НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Сергій ПЕРЕСАДА
(підпис)
"___"_____20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

на тему: Швидкодіючий автоматизований електропривод механізму коливань виробу при дуговому наплавленні

Виконав (-ла): студент (-ка) 3 курсу, групи ЕП п71
(шифр групи)

Шишка Дмитро Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник доцент, к.т.н., доцент Халімовський Олексій Модестович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Рецензент доцент, к.т.н., доцент Галіновський Олександр Михайлович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент (-ка) _____
(підпис)

Київ – 2020 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	А4		Завдання на дипломний проект	2	
2	А4	141.0013.011.БР	Пояснювальна записка		
3	А1	141.0013.011.БР	Креслення загального виду	1	
4	А1	141.0013.011.БР	Схема електрична принципова	1	
5	А1	141.0013.011.БР	Результати досліджень	1	

				141.0013.011.БР		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.				Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівн.					2	
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-п71	
Н/контр.						
Зав.каф.						

Пояснювальна записка
до дипломного проекту

на тему: Швидкодіючий автоматизований електропривод механізму коливань виробу при дуговому наплавленні

Київ – 2020 р.

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва)

Освітньо-професійна програма – Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Сергій ПЕРЕСАДА
(підпис)

«___»_____20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Шишка Дмитро Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Швидкодіючий автоматизований електропривод механізму коливань виробу при дуговому наплавленні,
керівник проекту к.т.н., доц. Халімовський О.М.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «___»_____ 20__ р. №_____

2. Термін подання студентом проекту _____
3. Вихідні дані до проекту: маса платформи з виробом m = 5 кг; ширина платформи 0,15 м; висота платформи 0,03м; матеріал платформи та виробу-сталь марки 1511; частота коливань платформи-10 Гц; кутова амплітуда коливань відносно вертикальної вісі – 24 кутових градуса.

4. Зміст пояснювальної записки: Аналітичний огляд. Розрахунок потужності двигуна. Синтез системи керування. Дослідження САК. Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 1. Загальний вигляд технологічної установки. 2. Результати дослідження САК. 3. Електрична схема САК

6. Консультанти розділів проєкту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проєкту.

7. Дата видачі завдання 01.04.2020

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналітичний огляд в області автоматизованого електроприводу промислової установки (технологічного процесу)	09.04.20	
2	Визначення потрібної потужності електродвигуна	20.04.20	
3	Вибір електродвигуна та силового обладнання.	05.05.20	
4	Математична модель електромеханічного об'єкта.	10.05.20	
5	Синтез (проєктування) системи керування	15.05.20	
6	Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи	28.05.20	
7	Розробка (опис) схеми керування	03.06.20	
8	Охорона праці та техніка безпеки	31.05.20	
9	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини. Підготовка презентації	05.06.20	

Студент _____ Дмитро ШИШКА
(підпис)

Керівник проєкту _____ Олексій ХАЛІМОВСЬКИЙ
(підпис)

Реферат

Дипломний проєкт виконаний на 67 сторінках, вміщує 32 рисунки та 2 таблиці.

Розроблено швидкодіючий автоматизований електропривод механізму коливань платформи з виробом при дуговому наплавленні. Виконано розрахунок потужності електроприводу. Спроєктовано систему керування з П-регулятором контуру положення.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОПРИВОД, ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, МЕХАНІЗМ КОЛИВАНЬ, ДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ, ДВИГУН.

Abstract

This work is made on 67 pages, has 32 figures, 2 tables.

The high-speed automated electric drive of the mechanism of oscillations of a platform with a product at an arc surfacing is developed. The calculation of the electric drive power is performed. The control system with the P-regulator of a contour of position is designed.

Key words: ELECTRIC DRIVE, ELECTRIC WELDING, AUTOMATION, OSCILLATION MECHANISM, ARC WELDING, MOTOR.

Зміст

Вступ 9

1. Аналітичний огляд в області автоматизованого електроприводу промислової установки 10

2. Вибір електродвигуна та силового обладнання 27

3. Синтез системи автоматичного керування 29

4. Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи керування швидкістю. Розробка системи керування положенням 37

5. Опис схеми керування 46

6. Спецчастина. Автоматизація технологічного процесу 49

7. Охорона праці та техніка безпеки 56

Висновки 64

Перелік використаних джерел 65

Додаток А

Перелік елементів……..67

Вступ

Сучасне обладнання для механізованого та автоматичного дугового зварювання та наплавлення є досить складним типом обладнання із специфічними системами та агрегатами.

Автоматичні машини та напівавтомати, як основні представники цього виду обладнання, постійно вдосконалюються і в основі цього лежать такі напрямки: застосування нових технологій зварювання та наплавлення; розробка нових середовищ та областей використання; нові можливості технічних засобів для проведення дугового процесу [1].

Слід зазначити широкий спектр конструкцій автоматичних та напівавтоматів для зварювання та відновлення виробництва від маси, що випускається загального призначення, до тих, які розроблені для вирішення спеціальних проблем за певних умов.

Застосування певної кількості механізмів, оснащених електродвигунами, що виконують експлуатацію, встановлення або коригувальні рухи систем апаратури, характерне для всього обладнання автоматичного та напівавтоматичного зварювання плавким електродом. Для управління цими рухами використовується широкий спектр різних електроприводів, як постійного, так і змінного струму [2].

1. Аналітичний огляд в області автоматизованого електроприводу промислової установки

Електроприводи для механізованого та автоматичного зварювання та плавлення поділяють на автоматизовані та напівавтоматизовані. Такі електроприводи складаються з: механізму руху при зварюванні і наплавленні, механізму координування руху зварювального інструменту, пристрої для моніторингу руху інструменту, механізм коливання платформи, механізм для компенсації вібрацій.

До теперішнього часу порівняно прості конструкції електричних приводів на основі електродвигунів постійного струму з тиристорними або транзисторними регуляторами з фазовим або ШІМ-регулюванням використовуються у високоефективному зварювальному обладнанні для всіх лінійних переміщень.

