $I_{1 \text{ розр.}}$ – діюче значення струму в первинній обмотці трансформатора,
А;

$k_{\text{тр}}$ – коефіцієнт трансформації.

Коефіцієнт трансформації визначаємо за формулою (2.6).

$$k_{\text{тр}} = 1 \frac{W_1}{W_2} = 1 \frac{U_1}{U_2}, \quad (2.6)$$

$$k_{\text{тр}} = 1 \frac{380}{113} = 3,368$$

$$I_1 = 1 \frac{62,91}{3,368} = 18,71(\text{ А})$$

На підставі отриманих даних з каталогу вибирають трансформатор, за умов виконання рівнянь наведених у формулах (2.7) – (2.10).

$$S \geq S_{\text{н}} \quad (2.7)$$

$$U_2 \geq U_{2 \text{ ном}} \quad (2.8)$$

$$I_2 \geq I_{2 \text{ ном}} \quad (2.9)$$

$$U_1 \leq U \quad (2.10)$$

Параметри обраного трансформатора наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри трансформатора

Тип трансформатора	Потужність, кВА	Напруга первинної обмотки, В	Напруга вторинної обмотки, В	Струм вторинної обмотки, А
НТС – 16,0	16,0	380	127	90

Зробимо перерахунок коефіцієнта трансформації та фазної напруги вторинної обмотки трансформатора в відповідності до формул (2.3) та (2.1.4).

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{380}{127} = 2,99$$

$$U_2 = \frac{U_1}{k} = \frac{380}{2,99} = 127,1 \text{ В}$$

2.2.2 Розрахунок керованого випрямляча

Для розрахунку керованого випрямляча достатньо розрахувати елементи однієї з мостових тиристорних схем, що працює у прямому або реверсному режимі, тому що вони є аналогічними одна до одної, а саме струм і напруга в обох схемах будуть однакові.

На рисунку 2.3 зображено принципову мостову схему для роботи перетворювача у прямому режимі.

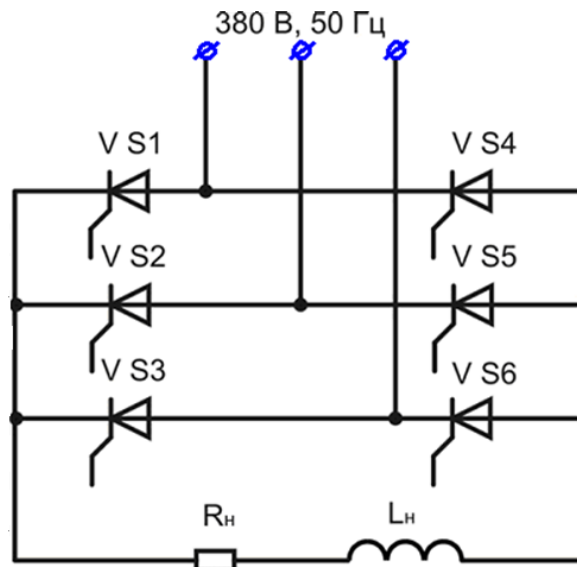


Рисунок 2.3 – Принципіальна мостова схема тиристорного перетворювача

Тиристор обирають за середнім струмом, що проходить через нього з урахуванням струму двигуна в перехідних режимах $(2...2,5)I_n$, умов охолодження тиристора та максимальної зворотної напруги.

Середнє значення струму тиристора I_{cp} при роботі на якір двигуна визначається за формулою (2.11).

$$I_{cp} = 1,25 \frac{I_n}{2m}, \quad (2.11)$$

де $K_{zi} = 2...2,5$ - коефіцієнт запасу за струмом;

I_n – струм двигуна, А;

K_{ox} – коефіцієнт, що враховує інтенсивність охолодження тиристора ($K_{ox} = 1$ за примусового охолодження, $K_{ox} = 0,25...0,35$ за природного);

$m_{тр}$ - число фаз трансформатора;

$$I_{cp} = 1,25 \cdot 2,5 \frac{270}{123} = 1145,83 \text{ ()}$$

Максимальна зворотна напруга на тиристорі, $U_{зв.маx}$ визначаємо за формулою (2.12).

$$U_{маx} = 1,8^2 \cdot K_{у.зв} \cdot U_{d0}, \quad (2.12)$$

де $K_{зн}$ – коефіцієнт запасу за напругою, що враховує можливість появи перенапруги на тиристорі ($K_{зн} = 1,5 \dots 1,8$);

$K_{у.зв}$ – коефіцієнт зворотної напруги для прийнятої схеми випрямлення (для 3-х фазної мостової схеми $K_{у.зв} = 1,045$);

U_{d0} - е.р.с. умовного холостого ходу перетворювача, В.

$$U_{d0} = 1 \frac{U_2}{u}, \quad (2.13)$$

де $U_{2ф}$ – фазна напруги вторинної обмотки трансформатора, В;

K_u – коефіцієнт схеми, що характеризує відношення напруг $U_{2ф} / U_{d0}$ (для трифазної мостової схеми $K_u = 0,428$)

$$U_{d0} = 1 \frac{73,3}{0,428} = 171,26 \text{ (В)}$$

Прийmemo $U_{d0} = 171 \text{ В}$.

$$U_{маx} = 1,8^2 \cdot 1,045 \cdot 171,26 = 322,14 \text{ (В)}$$

За обчислених величин $I_{ср}$ і $U_{зв.маx}$ обирають тиристор. При цьому повинні виконуватись умови, що наведені у формулах (2.14), (2.15).

$$I_{ср} < I_{н}, \quad (2.14)$$

$$U_{маx} < U_{н}, \quad (2.15)$$

де $I_{\text{доп}}$ – максимально допустимий середній струм, А;

$U_{\text{п}}$ – напруга, що повторюється, А.

Обираємо до встановлення тиристорно-тиристорну зборку параметри якої наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Параметри тиристорно-тиристорної зборки

Тип	Максимально припустимий струм, А	Максимально припустима зворотна напруга, В
IRK T F 152 – 04 FL	150	400

2.2.3 Розрахунок ланцюга захисту від перенавантаження

Для зменшення перенавантаження, що пов'язане з відключенням силового трансформатора, паралельно до вторинних обмоток підключають RC – ланцюги, що наведені на рисунку 2.2 Резистори та конденсатори ланцюгів захисту від перенавантаження є одного номіналу тому для розрахунків використовуємо один з ланцюгів.

Розмір ємності С знаходиться за формулою (2.16).

$$C = 55 \frac{I_{02}}{(K_{\text{допз}} - 1)U_{02}}, \quad (2.16)$$

де I_{02} – струм холостого ходу трансформатора, наведений до вторинної обмотки, А;

$K_{\text{допз}}$ – коефіцієнт припустимого перевищення номінальної зворотної напруги ($K_{\text{допз}} = 1,5 \dots 1,7$);

$U_{02\text{ф}}$ – вторинна фазна напруга трансформатора при холостому ході

випрямляча, В.

Струм холостого ходу визначаємо за формулою (2.17).

$$I_{02} = I_{01}^2, \quad (2.17)$$

де I_{01} – номінальний струм первинної обмотки, А.

Номінальний струм первинної обмотки визначаємо за формулою (2.18).

$$I_{01} = 0,05^2 I_1, \quad (2.18)$$

$$I_{01} = 0,05^2 42 = 2,1 \text{ (А)}$$

$$I_{02} = 2,1^2 = 2,99 = 6,279 \text{ (А)}$$

$$R = 55 \frac{6,279}{(1,7^2 + 1) 273,3} = \frac{345,345}{138,537} = 2,49 \text{ (Ом)}$$

Опір R визначаємо за формулою (2.19).

$$R = 0,52 \frac{U_{02}}{I_{02}}, \quad (2.19)$$

$$R = 0,52 \frac{73,3}{6,279} = 6,07 \text{ (Ом)}$$

Обираємо резистор з ряду E24 опором 6,2 (Ом)

Потужність P_R , розрахованого розрядного резистора визначаємо за формулою (2.20).

$$P_R = R I_R^2, \quad (2.20)$$

де I_R – струм, що проходить через резистор, А.

Струм, що проходить через резистор визначається за формулою (2.21).

$$I_R = 0,25^2 I_{02}, \quad (2.21)$$

$$I_R = 0,25^2 6,279 = 1,57 \text{ (A)}$$

$$P_R = 6,2^2 (1,57)^2 = 15,28 \text{ (Вт)}$$

Обираємо резистор МЛТ 15 – 6,2 Ом

Напруга на конденсаторі визначається за формулою (2.22).

$$U_c = 2,6 U_2, \quad (2.22)$$

$$U_c = 2,6^2 73,3 = 190,58 \text{ (В)}$$

Обираємо конденсатор 3,3 мкФ на 200 В

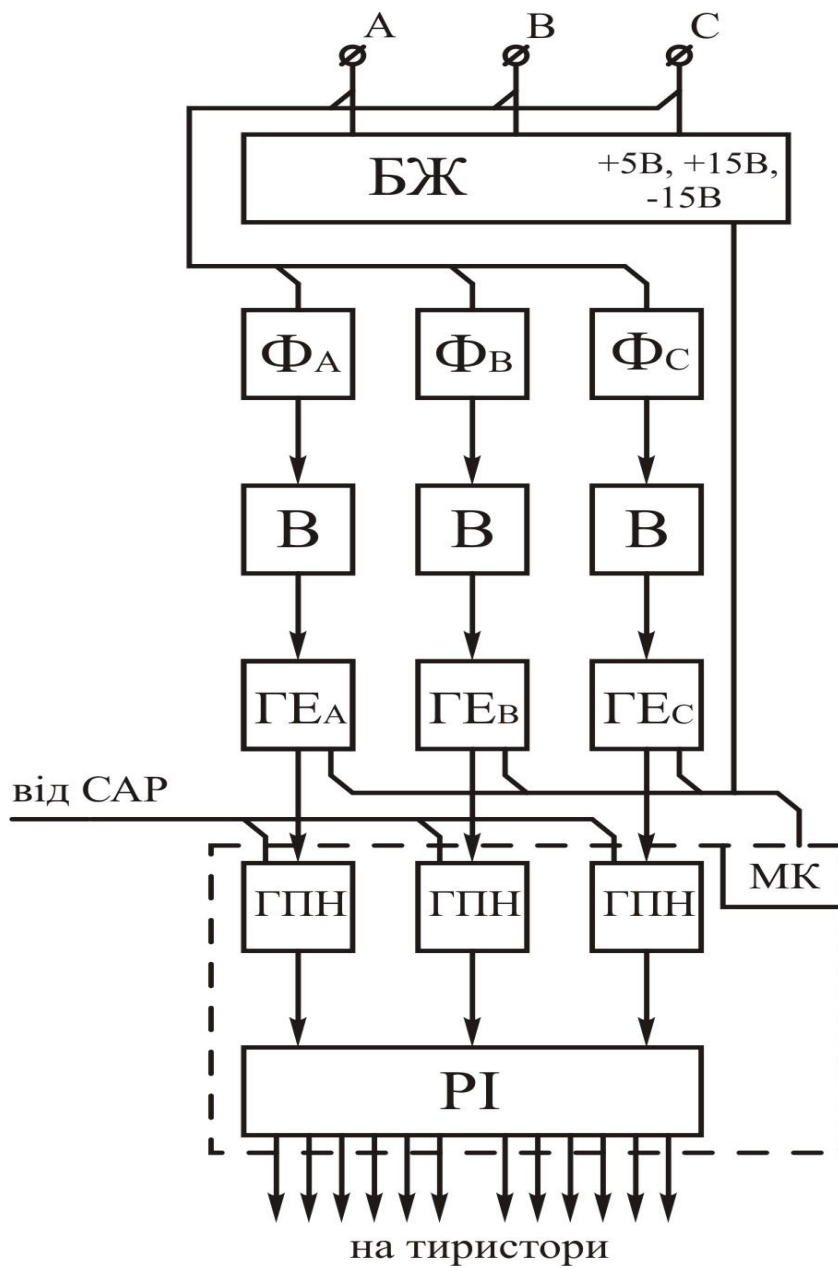
2.3 Розробка системи імпульсно-фазового керування

Враховуючи вимоги до системи керування тиристорними перетворювачами, що повинні забезпечувати плавне змінення керуючого кута α в широких межах, а також надійне відкривання тиристорів від керуючих імпульсів проектуємо систему імпульсно-фазового керування з лінійно-змінною опорною напругою з «вертикальним» принципом керування. Основний алгоритм роботи системи імпульсно-фазового керування реалізовано за допомогою мікроконтролера фірми AVR сімейства ATmega64 – 16Aw, що виконуватиме порівняння напруги від системи автоматичного керування з пилкоподібною напругою, що формуватиметься за допомогою таймер-лічильника та формуватиме керуючі імпульси. Параметри мікроконтролера наведені в таб-

лиці 2.4. Структурна схема розробленої системи керування зображена на рисунку 2.4.

Таблиця 2.4 – Максимально припустимі параметри мікроконтролера

Параметри		Граничні значення
Робоча температура, °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		ε



БЖ – блок живлення;

Ф – блок фільтрів;

В – випрямлячі;

ГЕ – граничні елементи;

ГПН – генератор пилкоподібної напруги;

МК – мікроконтролер.

Рисунок 2.4 – Структурна схема системи імпульсно-фазового керуван-

ня

Блок живлення забезпечує систему керування (СК) стабілізованою напругою +5 В, +15 В, -15 В, +24 В, -24 В. У разі необхідності з трьох фаз, що йдуть на блок живлення, можливе заведення фаз для синхронізації формування керуючих імпульсів[7,8]. Заведення синхронізуючих фаз можливо лише у разі заведення напруги живлення від одного трансформатора, що й видає напругу на тиристори керованого випрямляча (КВ).

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 принципальна фільтра наведена на рисунок 2.5.

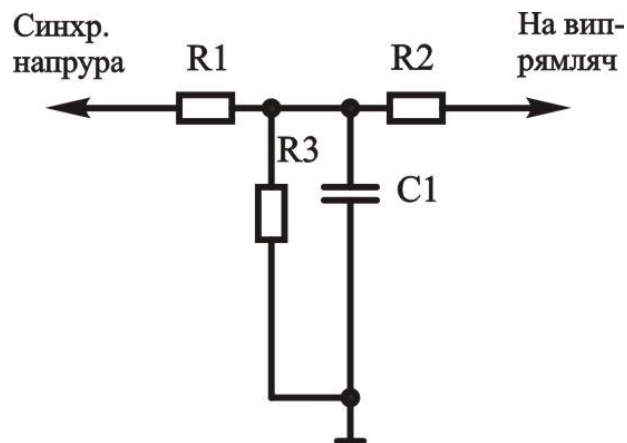


Рисунок 2.5 – Схема електрична принципальна фільтра

Випрямляч збудовано за схемою двополуперіодної діодної мостової схеми VD1 рисунок 2.6.

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[10]. Схема електрична принципіальна граничного елемента наведена на рисунку 2.6. Діаграми роботи граничного елемента наведені на рисунку 2.7.