Частина таких електроприводів масового виробництва для промислового застосування використовувалася в системах зварювального обладнання, але більшість їх можливостей, зокрема, в автоматичних машинах та напівавтоматах, були невикористані. Конструкції електричних приводів, цілеспрямовано використовувані в ряді систем зварювального обладнання що були розроблені та все ще розвиваються в Інституті електрозварювання Патона.

Тиристорні та транзисторні регулятори для колекторних електродвигунів малої потужності (до 100 Вт), які легко виготовляються та встановлюються, є досить популярними з точки зору їх застосування в механізованому зварювальному обладнанні та невеликих засобах механізації. Проста технологічна схема таких електроприводів, запропонована EWI Paton Національної академії наук України, дозволяє отримати діапазон управління не менше 1:10 з механічними характеристиками жорсткістю $\beta \geq 5\%$ у всьому діапазоні регулювання шляхом вибору структури зворотного зв'язку. Таких властивостей тиристорних та транзисторних електричних приводів простих конструкцій цілком достатньо для роботи систем зварювального обладнання, що застосовують традиційні технології зварювання та наплавлення.

Тиристорний електропривод у зворотному варіанті, інтегрований в локальну систему управління BUSP1, BUSP2, був розроблений Paton EWI IEE і введений у масове виробництво. Цей електропривод використовується в зварювальних і наплавлювальних автоматичних і напівавтоматичних машинах.

Напівавтоматична машина ПШ107 (механізм подачі), розроблена з електроприводом ШІМ транзистора, додатково надає можливість зворотного зв’язку в ній відповідно до параметрів зварювального процесу, забезпечуючи додаткові стабілізуючі дії на зварювальний процес завдяки впливу на швидкість подачі електрода [3].

До цих пір транзисторні електричні приводи в режимі вільного ходу використовуються в деяких зразках механізованого зварювального обладнання та в тому що стосується малої механізації, особливо при розробці зразкових моделей різних типів зварювальних та наплавлювальних машин. Такі електричні приводи з мінімізованими, теоретично обґрунтованими [4], схемами технологічних рішень у великій кількості версій розроблені Paton EWI. Наприклад, така версія електричного приводу показана на рис. 1.1.

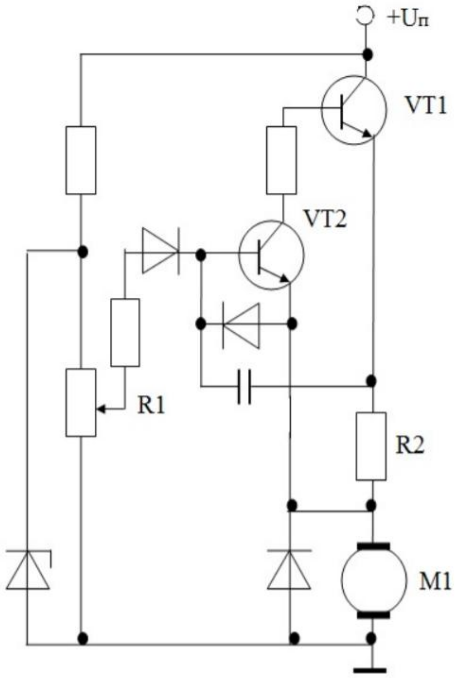


Рисунок 1.1 – Електрична схема транзисторного електроприводу

Простота реальної схеми не потребує складних пояснень. Завдання частоти обертання виконує резистор R1. Напруга на цьому резисторі порівнюється з

напругою зворотного зв'язку на резисторі R2 (E - ЕРС електродвигуна M1). Транзистор VT2 відкриється, якщо напруга задачі Uзад> E. Одночасно відкривається силовий транзистор VT1, подаючи імпульс напруги до електродвигуна. Частота цих імпульсів залежить від параметрів електродвигуна і зміни навантаження на вал робочого механізму.

Останнім часом широко застосовується асинхронний регульований електропривод, головним чином при розробці обладнання для зварювання складних конструкцій [5]. Для прикладу розглянемо структуру обладнання для електрошлакового зварювання вертикальних, похилих і криволінійних з'єднань, включаючи електрошлаковий апарат у вигляді встановленого самохідного пристрою важкого типу, оснащеного всіма необхідними механічними та електромеханічними коректорами для виконання високоякісних зварювальних з'єднань [6]. Система управління базується на запрограмованому контролері типу CJ1M виробництва компанії Omron (Японія). Сучасні перетворювачі частоти типу Omron V1000 використовуються для управління пристроєм асинхронних двигунів. Paton EWI має досвід проектування приладів зварювання та наплавлення різного призначення із застосуванням вже накопиченого досвіду відносно регульованого асинхронного електроприводу.

Зупинимось докладніше на застосуванні двигунів постійного струму, що включають крокові двигуни в конструкціях зварювальних та наплавлювальних пристроїв.

До недавнього часу у Paton EWI був накопичений значний досвід у розробці інженерних рішень щодо застосування крокових та тиратронних електроприводів [7]. У цьому випадку ці електроприводи в основному спрямовані на обладнання для різних цілей, наприклад, підводне зварювання та на реалізацію нових технічних і технологічних рішень, таких як: керована імпульсна подача електродного проводу; модульовані процеси коливання басейну зварного шару з контрольованими параметрами; зниження масомірних характеристик механізмів і пристроїв в цілому. На рис.1.2 представлено установку для підводного зварювання.

Рисунок 1.2 – Установка для підводного зварювання

Обмежені умови зварювання визначали вибір двигунів для зварювальних систем. Це поетапні електродвигуни з високим крутним моментом, що забезпечують прямий привід системи подачі, а також переміщення при зварюванні. Широко застосовуються крокові електродвигуни у прямому керуванні механізмами подачі електродних дротів напівавтоматичних машин підводних агрегатів для підводного зварювання [8]. У такому напівавтоматичному алгоритмі подачі імпульсних та модульованих електродних проводів реалізовано значне спрощення завдання на виконання високоякісних зварних швів, особливо на вертикальній площині.

Вибір крокових двигунів, крім вищезазначених, визначається високою надійністю під час роботи в рідкому середовищі (наприклад, ізолююча і мастильна рідина в відділенні для подаючого механізму з електродвигуном),

особливо через відсутність комутаційно-щіткового блоку. Крім вищевказаного, слід зазначити, що крокові двигуни для стабілізації струму в обмотках двигуна використовують регулювання ширини імпульсу, застосовуються в сучасних драйверах системи. Можна використовувати дешеві та прості нерегульовані джерела живлення. Схема з ключовою стабілізацією струму, незалежно від коливань напруги, дозволяє підтримувати стабільність моменту, забезпечуючи високу швидкість збільшення струму в обмотках. Одночасно з простотою регулювання можна мінімізувати втрати, що дуже важливо для конструкцій автоматичних машин, де електродвигун у підводного блоку може бути більше 200 м від його блоків живлення та управління [9].

Рисунок 1.3 – Прилад для підводного зварювання

Розробляючи алгоритм управління прискоренням (пуском), основним критерієм є мінімізація часу пуску для досягнення заданої швидкості обертання вала двигуна, що є основою для реалізації різних типів подачі імпульсу електродного дроту.

Як правило, у розглянутих конструкціях зварювального обладнання використовується електричний привід з кроковими двигунами масового випуску.

Метою даної роботи є розробка швидкодіючого електроприводу механізму коливань виробу при дуговому наплавленні плавлячимся електродом. Електропривод має забезпечувати частоту коливань 10 Гц, при амплітуді коливань 24° відносно вертикального положення.

Технологічна схема механізму представлена на рис. 1.4.

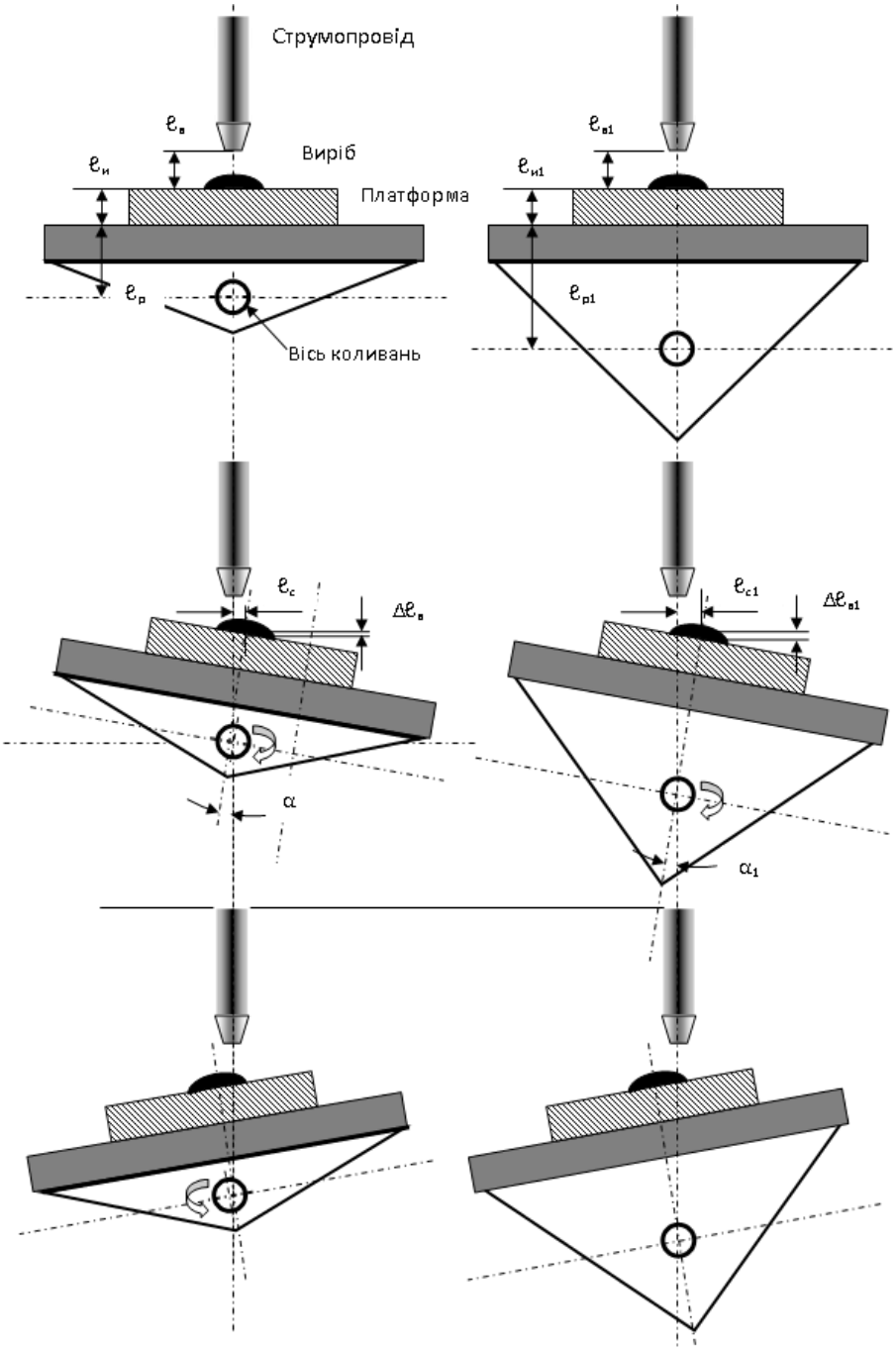
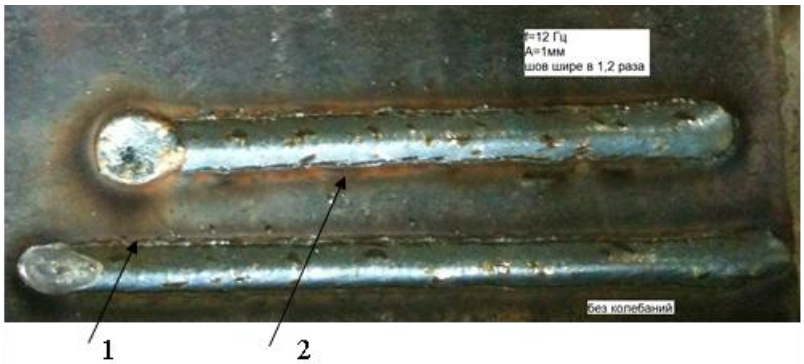


Рисунок 1.4 – Технологічна схема

На рис.1.4 суцільним чорним кольором позначена коливальна платформа, виріб позначений штрихом. На рис.1.5 представлені результати порівняльної наплавки з коливаннями платформи та без коливань.