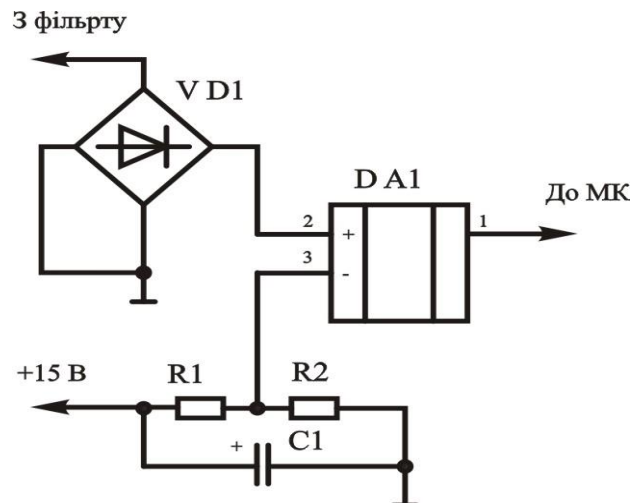


Рисунок 2.6 – Схема електрична принципіальна граничного елемента

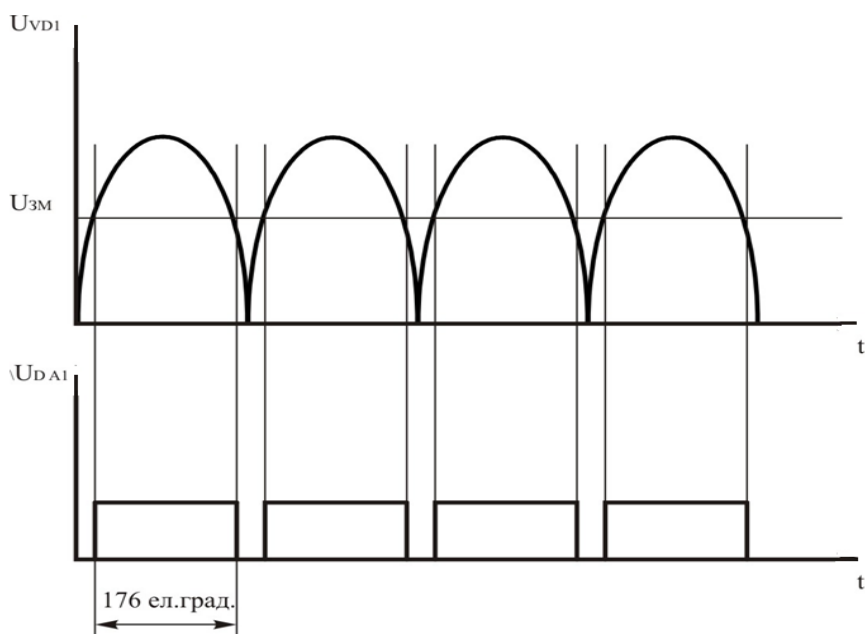


Рисунок 2.7 – Часові діаграми роботи граничного елемента

До системи імпульсно-фазового керування входить схема вимірювання напруги на якорі двигуна. Схема електрична принципіальна наведена на рисунок 2.8.

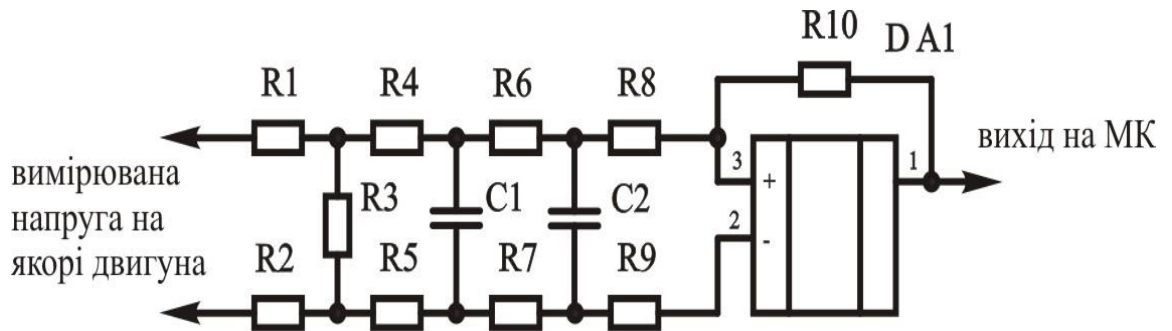


Рисунок 2.8 – Схема електрична принципіальна вимірника напруги якоря

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.

У відповідності до вимог, що є необхідними для правильної роботи мікроконтролера, параметрів з таблиці 2.4 необхідно використати схему перетворення напруги в однополярну або схема випрямлення [11]. Схема принципіальна наведена на рисунок 2.9.

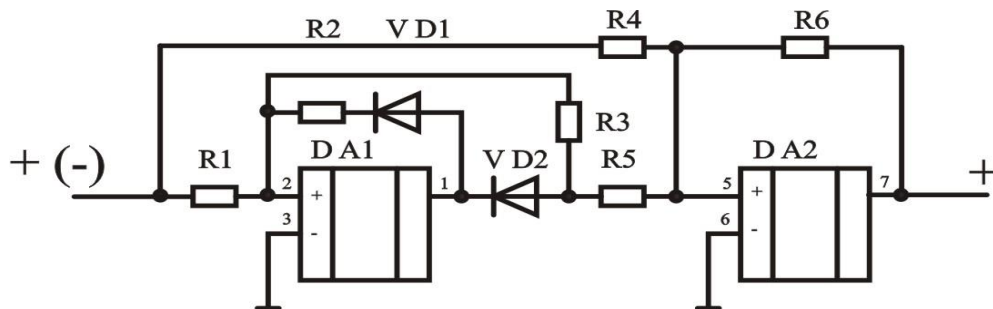


Рисунок 2.9– Схема принципіальна однополярного перетворювача напруги

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 вище 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 погрішність[12].

Для посилення керуючих імпульсів від мікроконтролера застосовуються посилювачі ULN2003A. Параметри мікросхеми наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Параметри посилювача

Напруга живлення, В	Струм входу, мА	Напруга входу, В	Струм виходу, В	Напруга виходу, В	Температурні параметри, °С
30	350	3	1,35	30	- 40...+85

2.4 Розрахунок системи імпульсно-фазового керування

2.4.1 Розрахунок схеми фільтра

Розрахуємо подільник напруги на резисторах R_1 та R_3 , що входить до схеми фільтра визначаються за формулою (2.23).

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \frac{R_3}{R_1 + R_3}, \quad (2.23)$$

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

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

Розрахунок проводимо для максимальної напруги синхронізації, що може бути подана на схему $U_{\text{вх}} = 127$ (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 резистор R_1 за формулою (2.24).

$$R_1 \approx \frac{U^2 R_3}{U} \approx R_3, \quad (2.24)$$

$$R_1 \approx \frac{127^2 \cdot 20000}{5} \approx 20000 \approx 508000 \text{ ()}$$

Обираємо резистор R_1 МЛТ-0,125-510к $\pm 10\%$

Схема фільтра збудована на конденсаторі C_1 та резисторі R_2 розраховується за формулою (2.25).

$$h_{30} \approx R_3^2 C_1, \quad (2.25)$$

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

Постійна часу визначається за формулою (2.26).

$$h_{180} \approx \frac{1}{2^2 f}, \quad (2.26)$$

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

f_m – частота мережі живлення, Гц.

$$h_{180} \approx \frac{1}{2^2 \cdot 50} \approx 0,01 \text{ ()}$$

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

Постійна часу ϕ_{30} схеми фільтра, що визначає тривалість у 30 електричних градуси визначається за формулою (2.27).

$$h_{30} = 1 - \frac{30^2 h_{180}}{180}, \quad (2.27)$$

$$h_{30} = 1 - \frac{30^2 \cdot 0,01}{180} = 0,0017 ()$$

Обираємо резистор R_2 МЛТ-0,125-20к $\pm 10\%$.

З рівняння (2.25) знаходимо конденсатор C_1 .

$$C_1 = 1 - \frac{h_{30}}{R_2} = 1 - \frac{0,0017}{20000} = 85 \cdot 10^{-9} ()$$

Обираємо конденсатор C_1 91 нФ

2.4.2 Розрахунок 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 (2.23).

Задаємося значенням резистора R_1 , що зображено на рисунку 2.6 24 (кОм). Щоб забезпечити формування імпульсу тривалістю 176 ел. град. нуль зміщуємо відповідно на 0,11 Вольта. Тобто $U_{\text{вих}} = 0,11$ (В), а $U_{\text{вх}} = 15$ (В).

Визначаємо R_2 за формулою (2.28).

$$R_2 = 1 - \frac{U}{U} \cdot \frac{2R_1}{U}, \quad (2.28)$$

$$R_2 \approx \frac{0,11^2 \cdot 10000}{15! \cdot 0,11} \approx 73,875 \text{ ()}$$

Обираємо резистор R_2 МЛТ-0,125-75 Ом $\pm 10\%$

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.

2.4.3 Розрахунок схеми вимірювання напруги на якорі двигуна

Розрахунок схеми проводимо на основі формули 2.23, 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 (2.28).

$$R_3 \approx \frac{30^2 \cdot 300000}{120! \cdot 30} \approx 100 \text{ ()}$$

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[13].

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: $k_{\pi} = 0,167$

Вхідний опір $R_{вх}$ на операційний подільник знаходимо за формулою (2.29).

$$R = 1 \frac{R}{k}, \quad (2.29)$$

$$R = 1 \frac{10000}{0,167} = 1\,59880(\quad)$$

Обираємо резистори R_4, R_6, R_8 та R_5, R_7, R_9 типу МЛТ-0,125 20 кОм

2.4.4 Розрахунок схеми випрямляча

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 $\pm 1\%$ 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 2.6.

Таблиця 2.6 – 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	$\geq 25 \cdot 10^3$	$\geq 0,8 \cdot 10^6$	$\leq 4,5$

2.4.5 Розробка алгоритму роботи мікроконтролера як СІФК

Частина ініціалізації таймера лічильника.

Таймер-лічильник ініціалізується як не інвертуючий, що працює в "швидкому" режимі ($COM1A [1...0] = 10b$ у регістрі керування $TCC1A$). Максимальне значення $TOP = 32767$, що відповідає 15-ти розрядам лічильника, перебуває в реєстровій парі $ICR1$ ($ICR1H:ICR1L$). При цьому в розряди $WGM1[3...0]$, розподілені по регістрах керування $TCCR1A$ й $TCCR1B$, повинне бути записане двійкове значення $1110b$.

Алгоритм роботи мікроконтролера в якості системи імпульсно-фазового керування наведений на рисунку 2.10

Опис роботи:

а) початок роботи. Дозволяється робота таймера лічильника з портом вводу-виводу $PINC0$;

б) завантажити значення $PINC0$ до регістру максимального значення TOP таймера лічильника;

в) Завантаження значення TOP до $IRC1$ – регістру лічення. Таймер лічильник виробляє лічення до цього значення;

г) Результат перетворення ПД-регулятора вноситься до таймера-лічильника та перетворюється у шістнадцятирічне число;

д) Результат перетворення даних ПД-регулятора завантажується до регістру порівняння $OCR1A$;

е) Результат лічення постійно вноситься до реєстру даних TCNT1 таймера-лічильника;

є) Порівняння даних реєстру TCNT1 з реєстром порівняння OCR1A. Якщо дані не рівні відбувається подальше внесення значення лічильника до TCNT1 та порівняння з OCR1A. Якщо дані рівні, то з урахуванням встановленого значення у реєстрі загального призначення R5 сформований імпульс поступає до відповідних виводів мікроконтролера, на реверсне або пряме обертання. При $R5 = 0$ імпульси керування надходять до роботи на пряме обертання, якщо дорівнює одиниці імпульси надходять до тиристорів реверсного обертання.

ж) Наявність напруги на вході РА6, що підключено до схеми вимірювання напруги на якорі двигуна, встановлює РЗП $R10 = 1$. Це означає наявність напруги на якорі двигуна та забороняє перемикання між групами тиристорів до встановлення нуля у R10.

з) З моменту першого запуску лічильника відбувається визначення парності імпульсів, по черговим встановленням маркеру, так, наприклад, перший сформований імпульс має непарний маркер, другий парний, третій непарний і так далі. У відповідності до цього працює анодна або катодна група тиристорів[14,15,16].

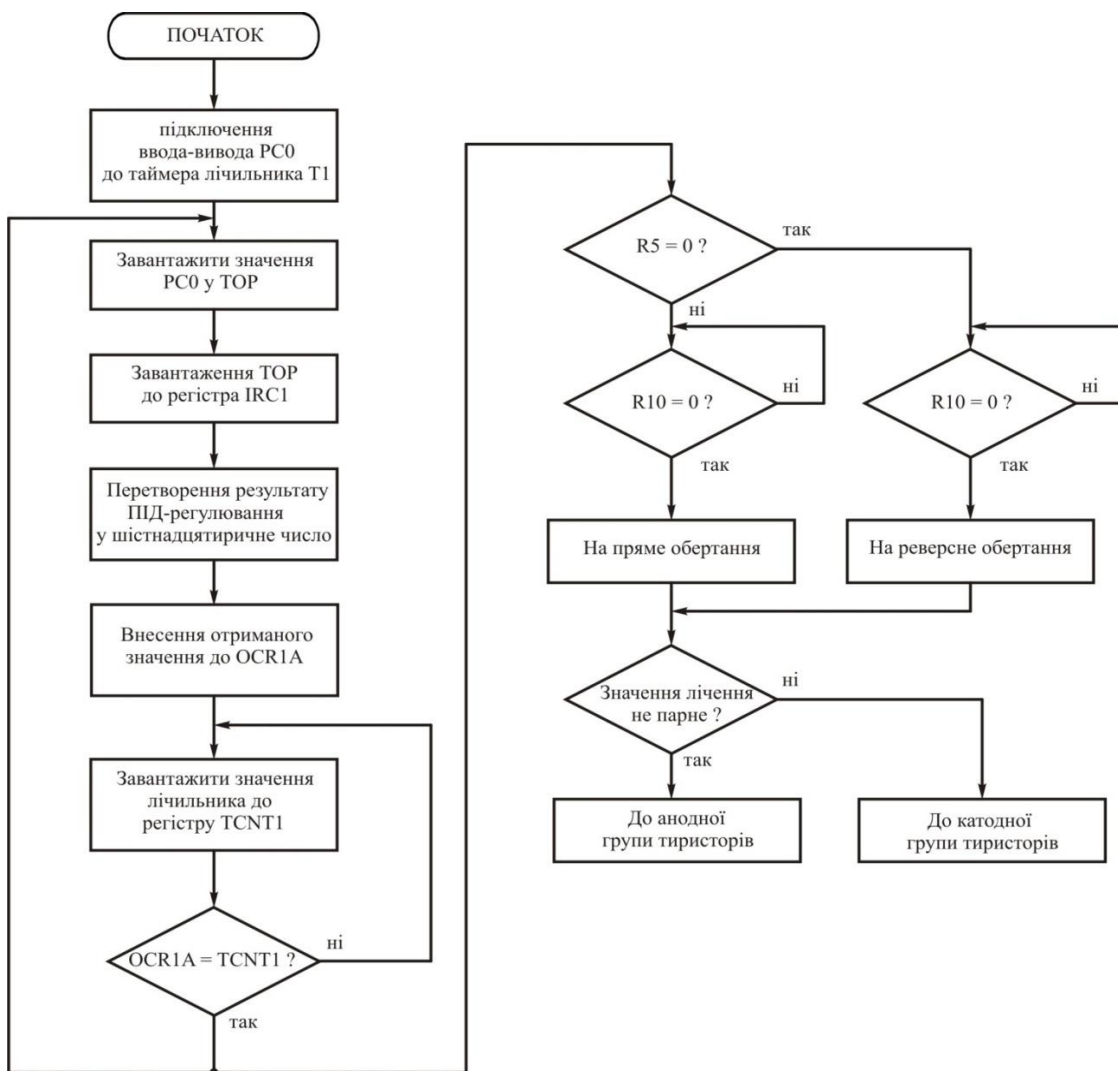


Рисунок 2.10 – Алгоритм роботи СІФК

2.4.6 Розробка алгоритму вирахування помилок

У схемі роботи системи автоматичного керування передбачені захисти від помилкової роботи привода в цілому. Так у роботі передбачені захист від перевищення струму, захист від зникнення сигналу тахогенератора, захист від перевищення навантаження, захист від зникнення однієї з фаз, захист від перевищення швидкості.