Результати порівняння: 1–без коливань; 2–з коливаннями

Рисунок 1.5 – Порівняння результатів наплавки

За результатом розрахунку обертового моменту платформи потрібно отримати потужність двигуна без застосування редуктора. Це означає, що для розрахунку можна варіювати розмірами платформи для отримання необхідного обертового моменту платформи і, відповідно, моменту двигуна для його вибору. Потім підібрати геометричні розміри платформи для її заданого обертового моменту.

Вимоги до електроприводу установки.

1. Надійність.

2. Точність (похибка в межах кількох градусів допустима).

3. Швидкодія (система має виконувати коливання з частотою 10 Гц).

4. Якість динамічних процесів ($\Delta x_{дин}(t)<5\%$).

5. Енергетична ефективність.

6. Сумісність електроприводу з системою електропостачання та інформаційною системою.

7. Ресурсоємність.

Також система повинна мати великий ресурс, мати високу перевантажувальну здатність по моменту і високий пусковий момент, великий ККД і мінімальний пуковий струм та масо-габаритні показники.

Розглянемо можливі варіанти системи електроприводу, що можуть бути застосовані для даної ситеми:

1) Електропривод по системі ТП-Д

В останній час розвиток та удосконалення силової та напівпровідникової техніки визначає широке застосування статичних перетворювачів.

Електропривод по системі ТП-Д має наступні переваги:

· силовий тиристорний перетворювач виключає електромагнітні інерційності, які вносять ланцюги збудження та якоря генератора в системі Г-Д, тобто має підвищену швидкодію, яка обмежується головним чином комутаційною здатністю тиристорного перетворювача і механічною інерцією електроприводу;

· дана система проста і безвідмовна в роботі;

· можлива економія міді та кольорових металів, які йдуть на тиристорний агрегат і трансформатор, в порівнянні з електромеханічним перетворювачем;

· електропривод потребує мінімального обслуговування;

· у системи дуже великий ККД, перевищуючий 95% ;

· невеликі габарити, вага, блочна компоновка дозволяє зменшити необхідні виробничі площі, зменшити капітальні витрати на установку та експлуатацію.

В той же час в системі ТП-Д характерні наступні недоліки:

· значні пульсації на виході тиристорного перетворювача обумовлюють проблему нагріву і комутації; для поліпшення форми кривої випрямленого струму, як правило необхідна установка згладжуючого дроселя;

· при глибинному регулюванні швидкості електропривод має низький коефіцієнт потужності;

· перевантажувальна можливість менш за систему Г-Д;

· при роботі тиристорного перетворювача спотворюється форма напруги у мережі змінного струму, через що виникають перешкоди;

· для забезпечення рекуперації енергії у мережі необхідно використання спеціальних схем включення.

2) Принцип векторного керування можна сформулювати у такий спосіб: Необхідно визначити напрямок і кутове положення вектора потокозчеплення ротора двигуна. Ортогональні осі d,q направляють так, що вісь d збігається з напрямком вектора потокозчеплення ротора. Вектор напруги статора двигуна регулюють в осях d,q. Складова напруги по осі d регулює величину струму статора по осі d. Змінюючи струм статора по осі d варто домагатися необхідного значення амплітуди вектора потокозчеплення ротора. Струм статора по осі q, контрольований напругою по цій осі, визначить момент, що розвиває двигун. У такому режимі роботи АД подібний до двигуна постійного струму, так по осі d формується поле машини (обмотка збудження для двигуна постійного струму), а струм по осі q задає момент (якірна обмотка двигуна постійного струму). Живлення АД у режимі векторного керування здійснюється від інвертора, що може забезпечити в будь-який момент часу необхідні амплітуду й кутове положення вектора напруги (або струму) статора.

В основу побудови системи регулювання швидкості покладені принципи, що випливають із математичного опису асинхронного двигуна в обертовій системі координат.

Недоліком системи векторного керування, розглянутої вище, є необхідність використання спеціального двигуна, конструктивною особливістю якого є наявність датчиків Хола, що вимірюють магнітний потік у зазорі.

3) Електропривод по системі ТПЧ-АД

В останні два десятиріччя, регулювальний асинхронний електропривод зазнав такі істотні зміни у своєму розвитку, що повністю витиснув із багатьох галузей синхронний привод і привод постійного струму. Це пов'язано передусім з досягненням в силовій електроніці і мікропроцесорній техніці, на основі яких були розроблені перетворювачі частоти, які забезпечують управління асинхронними короткозамкненими двигунами з енергетичними та динамічними показниками, сумірними або перевищеними показниками інших приводів.

Сьогодні частотне управління є для асинхронного привода свого роду технічним стандартом. В той же час практично вийшли із застосування і не

використовуються такі способи управління та пристрої як симетричне і несиметричне управління напругою, керування введенням додаткових опорів у коло статора і ротора, управління змінною числа пар полюсів та ін.