Всі ці алгоритми працюють за простою схемою основою яких є порівняння даних, що надходять до входів мікроконтролера з постійними параметрами двигуна, що зберігаються у пам'яті мікроконтролера.

Алгоритм виявлення помилки обриву тахогенератора полягає в порівнянні значень регістрів загального призначення R8 та R9. Алгоритм роботи наведений на рисунок 2.11.

Схема працює наступним чином:

- у відповідності до вмісту адреса \$0012 ОЗП у регістрі загального призначення R8 встановлюється одиниця, якщо з тахогенератора надходить сигнал, що перетворюється в АЦП та записується за адресою \$0012 і нуль, якщо з тахогенератора не надходить сигнал.

- відповідно у РЗП R9 встановлюється одиниця, якщо з схеми вимірювання напруги на якорі двигуна надходить напруга до входу мікроконтролера. Нуль в R9 встановлюється за відсутності напруги на РА6.

- за тих умов якщо у R9 встановлена одиниця, а вміст R8 дорівнює одиниці виробляється переривання, що забороняє роботу привода та помилка, що виводить на індикацію помилку «Обрив тахогенератора»[16].

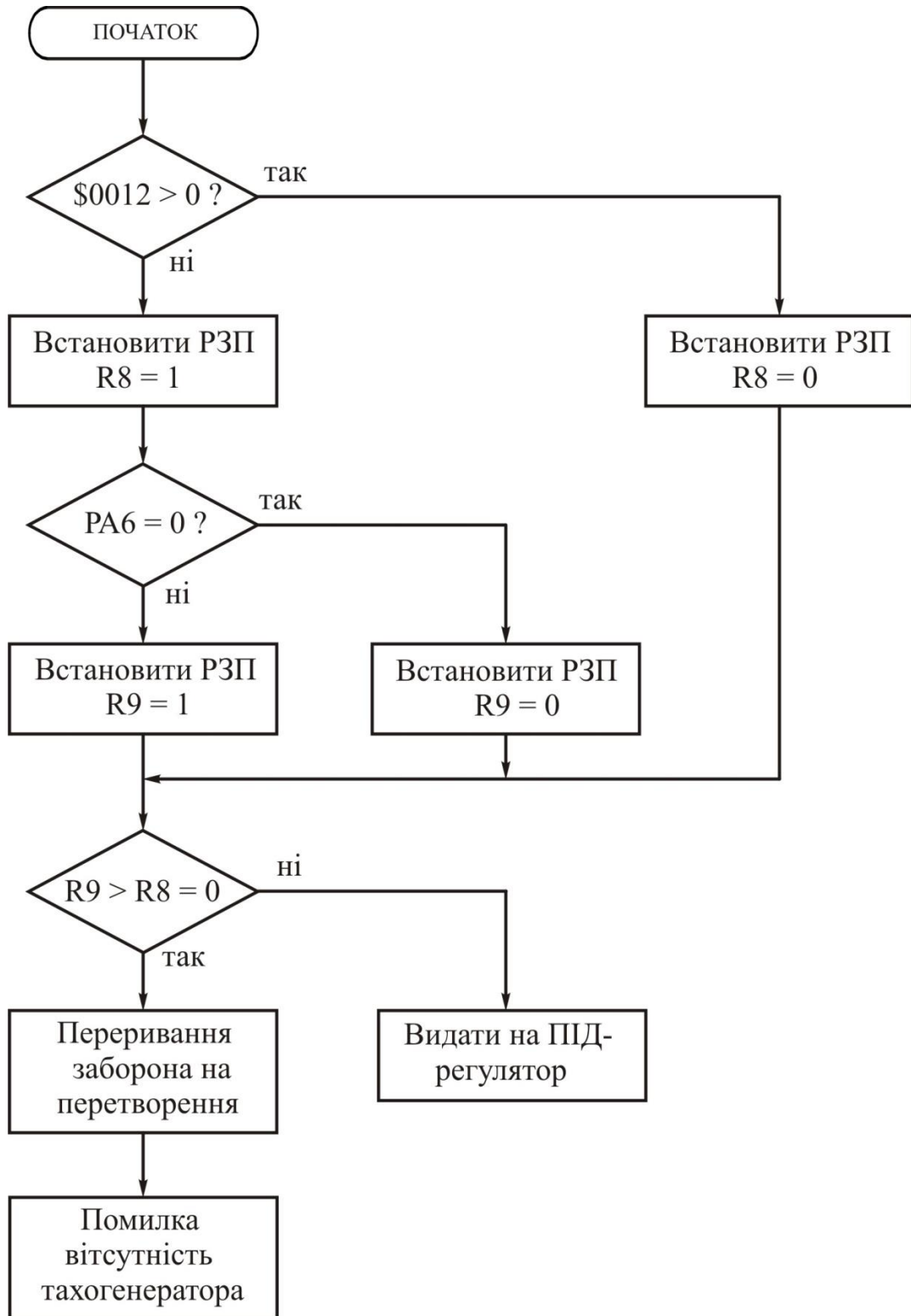


Рисунок 2.11 – Алгоритм виявлення помилки відсутності тахогенератора

ра

Алгоритм вирахування помилки за перевищення струму наведено на рисунку 2.12.

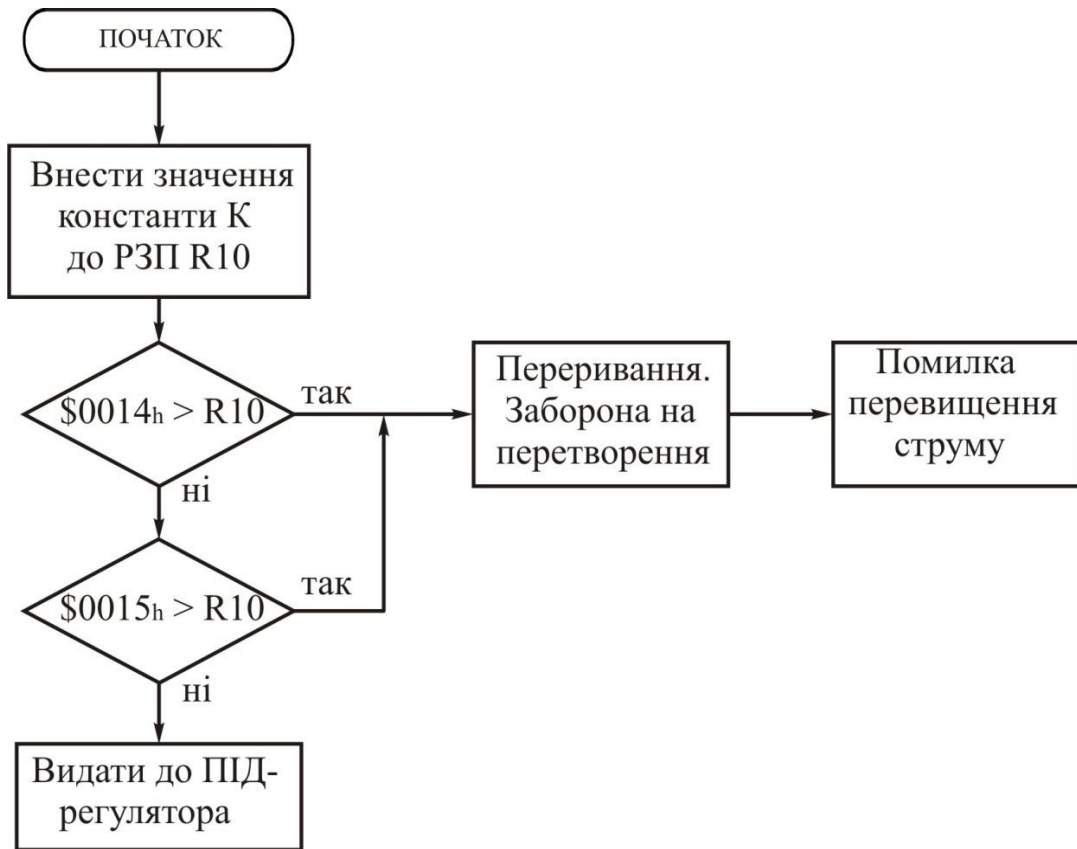


Рисунок 2.12 – Алгоритм вирахування помилки за перевищення струму

Перетворене значення, що надходить від зворотного зв'язку за струмом на АЦП та записується до ОЗП за адресами \$0014_h та \$0015_h по чергово порівнюється з вмістом регістра загального призначення R10, в якому зберігається максимальне значення струму. У разі якщо одне з вмістів ОЗП перевищує значення R10 виробляється переривання та заборона на роботу регуляторів, встановлює нуль на виводі PE1 завдяки чому загоряється світлодіод VD14.

Алгоритм роботи мікроконтролера на виявлення помилки за перевищення швидкості наведено на рисунку 2.13.

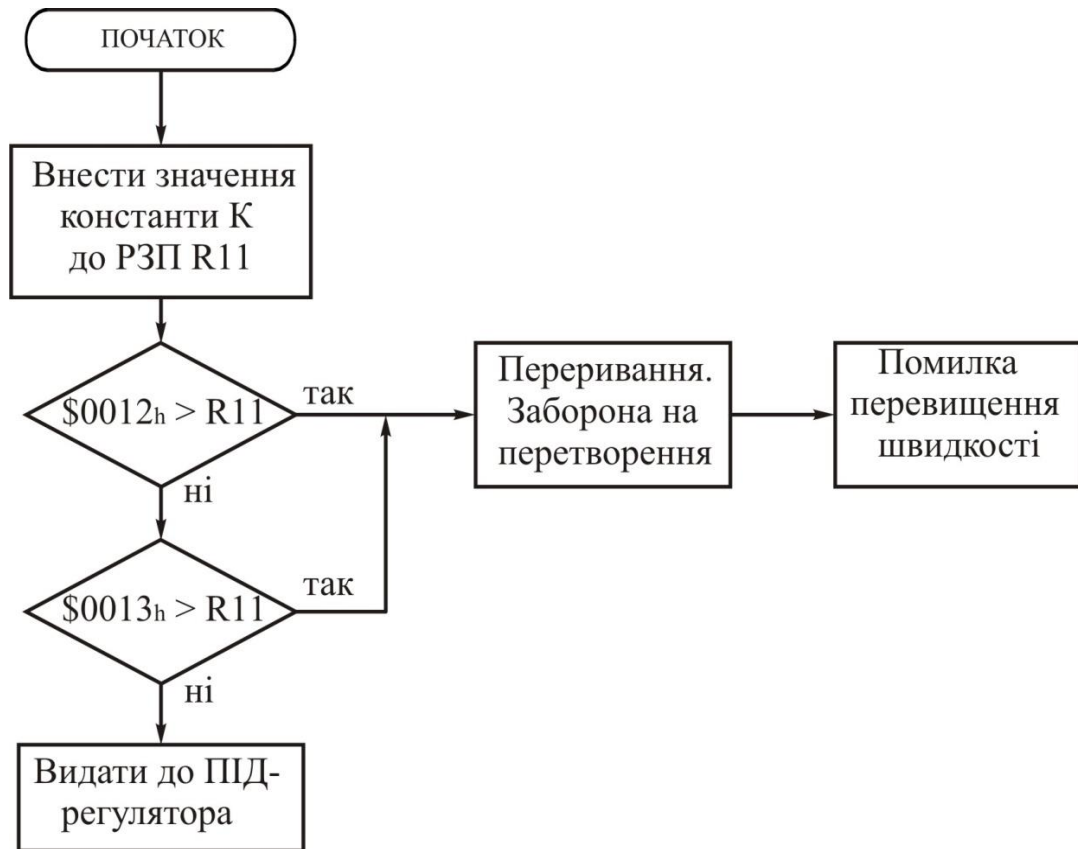


Рисунок 2.13 – Алгоритм роботи вирахування помилки перевищення швидкості

Перетворене значення, що надходить від зворотного зв'язку за швидкістю на АЦП та записується до ОЗП за адресами \$0010_h та \$0011_h почергово порівнюється з вмістом регістра загального призначення R11, в якому зберігається максимальне значення швидкості. Уразі якщо одне з вмістів ОЗП перевищує значення R11 виробляється переривання та заборона на роботу регуляторів, встановлює нуль на виводі PE2 завдяки чому загоряється світлодіод VD15.

2.5 Розробка системи автоматичного керування

Для забезпечення потрібного режиму роботи, постійної підтримки заданих обертів двигуна та зменшення пускового струму, застосовується система автоматичного регулювання (САР). З розвитком мікроконтролерних технологій є доцільним побудова САР 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) регулятора. 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].

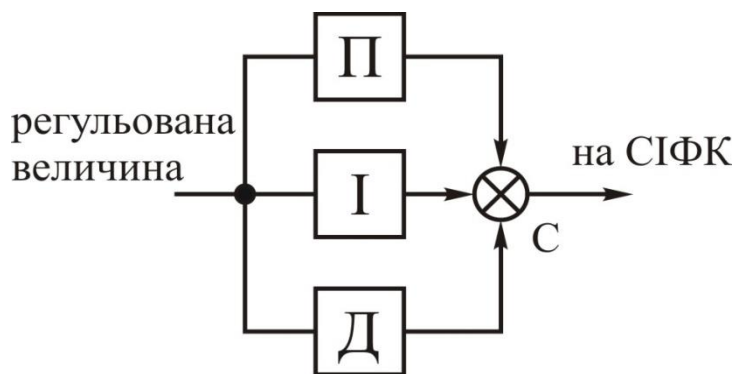
Пропорційна складова усуває безпосередньо помилку в значенні величини, що стабілізується, яка спостерігається в цей момент часу. Вихідний сигнал пропорційної складової тим більше, чим сильніше регульована величина відхиляється від уставки. Якщо вхідний сигнал дорівнює уставці, то вихідний дорівнює нулю.

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 використовують 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[19].

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 2.14. Схема електрична принципіальна наведена на рисунку 2.15.



П – пропорційна складова ПІД регулятора;

І – пропорційна складова ПІД регулятора;

Д – диференційна складова ПІД регулятора;

С – суматор.

Рисунок 2.14 – Структурна схема ПІД - регулятора

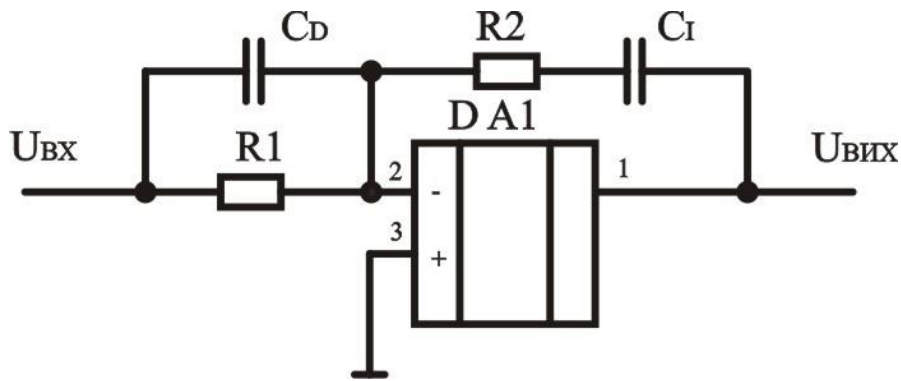


Рисунок 2.15 – Схема електрична принципальна ПІД – регулятора

Як було вище зазначено ПІД – регулятор складається з пропорційної, інтегральної та диференційної частин, тому передатну функцію можна представити у виді формули (2.30) та (2.31).

$$W_{\text{ПІД}}(p) = W_{\text{П}}(p) \cdot W_{\text{І}}(p) \cdot W_{\text{Д}}(p), \quad (2.30)$$

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

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

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

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

$$W_{\text{ПІД}}(p) = k_{\text{П}} \frac{T_{\text{І}}^2 T_{\text{Д}}^2 p^2 + T_{\text{І}} T_{\text{Д}}^2 p + 1}{T_{\text{І}}^2 p}, \quad (2.31)$$

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

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

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

Беручи за основу двоконтурну систему автоматичного регулювання з базового приводу, побудовану на основі ПІД – регулятора швидкості та струму, вдосконалюємо її і будуємо на базі мікроконтролера фірми AVR сімейства АТмега64 –16Ав. Параметри мікроконтролера наведені в таблиці

2.2.1. Параметри ПІД-регуляторів, що встановлені на базовому приводі SDC-1 наведені в таблиці 2.7, 2.8.

Таблиця 2.7 – 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 2.8 – 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 (2.32).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(h) dh + K_d \frac{de}{dt}, \quad (2.32)$$

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 (2.33).

$$e = x_0 - x, \quad (2.33)$$

Оскільки технічні параметри мікроконтролера не дозволяють підключення безпосередньо до входів контурів зворотного зв'язку за швидкістю, де напруга з тахогенератора може сягати більше 20 В на 1000 обертів, використовуємо у схемі подільники вхідної напруги побудовані на основі операцій-

них підсилювачів з встановленням малого коефіцієнту підсилення за допомогою резисторів[20,21].

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 (ЧПК), 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 2.4 напруга на каналах ввід/вивід повинна бути однополярною, а саме позитивна. використовуємо схему випрямляча наведену в розділі 2.3.

Схема подільника напруги для зворотного зв'язку за швидкістю будуватиметься на операційному підсилювачі з коефіцієнтом підсилення, що можна регулювати за допомогою зміни опору вхідних резисторів. Схема електрична принципіальна наведена на рисунку 2.16

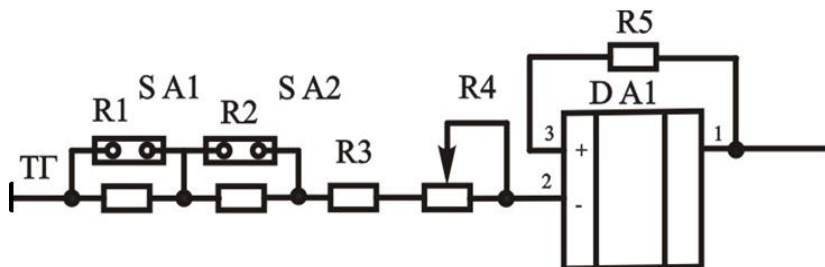


Рисунок 2.16– Схема електрична принципіальна подільника напруги

Це досягається завдяки введенню у зворотній зв'язок резистору з малим опором відносно опору на вході, так щоб виконувалось рівняння наведене у формулі (2.34).

$$K = 1 + \frac{R}{R} = 1 + \frac{U}{U}, \quad (2.34)$$

де $K_{\text{п}}$ – коефіцієнт підсилення;

$R_{\text{зв}}$ – опір ланцюга зворотного зв'язку, Ом;

$R_{\text{вх}}$ – опір вхідного ланцюга, Ом.

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

$U_{\text{вх}}$ – 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 регулятора 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».

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 $\pm 5 \dots \pm 1200$ 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 Холла. 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 2.7 наведені технічні параметри датчика струму та опір конвертуючого резистора. Схема підключення датчика струму наведена на рисунку 2.18.

Таблиця 2.9 – Технічні параметри датчика струму

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

В ланцюзі зворотного зв'язку використовується схема випрямлення, що наведена на рисунку 2.19, з тими ж настройками та параметрами елементів, що наведені вище.

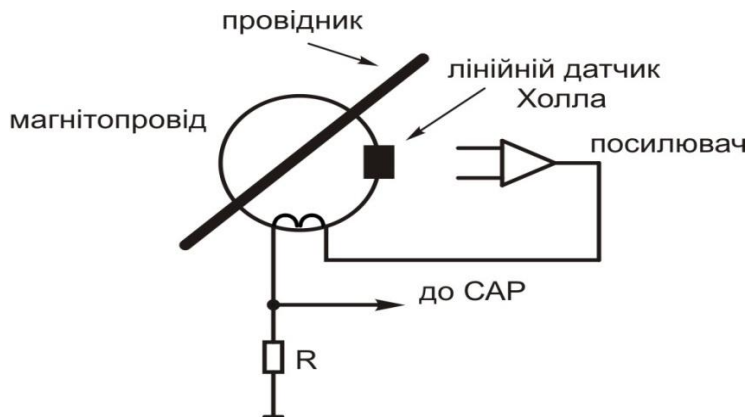


Рисунок 2.17 – Схема підключення датчика струму

Ланцюг подільника напруги для схеми зворотного зв'язку наведено на рисунку 2.18.

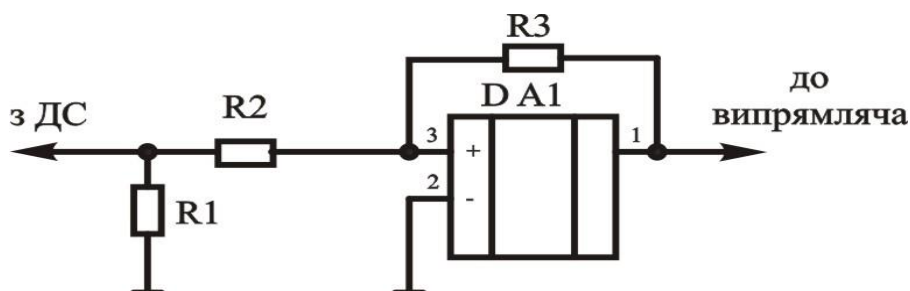


Рисунок 2.18 – Схема електрична принципова подільника напруги схеми зворотного зв'язку за струмом

Робота схеми подібна до роботи схеми ланцюга зворотного зв'язку за швидкістю. Резистор R1 підключений на корпус слугує для того щоб у разі відсутності сигналу від датчика струму на вході операційного підсилювача

був відсутній потенціал напруги, що її може бути наведений на схему роботою електронними пристроями[22,23].

До системи автоматичного регулювання входять також випрямлячі, що розглянуті у розділі 2.2.2 та розраховані в розділі 2.2.3.

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 2.19.

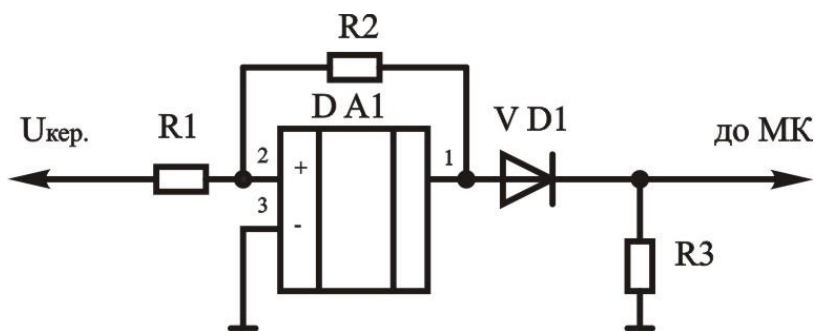


Рисунок 2.19 – Схема електрична принципова визначення напрямку обертання двигуна

Діод VD1, що стоїть на виході операційного підсилювача не дозволяє проходженню 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 вентиля зворотного зв'язку.

2.6 Розрахунок системи автоматичного регулювання

2.6.1 Розрахунок схеми подільника напруги зворотного зв'язку за швидкістю

Відповідно до рівняння 2.34 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.

$$K = 1 \frac{5}{30} = 0,1667$$

Задаємося розміром опору резистора в ланцюгу зворотного зв'язку 10 кОм. З формули (2.23) знаходимо розмір опору резистора $R_{вх}$ в вхідному ланцюзі подільника напруги:

$$R = 1 \frac{10000}{0,1667} = 59988(\quad)$$

Приймаємо $R_{вх} = 60$ кОм.

Для більш універсального застосування привода для тахогенераторів чий 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 підстро-

ювальний 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.

2.6.2 Розрахунок схеми зворотного зв'язку за струмом

За умов використання конвертуючого резистора R у схемі підключення датчика струму розміром 100 (Ом). Напряга пропорційна до струму знаходиться за формулою (2.35).

$$U = I \frac{R}{n}, \quad (2.35)$$

де U – вихідна напруга датчика струму, В;

R – опір конвертуючого резистора, Ом;

n – кількість витків компенсуючої котушки.

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

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

Задаємося значенням резистора $R_3 = 10$ (кОм). З рівняння 2.34 знаходимо R_2 :

$$R_2 = \frac{U^2 R_3}{U} = \frac{9^2 \cdot 10000}{5} = 18000 \text{ ()}$$

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.

2.6.3 Розрахунок схеми визначення напрямку обертання двигуна

Схема працює як повторювач тому резистори R1 та R2 обираємо МЛТ-0,125-10 кОм

Діод обираємо КД522Б.

Операційний підсилювач LM348.

2.6.4 Розробка алгоритму роботи мікроконтролера

2.6.4.1 Розробка основного алгоритму

Робота системи автоматичного регулювання реалізовано в мікроконтролері.

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 регіс-

тра ADCSRA. Вирівнювання результату в реєстровій парі встановлюємо по лівому краю розрядом ADLAR = 1. (Примітка: зчитування повинне відбуватися в наступному порядку: спочатку зчитується вміст реєстра ADCL, а потім реєстра 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 реєстра даних ADCH:ADCL. Якщо до цього моменту нове перетворення завершилось, результат губиться. При зчитуванні ADCH знову забезпечується доступ АЦП до реєстра даних). Основний алгоритм роботи мікроконтролера в якості системи автоматичного регулювання наведено на рисунку 2.20.

Опис роботи:

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

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

в) результат перетворення заноситься у реєстри даних АЦП ADCH:ADCL (старший і молодший байти відповідно). Про те, що дані перетворення занесені в реєстри 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.

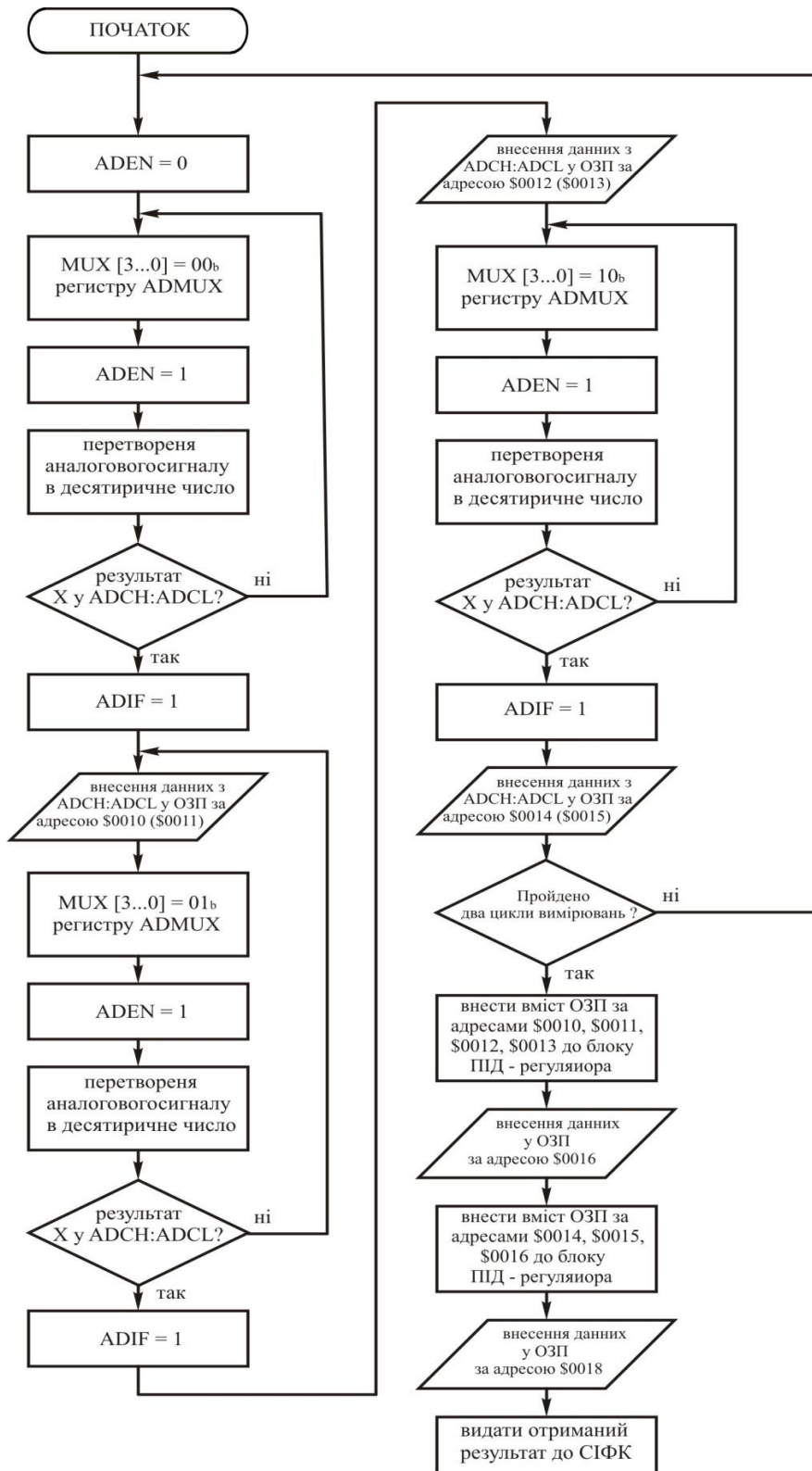


Рисунок 2.20 – Алгоритм роботи мікроконтролера в якості CAP

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 (робота ПІД регулятора швидкості наведена на малюнку 2.20)

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.

2.6.4.2 Розробка роботи ПД – регулятора

Робота ПД-регулятора швидкості та струму ідентичні тому розглянемо приклад роботи ПД-регулятора швидкості.

Основні параметри регулятора записані до ПЗП (EEPROM), як константи. Константа K_1 ініціалізується як коефіцієнт пропорційної складової K_p . Константа K_2 ініціалізується як інтегральна складова, що містить значення K_i . Константа K_3 містить значення диференційної складової K_d .

Опис роботи:

За допомогою арифметичних операцій закладених у мікроконтролер приводимо обчислення значень імітуючи роботу ПД-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 $K1$ 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 $K2$ 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 $K3$ за командою MUL помножується з вмістом $\$003A_h$. Результат записується за адресою $\$003B_h$.

м) Для визначення значення ПІД регулятора по чергово 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.

Алгоритм роботи ПІД регулятора наведено на рисунку 2.21.