Раніше для рішення завдання регулювання швидкості використовувалися тільки приводи постійного струму. Зараз асинхронні приводи стають усе більш популярними з кожним днем. Вони складаються із перетворювача частоти й асинхронного двигуна. Причини цього розвитку наступні:

- асинхронні машини невимогливі до техобслуговування;
- можливе експлуатування у вибухонебезпечній зоні;
- високий коефіцієнт потужність/маса для асинхронного двигуна;
- можливість керування при максимальній швидкості;
- низька вартість асинхронних двигунів;
- постійне поліпшення технології перетворювача з одночасним зниженням ціни.

У цей час розроблені порівняно недорогі системи регульованого по частоті й по моменті. Оптимальне рішення для регульованих приводів припускає установку перетворювачів частоти й асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором. Це недорогі двигуни, що мають малий момент інерції, високу ступінь захисту й незначних витрат на обслуговування.

Перетворювач частоти перетворює напруга мережі в напругу на електродвигуні зі змінною амплітудою й частотою. Двигун може працювати з будь-якою частотою обертання, навіть вище синхронної. Його перевантажувальна здатність і максимальний обертаючий момент при роботі з перетворювачем зберігаються.

4) Наступний варіант електроприводу – привод на основі крокового двигуна.

Кроковий двигун - це електромеханічний пристрій, який перетворює електричні імпульси в дискретні механічні рухи. Вал або шпиндель крокового двигуна обертається з різними кроками, коли електричні командні імпульси подаються на нього у відповідній послідовності.

Обертання двигунів має кілька прямих зв’язків із цими застосованими вхідними імпульсами. Послідовність поданих імпульсів безпосередньо пов'язана з напрямком обертання валів двигуна. Швидкість обертання валу двигуна безпосередньо пов'язана з частотою вхідних імпульсів, а довжина обертання безпосередньо пов'язана з кількістю застосованих вхідних імпульсів.

Переваги:

- Кут обертання двигуна пропорційний вхідному імпульсу.
- Мотор має повний обертовий момент у спокої (якщо обмотки під напругою)
- Точне розташування та повторюваність руху, оскільки хороші крокові двигуни мають точність 3 - 5% кроку, і ця помилка не є сукупною від одного кроку до іншого.
- Відмінна реакція на пуск / зупинку / назад.
- Дуже надійний, оскільки в моторі немає контактних щіток. Тому термін служби мотора просто залежить від терміну експлуатації підшипника.
- Відповідь двигунів на цифрові вхідні імпульси забезпечує управління з відкритим контуром, що робить двигун простішим і дешевшим для управління.
- Можливо досягти дуже низької швидкості синхронного обертання з навантаженням, яке безпосередньо з'єднане з валом.
- Широкий діапазон швидкостей обертання може бути реалізований, оскільки швидкість пропорційна частоті вхідних імпульсів.

Недоліки:

- Резонанси можуть виникати при неправильному контролі.
- Непросто керувати на надзвичайно високих швидкостях.

Однією з найбільш значущих переваг крокового двигуна є його здатність точного відпрацювання в системі з відкритим контуром [10].

Управління відкритим циклом означає, що зворотній зв'язок про позицію не потрібен. Цей тип управління виключає потребу в дорогих пристроях

зондування та зворотного зв’язку, таких як оптичні кодери. Необхідно просто відстеження кількості введених імпульсів кроку.

5) Сервопривод.

Сервопривід - це невеликий пристрій, який має вихідний вал, який позиціонується за допомогою кодованого сигналу. Це поворотний або лінійний привід, що дозволяє точно контролювати кутове або лінійне положення, швидкість і прискорення [10].

Серводвигун побудований на основі базового двигуна, додаючи:

– Деякі зменшення передач
– Датчик положення для валу двигуна
– Електронна схема, яка керує роботою двигуна

Переваги:

– Вигідні співвідношення розміру та потужності двигуна
– Енкодер визначає точність та роздільну здатність.
– Відсутність резонанснів та вібрації при роботі
– Висока ефективність
– Немає умови втрати кроку, оскільки при наявності великого навантаження, що покладається на двигун, драйвер збільшуватиме струм до двигуна
– Можлива висока швидкість роботи.

Недоліки:

– Потрібна настройка для стабілізації циклу зворотного зв’язку
– Складність системи, потрібен енкодер
– Погане охолодження двигуна
– Двигун може бути пошкоджений при тривалому перевантаженні.

6) Вентильний або безщітковий ДПС (BLDC (Brushless DC) Motor).

Як випливає з назви, безщіткові двигуни постійного струму не використовують щітки. Натомість ротор є постійним магнітом; котушки не обертаються, а замість цього закріплюються на статорі. Оскільки котушки не рухаються, немає необхідності в щітках і комутаторі.

У звичайному двигуні постійного струму обертання досягається за рахунок управління магнітними полями, що утворюються котушками на роторі, при цьому магнітне поле, породжене нерухомими магнітами, залишається нерухомим. Щоб змінити швидкість обертання, ви змінюєте напругу котушок. У двигуноі BLDC обертається постійний магніт; обертання досягається зміною напрямку магнітних полів, що генеруються навколишніми нерухомими котушками. Для управління обертанням регулюється величина та напрям струму в цих котушках.

Переваги безщіткового двигуна постійного струму

Безщітковий двигун постійного струму не має графітових щіток, що зменшує потреби в заміні щіток та витрати на обслуговування.

Безщіткові двигуни постійного струму мають кращу продуктивність та ефективність порівняно з щітковими двигунами постійного струму завдяки залученню електронного керування, що дозволяє контролювати високий рівень швидкості та положення двигуна. Тривалість роботи безщіткового двигуна постійного струму приблизно в 6 разів більша, ніж двигуна постійного струму.

Щітки можуть викликати іскри, що може призвести до короткого терміну служби або до повного вигорання двигуна постійного струму. Однак у випадку безщіткового двигуна постійного струму, через відсутність іскри, менше шансів на вигорання.

Безщіткові двигуни постійного струму доступні в невеликих компактних розмірах, а також забезпечують високе співвідношення крутного моменту та ваги, що робить його придатним для багатьох робототехнічних та медичних застосувань.