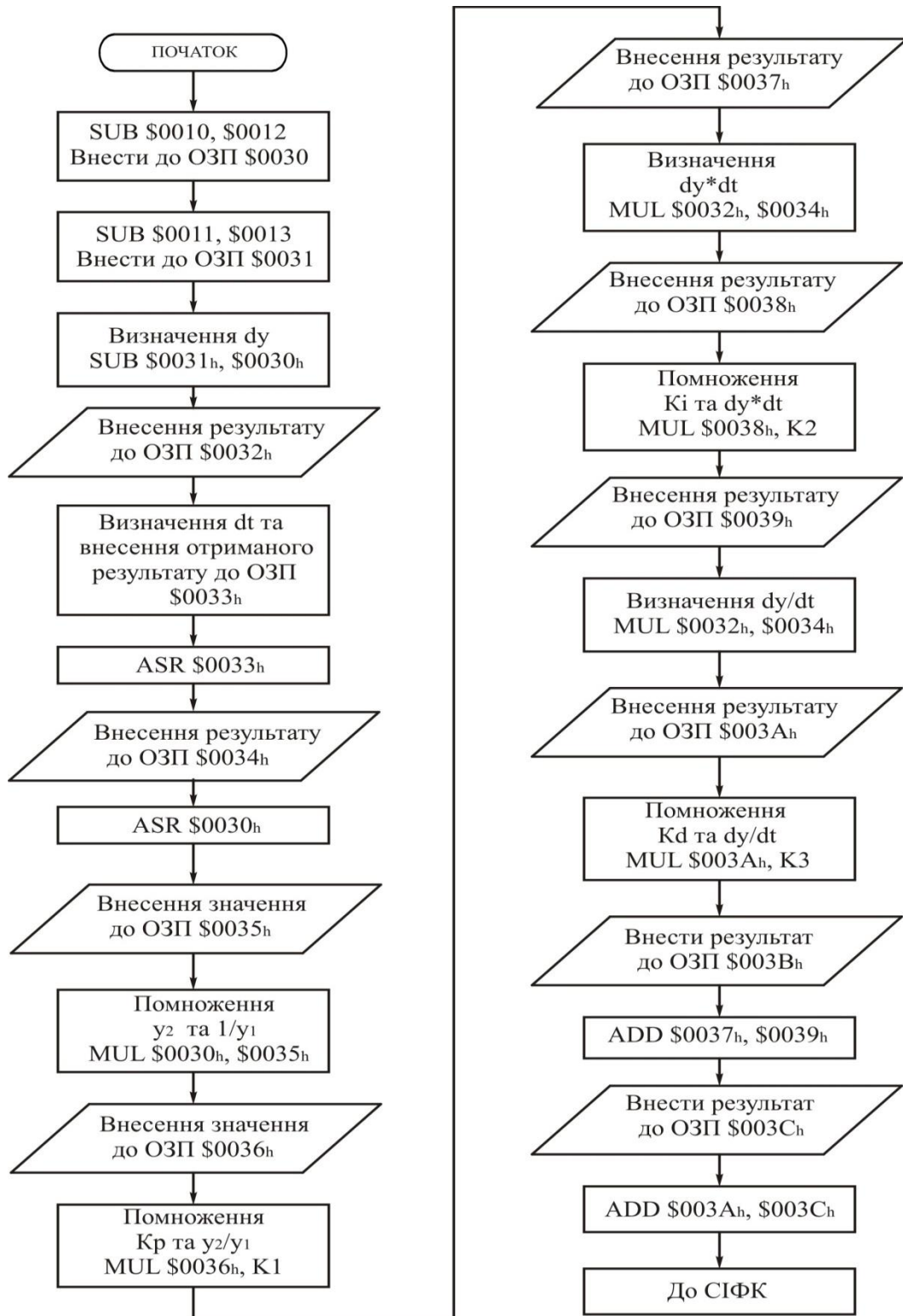
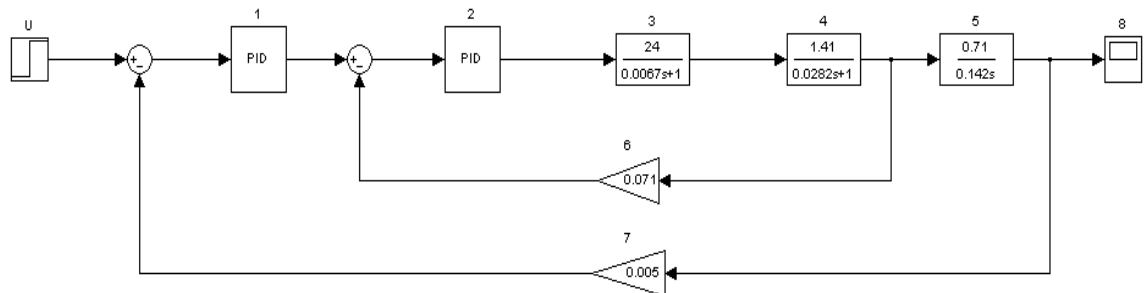


Рисунок 2.21 – Алгоритм роботи ПІД-регулятора

2.6.5 Моделювання

Роботу системи автоматичного керування модулюємо за допомогою програми MATLAB 6.5.[28] Схеми змодельованого контуру за швидкістю та струму з параметрами, що наведені у таблиці 2.7 та 2.8 наведені на рисунку 2.22 та 2.24 відповідно.



U – Напряга керування;

1 – ПД-регулятор швидкості;

2 – ПД-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 2.22 – Модель контуру регулювання за швидкістю

Вихідна характеристика за швидкістю, що відображає роботу контуру при зміні керуючої напруги наведена на рисунку 2.23

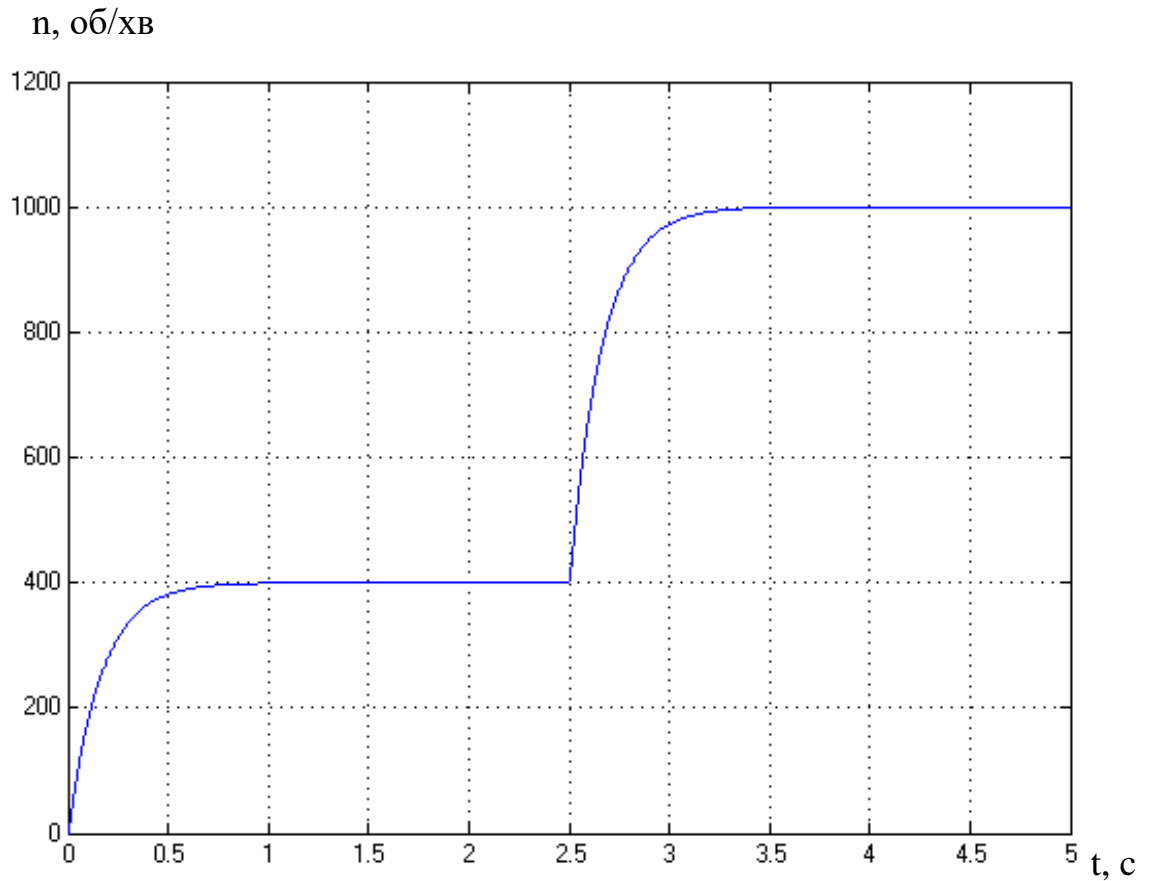
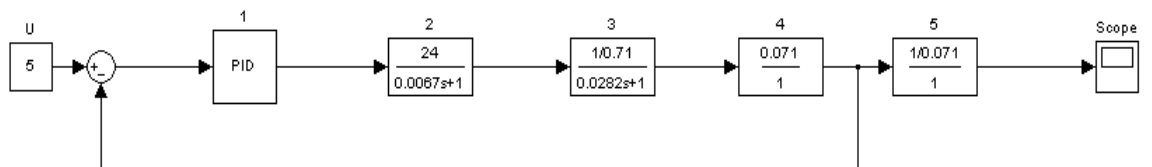


Рисунок 2.23 – Вихідна характеристика за швидкістю



U – Напряга керування;

1 – ПІД-регулятор струму;

2 – Передавальна функція перетворювача;

3 – Передавальна функція електричної складової двигуна;

4, 5 – Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом;

Рисунок 2.24 – Контур регулювання за струмом

Вихідна характеристика за струмом, що відображає роботу контуру при керуючій напрузі у п'ять вольт наведена на малюнку 2.25

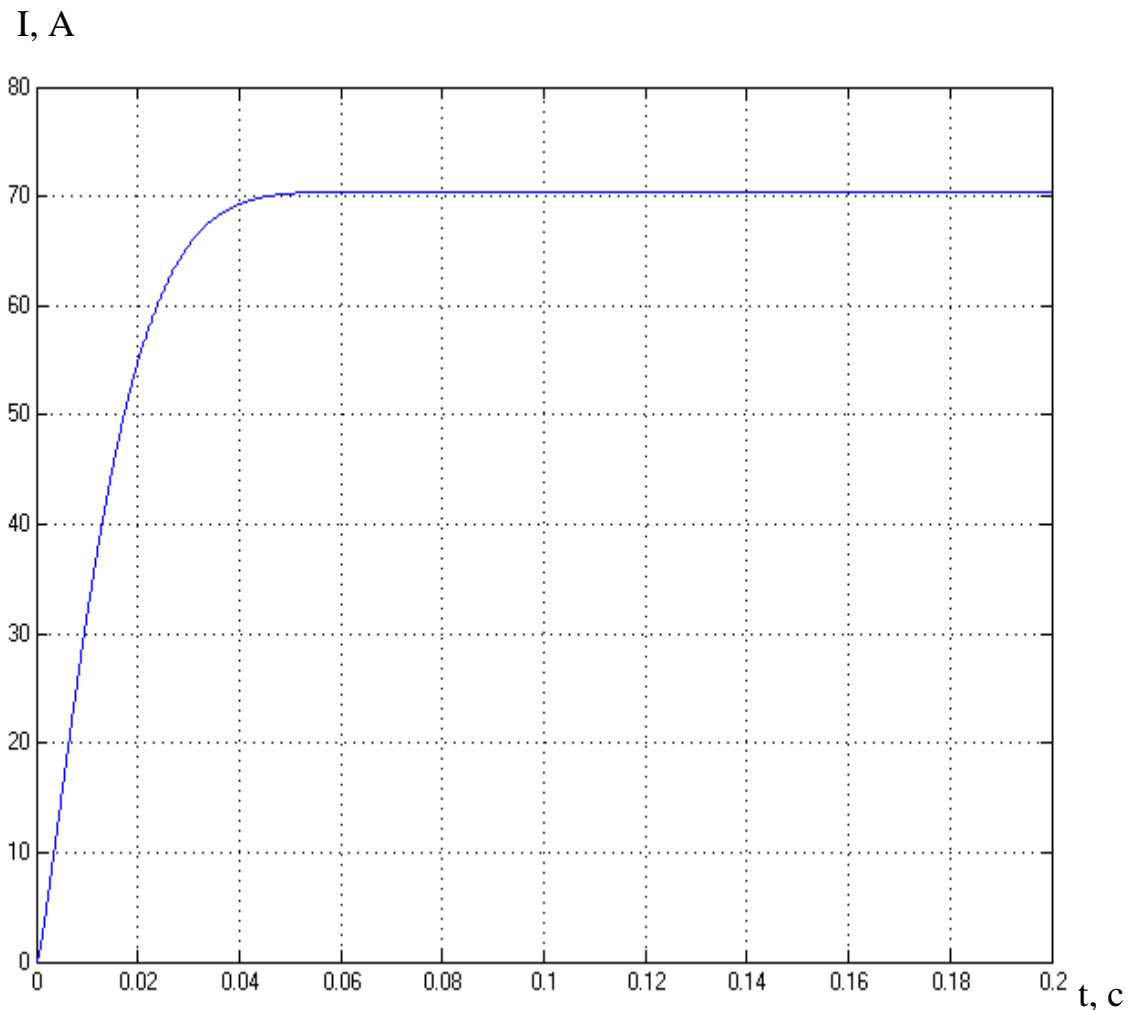


Рисунок 2.25 – Вихідна характеристика струму

Також були представлені параметричні данні розрахованих вище напівпровідникових приладів, вони зазначені в "Додатку В" та "Додатку Г".

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.

3 ТЕХНІКО - ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Метою розрахунків є визначення собівартості напівпровідникового перетворювача для привода постійного струму.

Повна собівартість виробу (C_{Π}) визначається за наступними статтями витрат за формулою (3.1).

$$C_{\Pi} = C_M + C_{\Pi\Phi} + C_{\text{КП}} + C_{\text{ЗП}} + C_{\text{СОЦ}} + C_{\text{ТЕ}} + C_{\text{ОБ}} + C_{\text{ЦЄХ}} + C_3 + C_{\text{ПР}} + C_{\text{ХОЗ}},$$

(3.1)

де C_M - вартість виробу, грн.;

$C_{\Pi\Phi}$ - вартість напівфабрикату та комплектуючих свого виробництва, грн.;

$C_{\text{КП}}$ - вартість покупних напівфабрикатів і комплектуючих, грн.;

$C_{\text{ЗП}}$ - витрати на сумарну заробітну плату на виробничих робітників, грн.;

$C_{\text{СОЦ}}$ - відчислення з заробітної плати на соціальні міри, грн.;

$C_{\text{ТЕ}}$ - витрати на паливо, електроенергію та технологічні цілі, грн. (6 % від

$Z_{\text{ОСН}}$);

$C_{\text{ОБ}}$ - витрати на утримування та експлуатацію обладнання, грн. (8 % від

$Z_{\text{ОСН}}$);

$C_{\text{ЦЄХ}}$ - цехові витрати, грн. (10 % від $Z_{\text{ОСН}}$);

C_3 - загальнозаводські витрати, грн. (7 % від $Z_{\text{ОСН}}$);

$C_{\text{ПР}}$ - інші накладні витрати, грн. (2 % від $Z_{\text{ОСН}}$);

$C_{\text{ХОЗ}}$ - господарські витрати, грн. (5 % від $Z_{\text{ОСН}}$);

$Z_{\text{ОСН}}$ - основна заробітна плата, грн.

3.1 Визначення витрат на матеріали напівфабрикати і комплектуючі вироби

Вартість матеріалів визначаємо за формулою (3.2).

$$1 \left(1 + \frac{R_{\text{ТР}}}{100} \right) \sum_{i=1}^n A_{i1} N_i, \quad (3.2)$$

де $C_{\text{МІ}}$ – оптова ціна і-го виду матеріалу, грн/кг;

$N_{\text{МІ}}$ – норма витрати на одиницю виробу і-го матеріалу в натуральних одиницях виміру;

$R_{\text{ТР}}$ – відсоток транспортно-заготівельних витрат на матеріали (5-10%);

n - число видів матеріалів;

$C_{\text{ВІДХ}}$ – вартість поворотних (реалізованих) відходів, грн. (2 % від сумарної вартості транспортно-заготівельних витрат на матеріали).

Вартість напівфабрикатів свого виробництва визначаємо за формулою (3.3).

$$1 \sum_{i=1}^m A_{i1} N_i, \quad (3.3)$$

де $C_{\text{пфі}}$ – виробнича собівартість одиниці і-го виду напівфабрикату свого

виробництва, грн.;

$N_{\text{пфі}}$ - кількість напівфабрикатів і комплектуючих виробів свого виробництва і – го розміру, в натуральних одиницях. шт.

В нашому випадку напівфабрикати не виробляються тому розрахунок не приводиться.

Вартість покупних напівфабрикатів і комплектуючих виробів визначається за формулою (3.4).

$$1 \left(1 \pm \frac{\check{Z}}{100}\right)^2 \check{A}_{11} \quad {}^2N \quad , \quad (3.4)$$

де $P_{\text{тр}}$ – відсоток транспортно-заготівельних витрат на покупку напівфабрикатів і комплектуючих (5%);

K - кількість покупних напівфабрикатів і комплектуючих;

$N_{\text{кпі}}$ – кількість покупних напівфабрикатів і комплектуючих i -го типорозміру в натуральних одиницях виміру;

$C_{\text{кпі}}$ – оптова ціна покупних напівфабрикатів і комплектуючих i -го типорозміру грн/шт.;

Розрахунок вартості матеріалів зводимо у таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 - Визначення вартості матеріалів

№	Найменування	Ціна $C_{\text{мі}}$, грн./кг	Норма $N_{\text{мі}}$ витрат, кг	Сума, грн.
1	Склотекстоліт	45,00	0,04	1,80
2	Припій	40,00	0,06	2,40
3	Лак	500,00	0,01	5,00
4	Флюс	130,00	0,02	2,60
5	Хлорне залізо	3,5	0,2	0,70
Разом сумарна вартість матеріалу \check{A}_{11}^n ²				12,50
Транспортно - заготівельних витрат на матеріали (5%)				0,63
Поворотних відходів (2%) $C_{\text{відх}}$				0,25
Разом вартість на матеріали, з урахуванням транспортно-заготівельних витрат, з винятком поворотних відходів $C_{\text{м}}$				12,88

Таким чином вартість на матеріали, з урахуванням транспортно-заготівельних витрат, з винятком поворотних відходів $C_{\text{м}}$ складає 186,43 грн.

Розрахунок вартості покупних напівфабрикатів і комплектуючих виробів зводимо у таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 - Визначення вартості покупних напівфабрикатів і комплектуючих виробів

№ п/п	Найменування	Кількість, шт.	Ціна, грн/шт	Сума, грн.
1	<u>2</u>	3	4	5
	<u>Мікроконтролер</u>			
1	Atmega 64-16Aw	1	23,32	23,32
	<u>Посилювач</u>			
2	ULN2003A	2	1,15	2,30
	<u>Компаратор</u>			
3	LM311	3	0,83	2,49
	<u>Операційний посилювач</u>			
4	LM348J	4	1,24	4,96
	<u>Світлодіод</u>			
5	АЛ307	7	0,15	1,05
	<u>Діод</u>			
6	КД522А	9	0,10	0,90
	<u>Діодна зборка</u>			
7	КД906А	3	4,00	12,00
	<u>Резистори:</u>			
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	СПЗ-19а-20к ±10%	1	1,00	1,00
	<u>Конденсатори</u>			

21	КМ56-Н90-91Н	3	0,73	2,19
22	КМ56-Н90-27П	2	0,30	0,60
23	КМ56-Н90-220Н	2	0,83	1,66
24	КМ56-Н90-100Н	2	0,50	1,00
25	К50-35-100МК-25В	1	0,30	0,30

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5
Вартість покупних напівфабрикатів і комплектуючих разом виробів $\sum_{11}^2 N$				65,92
Вартість покупних напівфабрикатів і комплектуючих виробів разом, з урахуванням транспортно-заготівельних витрат C_{KM}				69,22

Таким чином вартість покупних напівфабрикатів і комплектуючих виробів, з урахуванням транспортно-заготівельних витрат C_{KM} , складає 69,22 грн.

3.2 Порівняльний аналіз подібних систем керування за критеріями

Системи керування, що засновані на різних фізичних елементах, система імпульсно-фазового керування (СІФК), реверсивний ШІМ (широотно-імпульсна модуляція) на транзисторах, тиристорний перетворювач ТЕ-8, ПНТТЕ-160 (перетворювач напруги), кожен має свої позитивні та негативні якості.

Тому для вибору кращого з цих методів проаналізуємо ієрархії чотирьох варіантів (табл. 3.1) враховуючи шкалу відносної важливості (табл.3.2)

[8]

Таблиця 3.1 – Варіанти видів штучних іонізаторів

Технологія	Короткий опис (види систем керування)
A	СІФК
B	ШІМ
C	ТЕ-8
D	ПНТТЕ-160

Таблиця 3.2 – 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 3.3 – Попарне порівняння критеріїв

Критерій	1	2	3	4	5	$\sqrt[6]{\prod_{i=1}^6 k_i}$	X_i
1. Габаритні розміри	1	1	1/3	1/7	7	0,782	0,119
2. ККД	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
A						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 $i = 1, 2, 3, 4$;

$$X_i = \frac{\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 k_i}}{\sum_{i=1}^4 \sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 k_i}}; \quad \hat{A} - \text{сума по стовпці } \sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 k_i}.$$

Таблиця 3.4 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «габаритні розміри»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 k_i}$	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
A					7,79	1,00

Таблиця 3.5 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «коєфіцієнт корисної дії»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 k_i}$	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
A					6,28	1,00

Таблиця 3.6 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «захист від перенавантаження»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 k_i}$	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
A					6,16	1,00

Таблиця 3.7 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «простота обслуговування»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 k_i}$	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
A					6,45	1,00

Таблиця 3.8 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «вартість»

Техноло- гія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\sum_{i=1}^4 k_i}$	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
A					6,43	1,00

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

Таблиця 3.9 – Глобальний пріоритет для кожної альтернативи

Пріори- тети	№1	№2	№3	№4	№5	Гло- баль- ний
Вага	0,119	0,427	0,124	0,288	0,042	
СІФК	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.9) видно, що найбільшим є пріоритет у системи імпульсно-фазового керування (СІФК).

Висновки: За допомогою методу аналізу ієрархій проведено порівняння чотирьох видів систем керування за наступними критеріями: 1) га-

баритні розміри; 2) коефіцієнт корисної дії; 3) захист від перенавантажень; 4) простота обслуговування; 5) вартість. Найбільший локальний пріоритет у критерію «коефіцієнт корисної дії» (дивись табл. 3). За даними таблиць глобальний пріоритет за багатьма критеріями є найвищим для системи імпульсно-фазового керування (СІФК). Тому перевага віддається СІФК, саме вона й буде використовуватися у системі приводу подачі робочого інструмента.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Умови промислової санітарії

Розроблений привод подачі призначений для використання на підприємствах промисловості, що пов'язана з машинобудуванням, металообробкою та інше. Пристрій встановлюється у окремій захисній шафі, що встановлюється в приміщенні цеху.

Спроекований електронний пристрій живиться від мережі змінної напруги 380 В, частотою 50 Гц, відноситься до класу, за величиною живлячої напруги до 1000 В. Приміщення в якому експлуатується електроустановка відноситься до особливо небезпечних приміщень за ступеню поразки електричним струмом. Оскільки присутні такі умови, що створюють підвищену небезпеку як струмопровідний пил, особливу вогкість, можливість одночасного дотику людини до маючих з'єднання із землею металоконструкціями будинку з одного боку, і до металевого корпусу електроустановки з іншого боку, а також хімічно активне середовище.

Пристрій встановлюється в приміщенні, що має пожежонебезпечну категорію - Г. На виробничих площах, де експлуатується електроустановка, є речовини, що не горять та матеріали в горючому, розпеченому або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистої теплоти, іскор і полум'я; тверді речовини та гази, які спалюють або утилізуються як паливо. Зона розміщення електроустановки по класу вибухо- та пожежонебезпеки відноситься до класу В-Па (зона не має небезпечного стану за нормальних умов експлуатації, а можливі тільки в результаті аварій або несправностей) і П-Па (зона із твердими горючими речовинами) відповідно.

Категорія важкості фізичних робіт при експлуатації або ремонті електроустановки відноситься до середньої важкості Па, оскільки пов'язана з переміщенням дрібних виробів або предметів і вимагає певної фізичної напруги.

Відповідно до категорії робіт параметри мікроклімату відповідають оптимальним. Оптимальні та припустимі параметри температури, відносної вологості, швидкості руху повітря в робочій зоні наведені у таблиці 4.1 та 4.2 відповідно.

Таблиця 4.1 - Оптимальні норми температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні промислового приміщення

Період року	Температура повітря, °С	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний і перехідний періоди (температура зовнішнього повітря нижче +10 ⁵ С)	18 - 20	40 - 60	u 0,2
Теплий період (температура зовнішнього повітря +10 ⁵ С та вище)	21 - 23	60 - 40	u 0,3

Таблиця 4.2 – Допустимі норми температури, відносної вологості і швидкості руху повітря в робочій зоні приміщення

Період року	Температура повітря, °С	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
1	2	3	4

Холодний і перехідний періоди (температура зовнішнього повітря нижче $+10^{\circ}\text{C}$)	17 - 23	75	и 0,3
---	---------	----	-------

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4
Теплий період (температура зовнішнього повітря $+10^{\circ}\text{C}$ та вище)	18 - 27	60	и 0,2 – 0,4

Гранично припустима концентрація шкідливих речовин які виділяються у робочій зоні, де експлуатується електроустановка дорівнює для пилу 2 - 6 $\text{мг}/\text{м}^3$, двоокису вуглецю 20 $\text{мг}/\text{м}^3$. При проведенні ремонтних робіт також зміст припою (олов'яно-свинцевого) 0,0017 $\text{мг}/\text{м}^3$.

При проведенні ремонтних робіт що відносяться до розряду зорових робіт Шв, при розмірах застосованих у пристрої елементів від 0,3 до 0,5 значення штучного освітлення відповідає згідно СНиП II-4-79: 750 лк для комбінованого освітлення та 300 лк для загального освітлення.

Визначимо коефіцієнт природного освітлення $\epsilon_{\text{H}}^{\text{VI}}$ для VI поясу світлового клімату за формулою (4.1).

$$\epsilon_{\text{H}}^{\text{VI}} = \epsilon_{\text{H}}^{\text{III}} \cdot m \cdot c, \quad (4.1)$$

де $\epsilon_{\text{H}}^{\text{III}}$ – коефіцієнт природного освітлення для III поясу світлового клімату, %;

m – коефіцієнт світлового клімату ($m = 0,9$ – для Луганської обл.);

c – коефіцієнт сонячності, який залежить від орієнтації світлового отвору за сторонами горизонту ($c = 0,7$ – при орієнтуванні вікон на південь).

$$\epsilon_{\text{H}}^{\text{VI}} = 1,2 \cdot 0,9 \cdot 0,7 = 0,756 \text{ (\%)}$$

Рівень шуму, що виробляється електроустановкою, не перевищує припустимих 60 дБ при експлуатації його в цехових або лабораторних умовах потребує зосередженості при проведенні вимірювальної і аналітичної роботи.

У приміщенні, де експлуатується пристрій, не є в наявності іонізуюче або електромагнітне випромінювання, а теплове випромінювання не перевищує норми.

4.2 Електробезпека

Для забезпечення безпеки експлуатації електроустановки застосовані наступні заходи щодо охорони праці:

- а) організаційні й технічні заходи;
- б) застосування захисних засобів;
- в) захист від випадкового дотику до струмоведучих частин;
- г) контроль і профілактика ушкоджень ізоляції;
- д) заземлення;
- е) захисні відключення;
- ж) сигналізація;
- з) захист від переходу високої напруги в мережу низької напруги;
- к) подвійна ізоляція.

Організаційними заходами, які забезпечують безпеку робіт з електроустановкою, є:

- а) затвердження переліку робіт, які виконуються за нарядом, розпорядженням і у порядку поточної експлуатації;
- б) призначення осіб, відповідальних за безпечне проведення робіт;
- в) оформлення робіт нарядом, розпорядженням або затвердженням переліку робіт, які виконуються в порядку поточної експлуатації;

- г) підготовка робочих місць;
- д) допуск до роботи;
- е) нагляд під час виконання робіт;
- ж) переведення на інше робоче місце;
- з) оформлення перерв у роботі та її закінчення.

Технічними заходами, що забезпечують безпеку робіт, є:

а) підготовка робочого місця. Для підготовки робочого місця до роботи, яка вимагає зняття напруги, слід вжити у вказаному порядку таких технічних заходів:

1) здійснити необхідні відключення та вжити заходів, що перешкоджають помилковому або самочинному ввімкненню комутаційної апаратури;

2) вивісити заборонні плакати на приводах ручного та на ключах дистанційного керування комутаційною апарату;

3) перевірити відсутність напруги на струмоведучих частинах, які слід заземлити для захисту людей від ураження електричним струмом;

б) встановити заземлення (ввімкнути заземлювальні ножі, встановити переносні заземлення);

в) обгородити, за необхідності, робочі місця або струмоведучі частини, що залишилися під напругою, і вивісити на огороженнях плакати безпеки. Залежно від місцевих умов, струмоведучі частини обгородити до чи після їх заземлення. Для тимчасового обгороджування струмоведучих частин, що залишилися під напругою, можуть застосовуватися щити, ширми, екрани тощо, виготовлені з ізоляційних матеріалів;

г) зняття напруги. У разі роботи на струмоведучих частинах, що потребують зняття напруги, повинні бути вимкнені:

1) струмоведучі частини, на яких буде виконуватися робота;

2) необгороджені струмоведучі частини, до яких можливе наближення людей, або ремонтного оснащення та інструменту, механізмів і вантажопідіймальних машин;

3) перевірка відсутності напруги. Перевіряти відсутність напруги необхідно покажчиком напруги заводського виготовлення, справність якого перед застосуванням слід перевірити за допомогою призначених для цього спеціальних приладів або наближенням до струмоведучих частин, розташованих поблизу, які явно перебувають під напругою;

д) встановлення заземлення. Встановлювати заземлення на струмоведучі частини необхідно безпосередньо після перевірки відсутності напруги. Переносні заземлення спочатку треба приєднати до заземлювального пристрою, а потім, після перевірки відсутності напруги, встановити на струмоведучі частини. Знімати переносне заземлення необхідно в зворотній послідовності: спочатку зняти його зі струмоведучих частин, а потім від заземлювального пристрою;

е) зберігання та облік заземлень. Комплекти переносних заземлень мають бути пронумеровані і зберігатися у відведених для цього місцях. Спеціальні місця для розвішування або укладання переносних заземлень мають бути позначені відповідно до номерів, що мають ці комплекти.