Безщітковий двигун постійного струму видає порівняно низький робочий шум порівняно з іншими двигунами такого ж типу. Тому безщітковим двигунам постійного струму надають перевагу, коли слід уникати електричного шуму.

Оскільки традиційна комутація, заснована на механічному налаштуванні, замінюється сучасною електронною системою комутації, це призводить до

більшого контролю та менших шансів на вихід з ладу через раніше згадані причини зносу.

На відміну від інших двигунів, безщітковий двигун постійного струму має низький струм без навантаження, що робить його придатним працювати при низькому рівні навантаження або без навантаження.

Безщіткові двигуни постійного струму можуть забезпечувати максимальний крутний момент безперервно під час обертання, тоді як щітковий мотор постійного струму може забезпечувати максимальний крутний момент лише на певній ділянці механічної характеристики (при номінальній швидкості обертання). Для того ж показника крутного моменту звичайному ДПС знадобиться набагато потужніший магніт порівняно з безщітковим двигуном постійного струму. Це призводить до отримання дуже компактного і невеликого розміру безщіткового двигуна постійного струму, що створює високий показник крутного моменту.

Безщіткові двигуни постійного струму можуть мати управління за допомогою зворотного зв'язку для контролю та регулювання швидкості та крутного моменту, в результаті чого точний контроль крутного моменту та швидкості забезпечує більш високу ефективність, низьке енергоспоживання та тривалий термін служби акумулятора у випадку, коли двигун працює за допомогою деяких акумуляторів.

Двигуни постійного струму мають проблеми з нагріванням і швидко не охолоджуються через наявність електромагніту в центрі двигуна. З іншого боку, безщітковий двигун постійного струму не має електромагніту в центрі, що зменшує нагрівання.

Недоліки безщіткового двигуна постійного струму:

Вартість безщіткового двигуна постійного струму порівняно більша порівняно зі звичайним двигуном постійного струму, а електронний контролер також збільшує вартість загальної установки.

Коли безщітковий двигун постійного струму працює з низькою швидкістю виникають незначні коливання. Однак вібрації зменшуються з високою швидкістю.

Через властиву природній частоті вібрації безщіткового двигуна постійного струму іноді ця природна частота може збігатися або наближатися до частоти вібрації тіла або пластикових деталей, що призводить до виникнення резонансного явища. Однак цей резонанс можна звести до мінімуму за допомогою регулювання, і звичайно спостерігати явище резонансу у багатьох пристроях на основі безщіткових двигунів постійного струму.

Двигунами постійного струму легко керувати, маючи просту схему з’єднань, оскільки позитивна клема підключена до позитивного контакту, а негативна до негативного. Однак у випадку безщіткового двигуна постійного струму схема підключення та експлуатація двигуна не така проста через залучення електронного управління та його зв’язку з усіма електромагнітами [11].

Висновок

Виходячи з наведеної інформації, для приводу коливального механізму, використовувати перші три типи електроприводу не доцільно з точки зору енергоефективності та умов експлуатації (так як для забезпечення необхідних коливань потрібно буде постійно здійснювати реверс двигуна), а у випадку векторного керування – вартості. Система з сервоприводом зможе найточніше відпрацьовувати завдання на коливання. Таким чином, врахувавши всі переваги, недоліки та вимоги до системи приймаємо до розрахунків систему на основі вентильного двигуна.

Визначення потрібної потужності електродвигуна

Приведений момент інерції на валу двигуна складається: з приведеного моменту інерції, що утворюється поворотним рухом платформи з заготовкою, приведеним моментом інерції редуктора (якщо він застосовується) та моментом інерції валу двигуна. Далі за класичною формулою руху електроприводу можна розрахувати потрібний номінальний електромагнітний момент двигуна

$$M_{дв} - M_C = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \tag{1.1}$$

де M_c – момент статичного навантаження приведений до валу двигуна, Нм.; J_{Σ} – сумарний момент інерції системи; dω/dt – кутове прискорення.

Момент інерції системи може бути визначений, як [12]:

$$J = \frac{m(a^2 + b^2)}{12} \tag{1.2}$$

де m = 5 кг (з вихідних даних) – маса вантажу і платформи; a – ширина платформи (приймемо 0,15 м); b – висота платформи (0,03 м).

$$J = \frac{5(0{,}15^2 + 0{,}03^2)}{12} = 0{,}01 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \tag{1.3}$$

Момент статичного навантаження приймаємо:

$$M_c = m \cdot g \cdot R = m \cdot 9.81 \cdot a/2 = 3{,}679 \text{ Н} \cdot \text{м} \tag{1.4}$$

де g – прискорення вільного падіння; R – радіус обертання платформи (визначається як половина діаметру обертання a).

Кутову швидкість можна визначити з умов роботи установки. Враховуючи частоту коливання платформи у межах заданого кута повороту потрібно скласти діаграму швидкості обертового руху платформи. Вона складається для одного циклу коливань: з часу розгону, часу рівномірного обертового руху платформи із постійною швидкістю ω_H та часу гальмування до заданого кінцевого положення кута повороту платформи.

Всього за один цикл коливань платформа має пройти по 24° в одну сторону і в іншу. При частоті коливань 10 Гц час одного циклу складатиме

0,1 с. При наявності ділянки рівномірного руху платформи діаграма швидкості має наступний вигляд (рис. 1.6).