Для захисту персоналу обслуговуючого електроустановку застосовуються наступні захисні засоби:

- а) ізолюючі кліщі;
- б) електровимірювальні кліщі;
- в) діелектричні рукавиці;
- г) діелектричні калоші;
- д) інструмент із ізольованими рукоятками;
- е) переносні заземлення;
- ж) ізолюючі накладки та діелектричні килими;
- з) переносні плакати й знаки безпеки;
- к) захисні каски;
- л) захисні окуляри.

Захист від випадкового дотику до струмоведучих частин досягнутий шляхом встановлення на струмоведучі частини діелектричних кожухів, з роз-

ташуванням на них попереджуючих написів і знаків. Підведення живлення до електроустановки відбувається до закритих клемних колодок додатково захищених кожухом, що не мають відкритих струмоведучих частин.

Контроль і профілактику ушкоджень ізоляції здійснюють шляхом виміру опору ізоляції електроустановки:

- а) під час приймально–здавальних випробувань;
- б) періодично в процесі експлуатації, але не рідше одного разу на три роки;
- в) постійно в процесі експлуатації.

Обсяг і норми приймально–здавальних випробувань регламентують ПУЕ, ПТЕ, ПБЕЕП.

Під час випробування підвищеною напругою дефекти ізоляції виявляються внаслідок пробою та наступного пропалювання ізоляції електричним струмом. Виявлені дефекти ізоляції усуваються, після чого повторно проводяться випробування виправленого обладнання.

Періодичний контроль ізоляції повинен проводитися на увімкненій установці.

Постійний контроль ізоляції проводиться під робочою напругою протягом усього часу роботи установки без автоматичного відімкнення. Вимір опору ізоляції проводиться за шкалою приладу постійного контролю ізоляції.

За зниження опору ізоляції до гранично допустимого або нижче прилад подає звуковий сигнал, світловий або обидва сигнали разом.

Встановлення занулення на проектованому пристрої не передбачено.

Опір контуру заземлення, що застосовується в електроустановці становить не менш 4 Ом. Огляд заземлення відбувається щоразу при проведенні ремонтних робіт, одночасно з оглядом електроустаткування, а також цехових і інших електроустановок. Вимір опору заземлення відбувається не рідше одного разу на рік. Заземлення встановлене на всіх частинах електроустановки, на які може бути подана напруга.

На випадок короткого замикання напруги живлення, або перегріву пристрою, передбачена система захисного відключення, побудована на автоматичних вимикачах, теплових реле та запобіжниках, з режимом спрацьовування на порядок нижче граничних параметрів перенапруги електронних приладів, елементів і ізоляційних покриттів струмоведучих систем.

Застосування гальванічної розв'язки в пристрої запобігає проникненню високої напруги до ланцюгів із низькою напругою.

Щоб забезпечити умови потенційної безпеки експлуатації проектного пристрою, використовується сигналізація. Передбачена пізнавальна та аварійна сигналізація. Пізнавальна сигналізація показує наявність напруги (застосовуються лампи, світлодіоди та інше). Аварійна сигналізація дає візуальну інформацію про спрацьовування захисту.

Використовуються провідники "фаза А", "фаза В", "фаза С" – чорного кольору, з обов'язковим додатковим маркуванням провідників кембриками жовтого кольору з нанесенням на них інформації за приналежністю до фази.

4.3 Пожежна безпека

До засобів з пожежебезпеки належать:

- а) застосування засобів пожежної сигналізації;
- б) застосування засобів пожежогасіння;
- в) організаційні заходи.

Відповідно до [21], категорії приміщення приймаємо норми первинних засобів пожежогасіння. Засоби з пожежогасіння та їх кількість наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Засоби з пожежогасіння

Категорія приміщення	Площа, м ²	Вуглекислі вогнегасники ручні (ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8), шт.	Пінні, хімічні вогнегасники, шт.	Ящик з піском місткістю 0,5; 1,0; 3,0 м ² та лопата, шт.	Волок, кошма або азбест (1,1; 2; 1,5; 2,2 м), шт.
	700	1	2	2	2

Окрім пожежного обладнання, вказаного в таблиці, повинні бути розміщені пожежні пункти (шафи, щити) з наступним мінімальним набором пожежного обладнання, що наведений у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Кількість обладнання розміщеного на пожежному пункті

Найменування інвентарю	Кількість, шт.
Сокира	2
Лом та лопата	2
Багор залізний	2
Відро, викрашене у червоний колір	2

Для пожежної сигналізації передбачений тепловий сповіщувач АТІМ – 1, у якому замикання контактів відбувається внаслідок теплової деформації біметалічної пластини. Він працює за температури 60 °С і має розрахункове обслуговування до 15 м². Крім того в цеху встановлено кнопчний сповіщувач ручної дії, кнопка якого захищена склом для уникнення випадкового натискання.

Як організаційні заходи передбачені також проведення протипожежного інструктажу та призначення відповідальних осіб, що стежать за справним

станом і постійною готовністю засобів пожежогасіння і сигналізації. Відведені спеціальні місця для куріння.

У холодний і перехідний періоди року приміщення опалюється центральним опаленням, у теплий період використовується кондиціонування.

Вид вентиляції – механічна, кондиціонування.

4.4 Розрахунок захисного заземлення приладу

Умовою для прийняття вихідних параметрів для розрахунку захисного заземлення є умови експлуатації пристрою, що розглянуті у пункті 4.1. Вихідні параметри для розрахунку захисного заземлення наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.5 – Вихідні параметри для розрахунку заземлення

Напруга пристрою, В	Режим нейтралі	Грунт	Питомий опір ґрунту	Природний заземлювач
380	нейтраль відсутня	глина	60	відсутній

Визначаємо припустимий опір заземлюючого пристрою R_d .

Найбільш припустимий опір $R_{пр}$ захисних заземлень в електроустановках напругою до 1000 В приймається 4 Ом.

Питомий опір ґрунту, у якому передбачається розміщати електроди заземлення $\rho_{вим} = 60$ (Ом·м).

З урахуванням субконтинентальної кліматичної зони, для встановлення захисного заземлення, в якій знаходиться Україна приймаємо кліматичний коефіцієнт за середньої вологості: $\psi = 1,3$

Розрахунковий питомий опір ґрунту ϵ з урахуванням кліматичного коефіцієнта за формулою (4.2).

$$\epsilon = 1 + f \cdot 2m, \quad (4.2)$$

$$\epsilon = 1 + 60^{2,3} \cdot 1,78 \left(\frac{f}{100} \right)^2$$

Потрібний опір штучних заземлювачів за відсутності природних заземлювачів не повинен перевищувати припустимого опору заземлюючого пристрою і приймається у відповідності до формули (4.3).

$$R_{\text{н}} \cup R_{\text{пр}}, \quad (4.3)$$

де $R_{\text{н}}$ – потрібний опір штучного заземлення, Ом;

$R_{\text{пр}}$ – припустимий опір, Ом;

Приймаємо потрібний опір штучних заземлювачів рівним 4 Ом.

Попередньо обираємо конфігурацію заземлення з урахуванням можливості розміщення його на відведеній території у вигляді горизонтальних та вертикальних електродів.

У якості вертикальних заземлювачів обираємо пруткову сталь діаметром 10 мм і довжиною 5 м. Відстань між електродами 5 м. Як горизонтальні електроди також вибираємо сталь круглого перетину не менш 6 мм. Глибина закладання заземлювача 0,7 метрів.

Відповідно до ПУЕ припустимий опір заземлюючого пристрою R_3 з урахуванням питомого опору ґранта $\epsilon_{\text{ґр}}$ визначається за формулою (4.4).

$$R = 1 + \frac{f}{100} \cdot 2R, \quad (4.4)$$

$$R = 1 \frac{60}{100} 24 \cdot 1,24 \quad ()$$

Опір розтіканню вертикального заземлювача R_v визначаємо за формулою (4.5).

$$R = 1 \frac{f}{2^2 d^2 l} \ln \frac{2^2 l}{d} \approx \frac{1}{2} \ln \frac{4^2 t \cdot l}{4^2 t \cdot l} \quad (4.5)$$

де c – розрахунковий питомий опір ґрунту, Ом·м;

l – довжина вертикального заземлювача, м;

d – діаметр вертикального заземлювача, м;

t – відстань від поверхні закладення заземлювача до середини довжини вертикального заземлювача, м.

Відстань поверхні закладення заземлювача до середини довжини вертикального заземлювача визначаємо за формулою (4.6).

$$t = t_0 \approx \frac{1}{2} l, \quad (4.6)$$

де t_0 – глибина закладення заземлювача, м.

$$t = 0,7 \approx \frac{1}{2} 25 \cdot 1,32 \quad ()$$

$$R = 1 \frac{78}{2^2 3,14^2 5} \ln \frac{2^2 5}{0,01} \approx \frac{1}{2} \ln \frac{4^2 3,2 \cdot 5}{4^2 3,2 \cdot 5} \cdot 0,1 \cdot 2,484 \cdot 16,91 \approx 0,412 \cdot 1,18,2 \quad ()$$

Кількість вертикальних заземлювачів n знаходимо за формулою (4.7).

$$n \approx \frac{R}{R_{\text{эк}}}, \quad (4.7)$$

де $z_{\text{е}}$ - коефіцієнт використання заземлювачів, що враховує взаємне екранування.

У відповідності до довідника [21] обираємо коефіцієнт використання $z_{\text{е}}$ з урахуванням інтерполяції 0,6.

$$n \approx \frac{18,2}{2,4 \cdot 0,6} \approx 12,64$$

Обираємо до встановлення 13 вертикальних заземлювачів пруткової сталі.

Довжину горизонтального заземлювача за розташуванням заземлювача за контуром вираховуємо за формулою (4.8).

$$l \approx 1,05^2 a^2 n, \quad (4.8)$$

де a – відстань між електродами, м.

$$l \approx 1,05^2 \cdot 25^2 \cdot 13 \approx 68,25 \text{ (м)}$$

Опір розтікання горизонтального заземлювача $R_{\text{г}}$ знаходимо за формулою (4.9).

$$R_{\text{г}} \approx \frac{f}{2 \cdot d^2 l} \ln \frac{l^2}{d^2}, \quad (4.9)$$

$$R_{\text{г}} \approx \frac{78}{2 \cdot 3,14^2 \cdot 68,25} \ln \frac{68,25^2}{0,01^2} \approx 0,182 \cdot 13,41 \approx 2,44 \text{ (Ом)}$$

Дійсний опір розтікання горизонтального заземлювача R_r' з урахуванням коефіцієнту використання:

$$R_r' = 1 \frac{R}{\lambda}, \quad (4.10)$$

де λ_r – коефіцієнт використання горизонтальних заземлювачів відносно до довідника [21].

$$R_r' = 1 \frac{2,44}{0,28} = 8,71(\text{ Ом})$$

Еквівалентний опір струму розтікання штучних заземлювачів $R_{шз}'$ знаходимо за формулою (4.11).

$$R_{шз}' = 1 \frac{R^2 R}{R^2 \lambda + \sum R^2 n^2 \lambda}, \quad (4.11)$$

$$R_{шз}' = 1 \frac{18,2^2 2,4}{18,2^2 0,28 + \sum 2,4^2 13^2 0,6} = 1 \frac{43,68}{23,816} = 1,834(\text{ Ом})$$

Отримане значення $R_{шз}'$ не перевищує розрахунковий припустимий опір заземлювачів з урахуванням питомого опору ґрунту.

Розраховуємо еквівалентний опір заземлювачів R_z' за формулою (4.12).

$$R_z' = 1 \frac{R_{шз}'^2 R}{R_{шз}' + \sum R}, \quad (4.12)$$

$$R_z' = 1 \frac{8,71^2 2,4}{8,71 + \sum 2,4} = 3,31(\text{ Ом})$$

Еквівалентний опір розтікання заземлювачів не перевищує припустимого опору у 4 Ом.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

- Розроблено привід подачі робочого інструменту металообробних верстатів, що має повністю цифрове керування та призначений для керування двигунами постійного струму, що набули широкого застосування у багатьох галузях промисловості та народного господарства.
- Електричний розрахунок усіх елементів та систем дозволив визначити вимоги до силових елементів схеми електричної принципової. Повністю цифрове рішення системи автоматичного регулювання і системи імпульсно-фазового керування дозволило збільшити функціональність і розширити сервісні функції. Заміна мікроконтролером систем і ланцюгів релейного керування, функції яких виконували аналогові елементи, дозволило поліпшити масогабаритні показники.
- Привід може застосовуватись у промисловості для керування двигунами постійного струму металообробних верстатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Белов, А.В. Микроконтроллеры AVR: от азов программирования до создания практических устройств / А.В. Белов. - СПб: Наука и техника, 2016. - 544с.
2. Евстифеев, А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Classic фирмы ATMEL / А.В. Евстифеев. - М.: ДМК, 2015. - 286 с.
3. Редькин, П.П. Микроконтроллеры Atmel архитектуры AVR32 семейства AT3 UC3 / П.П. Редькин. - М.: Техносфера, 2010. - 784 с.
4. Хартов, В.Я. Микроконтроллеры AVR. Практикум для начинающих: Учебное пособие / В.Я. Хартов. - М.: МГТУ им. Баумана, 2012. - 280 с.
5. Трамперт В. Измерение, управление и регулирование с помощью AVR-микроконтроллеров. Пер. с нем. – К.: «МК-Пресс», 2009. – 208 с.
6. Богданов І.Т. Аналіз резонансних кіл однофазного змінного струму засобами MatLab / І.Т. Богданов, Ю.О. Єфименко, М.О. Стеценко // Фізика та астрономія в школі. – 2010. – №3/(78).
7. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. Ч.1. – 199 с.
8. Гліненко Л.К. Основи моделювання технічних систем: навчальний посібник [Текст] / Л.К. Гліненко, Г.С. Сухоносів. – Львів: Бескид Біт, 2003. – 176с.
9. Дьяков В.И. Типовые расчеты по электрооборудованию: Практ. пособие – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. – 160 с.
10. Електроніка і мікросхемотехніка: Навчальний посібник для студентів вищ. закл. освіти, що навчаються за напрямками "Електромеханіка", "Електронні пристрої та системи", "Електротехніка та електротехнології": У 4-х т. / Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В., Юрченко М.М., Сенько Л.І., Ясінський В.В. -К.: Каравела, 2013. Т.4. Кн.1. Силова електроніка.– 640 с.
11. Електроніка і мікросхемотехніка: Навчальний посібник для студентів вищ. закл. освіти, що навчаються за напрямками "Електромеханіка", "Електронні пристрої та системи", "Електротехніка та електротехнології": У 4-х т. /

Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В., Юрченко М.М., Сенько Л.І., Ясінський В.В. -К.: Каравела, 2013. Т.4. Кн.2. Силова електроніка.– 316 с.

12. Електроніка та мікросхемотехніка [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка» / А. А. Щерба, К. К. Победаш, В. А. Святненко: – Київ: НТУУ «КПІ», 2013. – 360 с. Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/3569>

13. Полупроводниковые приборы. Транзисторы: Справочник / В.Л. Аронов, А.В. Баюков, А.А. Зайцев и др. Под общей ред. Н.Н. Горюнова. - 2-е изд., переработанное. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 904 с.

14. Полупроводниковые приборы. Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: Справочник / А.В. Баюков, А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев и др. Под ред. Н.Н. Горюнова - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 744 с.

15. Перельман Б.Л., Шевелов В.И. Отечественные микросхемы и их зарубежные аналоги: Справочник. «НТИЦ Микротех», 2007. - 375 с.

16. Полупроводниковые приборы. Диоды выпрямительные, стабилитроны, тиристоры: Справочник - 2-е изд. стереотип / А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев, В.В. Мокряков и др. Под ред. А.В. Голомедова. - М.: КУбк-а, 1996. - 528 с.

17. Резисторы: Справочник. / Под ред. И.И. Черткова и В.М. Терехова - М.: Радио и связь, 1991. - 528 с.

18. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие для ВУЗов / В.М. Парфёнов, Э.Н. Каньшная, В.П. Усачёв. - М.: Радио и связь, 1989. - 272 с.

19. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для ВУЗов. - М.: Высш. школа, 1982. - 496 с.

20. Pselectro.ru [Електронний ресурс]: Печатные платы. Основные понятия и терминология печатных плат. - Режим доступу: <http://www.pselectro.ru/article/7/84/>. - Дата доступу: листопад 2020.

21. Ligazakon.ua [Електронний ресурс]: Постанова №42 от 01.12.1999, Категорія робіт - Режим доступу:

http://search.ligazakon.ua/1_doc2.nsf/link1/TM009433.html. - Дата доступу: листопад 2020

22. Studfiles.net [Електронний ресурс]: Категорії робіт - Режим доступу: <https://studfiles.net/preview/5013259/page:24/>. - Дата доступу: листопад 2020

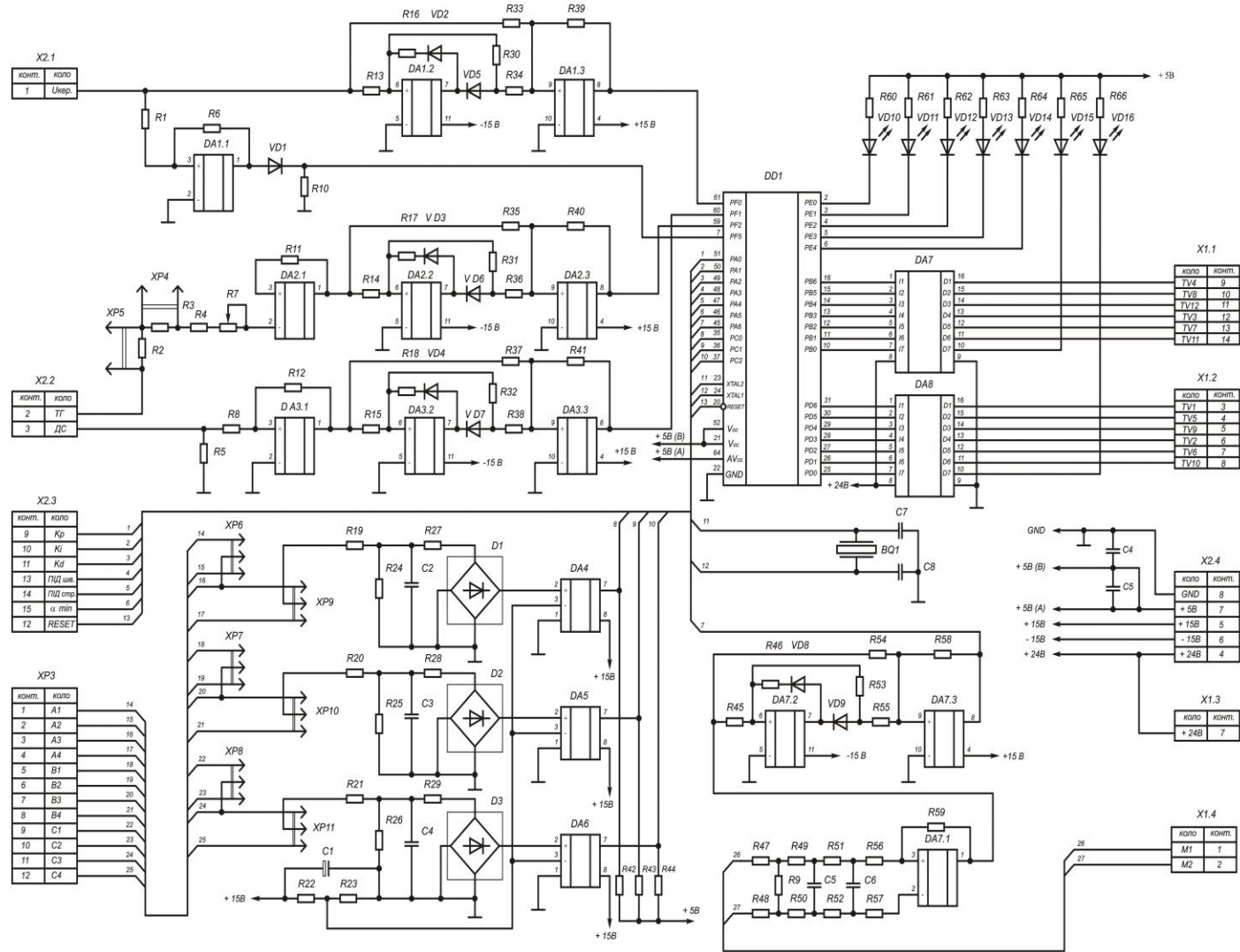
23. Library.if.ua [Електронний ресурс]: Шум, його вплив на організм працівника та заходи щодо зниження шуму - Режим доступу: <https://library.if.ua/book/86/6047.html>. - Дата доступу: листопад 2020

24. Life-prog.ru [Електронний ресурс]: Вплив освітлення на виробничу діяльність. - Режим доступу: https://life-prog.ru/ukr/1_936_vpliv-osvitlennya-na-virobnichu-diyalnist.html. - Дата доступу: листопад 2020

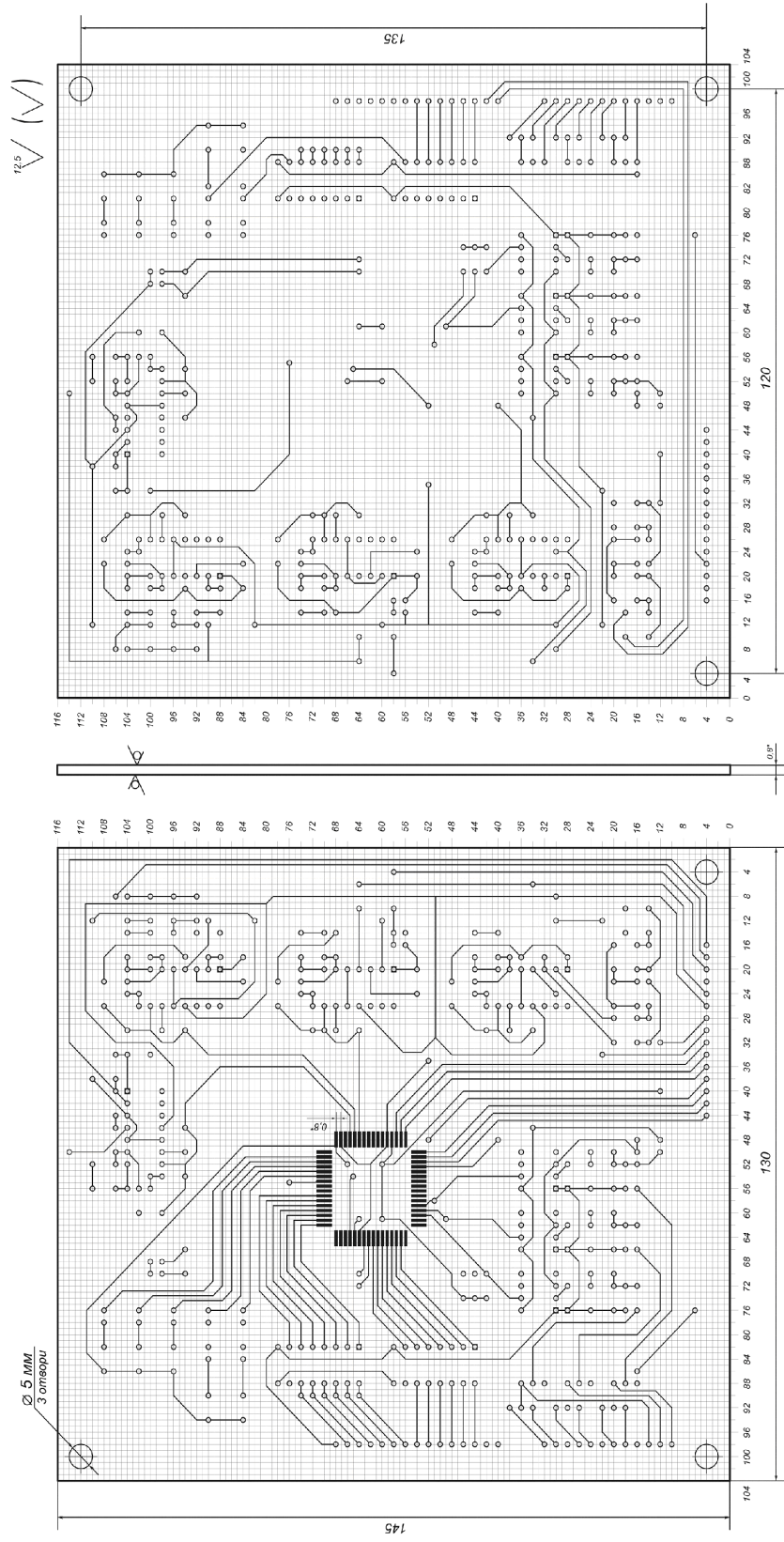
25. Studopedia.com.ua [Електронний ресурс]: Вимоги до виробничих приміщень - Режим доступу: https://studopedia.com.ua/1_69696_vimogi-do-virobnichih-primishchen.html. - Дата доступу: листопад 2020

26. Studfiles.net [Електронний ресурс]: 69 Загальні вимоги пожежної безпеки - Режим доступу: <https://studfiles.net/preview/5602508/page:36/>. - Дата доступу: листопад 2020

"Додаток А"



"Додаток Б"

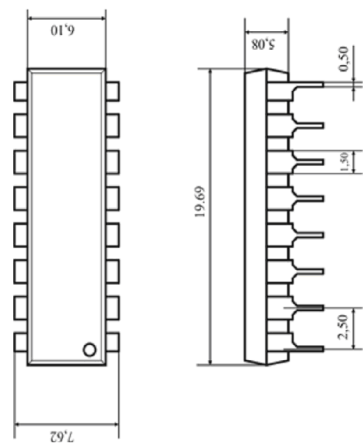


- 1 Висотавити хімічним способом.
- 2 Розмір для стрижка.
- 3 Незакінчені елементи відхиляють розміри Н 12; н 12; ± 1/2 мм.
- 4 Ширина провідників 0,25 мм.
- 5 Відстань між провідниками для контактної площадки не менше 0,25 мм.
- 6 Відстань між провідниками для контактної площадки не менше 0,25 мм.
- 7 Площа контактного металічного покриття.
- 8 Платів повинні відповідати ГОСТ 23752-79.

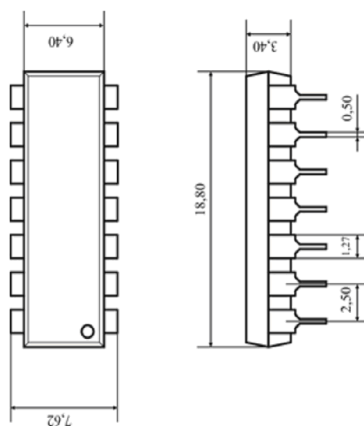
Позначення елемента	Діаметр отв. мм	Кільк.	Прим.
С	0,7	411	
		1,00	
		Металізація	

Параметри напівпровідникових приладів

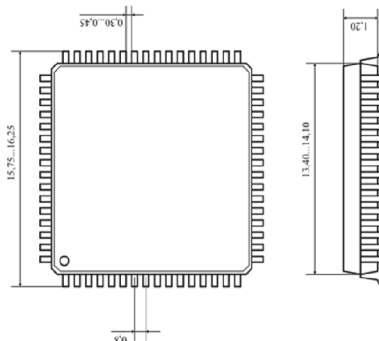
Параметри посилювача ULN2003A



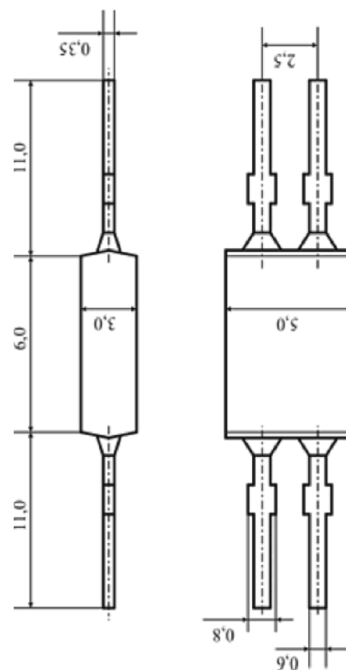
Параметри операційного посилювача LM348



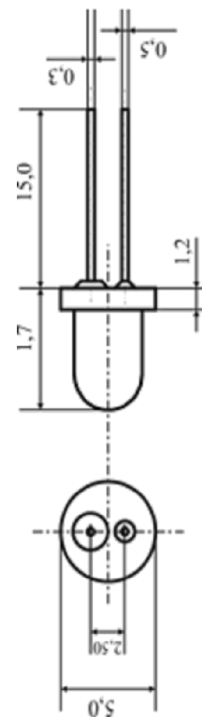
Параметри мікроконтролера АТmega64-16 Aw



Параметри діодної зборки КД906

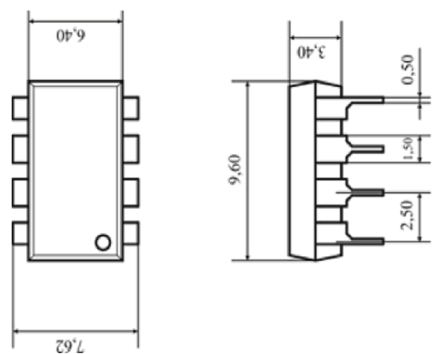


Параметри світлодіода АЛ307

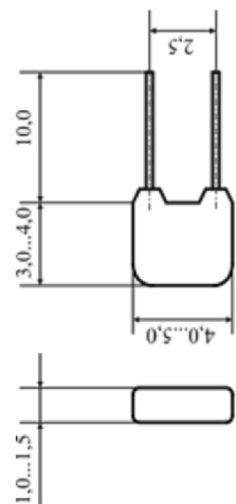


Параметри напівпровідникових приладів

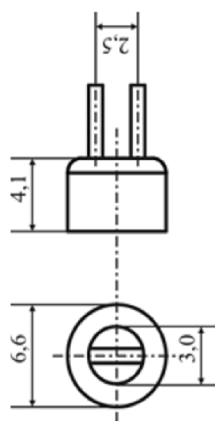
Параметри компаратора LM311



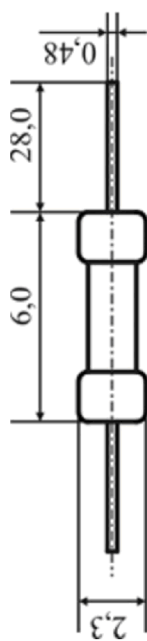
Параметри конденсатора КМ56



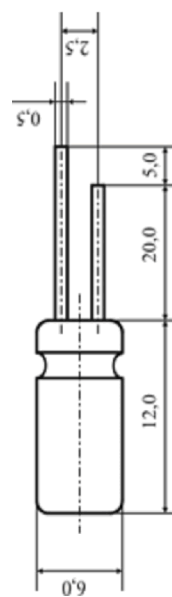
Параметри резистора СПЗ-19



Параметри резистора МЛТ-0,125 та С2-23



Параметри конденсатора К50-35



Параметри діода КД522