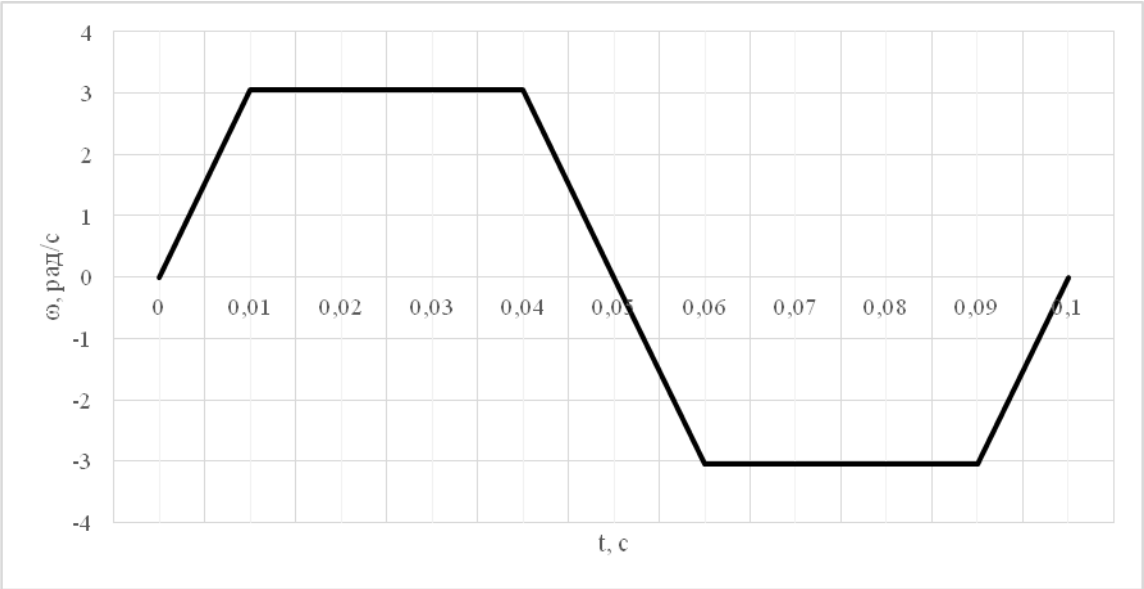


Рисунок 1.6 – Діаграма швидкості обертового руху платформи

Тобто кутова швидкість:

$$\omega = \frac{18}{0{,}3} = 600\ {}^{\circ}/_{c} = 100\ об/хв = \ 10{,}472\ рад/с \tag{1.5}$$

Кутове прискорення:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{(\omega - \omega_0)}{t_p} = \frac{(10{,}472 - 0)}{0{,}1} = 1047{,}198\ рад/с^2 \tag{1.6}$$

Тоді

$$M_{дв} = J\frac{d\omega}{dt} + M_c = 0{,}01 \cdot 1047{,}198 + 3{,}679 = 13{,}889\ \text{Н} \cdot \text{м} \tag{1.7}$$

Необхідна потужність двигуна:

$$P = M_{дв} \cdot \omega = 13{,}889 \cdot 10{,}472 = 145{,}444\ \text{Вт} \tag{1.8}$$

Висновок.

За результатами розрахунку потужності приводу, необхідно обрати двигун який забезпечуватиме кутову швидкість 11 рад/с, і витримуватиме момент навантаження 14 Нм.

2. Вибір електродвигуна та силового обладнання

Виходячи з розрахованих параметрів приймаємо двигун АТО-130WDM6010 [13].

Характеристики двигуна:

Номінальна напруга: 24 В

Номінальна швидкість: 1000 об/хв

Номінальний струм: 30,8 А

Номінальний момент: 6 Нм

Максимальний момент: 18 Нм

Момент інерції ротора: 0,00214 $кг \cdot м^2$

Маса двигуна: 12 кг

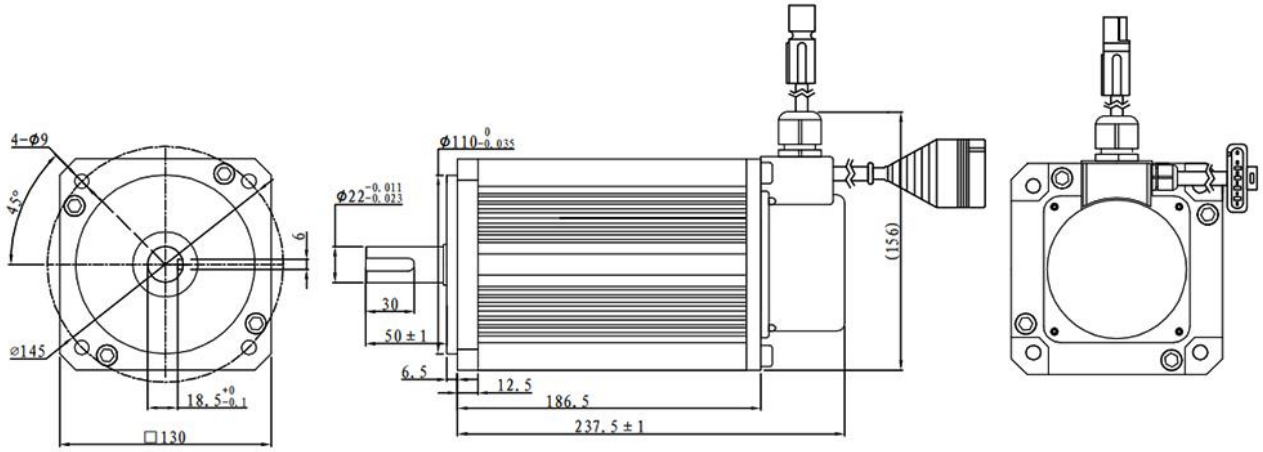


Рисунок 2.1 – Габаритні розміри двигуна

Вибір силових транзисторів.

Транзистори повинні витримувати робочій струм з деяким запасом. Тому вибирають польові транзистори с робочим струмом в 1.2-2 рази більшим, аніж максимальний струм двигуна. В характеристиках польових транзисторів може бути вказано декілька значень струму для різних режимів. Інколи вказують струм, котрий може витримувати кристал Id (Silicon Limited) (він більший) та струм, обмежений можливостями корпусу транзистора Id(Package Limited) (він менший).

Треба обирати транзистори за постійним струмом, і не зважати на параметри, зазначені для імпульсного режиму. При виборі транзистора береться до уваги тільки значення постійного струму.

Вибір польових транзисторів по напрузі також виконується з запасом як мінімум в 1.3 рази. Це робиться для того, щоб уникнути виходу з ладу транзисторів через стрибки напруги під час комутацій.

Крім зазначених вище параметрів, слід поцікавитись максимальною температурою роботи транзистора та чи буде він витримувати необхідний струм при цій температурі. Одна з найважливіших характеристик - це опір відкритого транзистора. Його значення можуть сягати декількох міліом. На перший погляд - дуже мало, але при великих струмах на ньому будуть виділятися значні обсяги тепла, яке прийдеться відводити. Потужність, яка буде гріти транзистор у відкритому стані, розраховується за формулою:

$$P=R_{ds}\cdot I_d^2 \qquad (2.1)$$

де: R_{ds} – опір відкритого транзистора; I_{ds} – струм який протікає через транзистор.

Зважаючи на розраховані параметри приводу, параметри обраного двигуна та вказані трохи вище коефіцієнти запасу, приймаємо транзистор IRFZ44NPBF, N-канал 55В 41А [14].

Параметри транзистора:

Структура: n-канал

Максимальна напруга, В: 55

Максимальний струм, А: 41

Опір канала у відкритому стані: 0,0175 Ом при 25А, 10В

$$P=R_{ds}\cdot I_d^2=0{,}0175\cdot 41=29{,}4 \text{ Вт}$$

3. Синтез системи автоматичного керування

4.1 Математична модель електромеханічного об’єкта

За принципом дії БДПС являє собою обернену машину постійного струму з магнітоелектричним індуктором на роторі і обмоткою якоря на статорі, функції щітково-колекторного вузла в якій виконує напівпровідниковий комутатор, що живить обмотку якоря і перемикається в функції положення ротора. Найбільш часто використовуються БДПС з трифазної обмоткою на статорі. Статор трифазного БДПС ідентичний статору асинхронного двигуна, і його обмотка, як правило, з'єднана в зірку.

Момент БДПС утворюється внаслідок реакції двох магнітних потоків - статора і ротора. Магнітний потік статора завжди прагне так розвернути ротор з постійними магнітами, щоб потік останнього збігся з ним у напрямку. Так само діє магнітне поле Землі на стрілку компаса. При цьому за допомогою датчика положення ротора електричний кут між двома потоками в БДПС завжди зберігається в діапазоні 90°±30°, що відповідає максимальному обертального моменту. Для живлення обмотки якоря БДПС може застосовуватися будь-який керований напівпровідниковий перетворювач, який реалізує жорсткий алгоритм 120-градусної комутації струмів або напруг трифазного навантаження.

Механічні і електромеханічні (швидкісні) характеристики БДПС повністю аналогічні характеристикам класичної машини постійного струму з незалежним або магнітоелектричним збудженням. Тому і системи автоматичного керування швидкістю БДПС зазвичай будуються за класичним принципом підлеглого регулювання координат електроприводу постійного струму з контурами струму якоря і частоти обертання [15].

Розрахунок моделі системи виконаний за спрощеною структурною схемою на якій вентильний двигун представлений моделлю двигуна постійного струму з незалежним збудженням. Система керування швидкістю вентильного двигуна описується наступною системою рівнянь при налаштуванні контуру швидкості на симетричний оптимум [18].

$$\begin{cases} M - M_{\text{с}} = J_{\Sigma}\dfrac{d\omega}{dt}; \\ I_{\text{Я}} = \dfrac{(U-E)}{R_{\text{Я}}(T_{\text{Я}}\cdot p+1)}; \\ U = \dfrac{(I_{\text{З}} - I_{ЗЗ})\text{К}_{\text{РС}}\text{К}_{\text{ПР}}}{T_{\text{П}}\cdot p+1}; \\ M = I_{\text{Я}}\text{сФ}; \\ I_{\text{З}} = (\omega_{\text{З}} - \omega_{\text{ЗЗ}})\dfrac{\text{К}_{\text{п}}T_{\text{РШ}}p+1}{T_{\text{РШ}}p}, \end{cases} \tag{3.1}$$

де, p=d/dt – оператор Лапласа; $I_З$ – завдання струму; $I_{ЗЗ}$ – значення зворотного зв’язку по струму; $К_{РС}$ – коефіцієнт передачі регулятора струму; $К_{ПР}$ – коефіцієнт передачі перетворювача; $Т_П$ – стала часу перетворювача; $І_Я$ – струм якоря двигуна; $ω_з$ – завдання кутової швидкості; $ω_{зз}$ – значення зворотного зв’язку по кутовій швидкості; $К_П$ – коефіцієнт пропорційного регулятора; $Т_{РШ}$ – стала часу регулятора швидкості.

Найбільш розповсюдженою структурою керування електроприводами на даний час залишається структура з підпорядкованим регулюванням координат [17].

Особливість керування полягає в тому, що вихідний сигнал регулятора кожного зовнішнього контуру є завданням для внутрішнього.

Основні переваги – простота настроювання і наладки, можливість простого обмеження координат за рахунок обмеження вихідних сигналів регуляторів та висока якість керування.

Основні недоліки – зменшення швидкодії системи зі збільшенням числа контурів.

Найбільш часто на практиці застосовуються налаштування контурів за аперіодичним законом та на модульний і симетричний оптимуми.

Система керування включає два контури:

– внутрішній контур струму якоря з релейним регулятором струму [18];

– зовнішній контур швидкості з регулятором швидкості РШ.

Вихідний сигнал регулятора швидкості є завданням контуру струму $U_{зI}$. Це дозволяє за рахунок обмеження вихідного сигналу РШ обмежувати струм якоря під час перехідних процесів.

Настроювання системи здійснюють послідовно, починаючи з внутрішнього контуру. Тобто, спочатку настроюють контур струму без урахування контуру швидкості, а потім настроюють контур швидкості з урахуванням оптимізованого контуру струму.

Розглянемо процедуру синтезу контуру струму.

Апроксимацію контуру струму виконаємо із застосуванням математичного моделювання.

Структурна схема контуру струму з релейним регулятором струму представлена на рисунку 4.1.

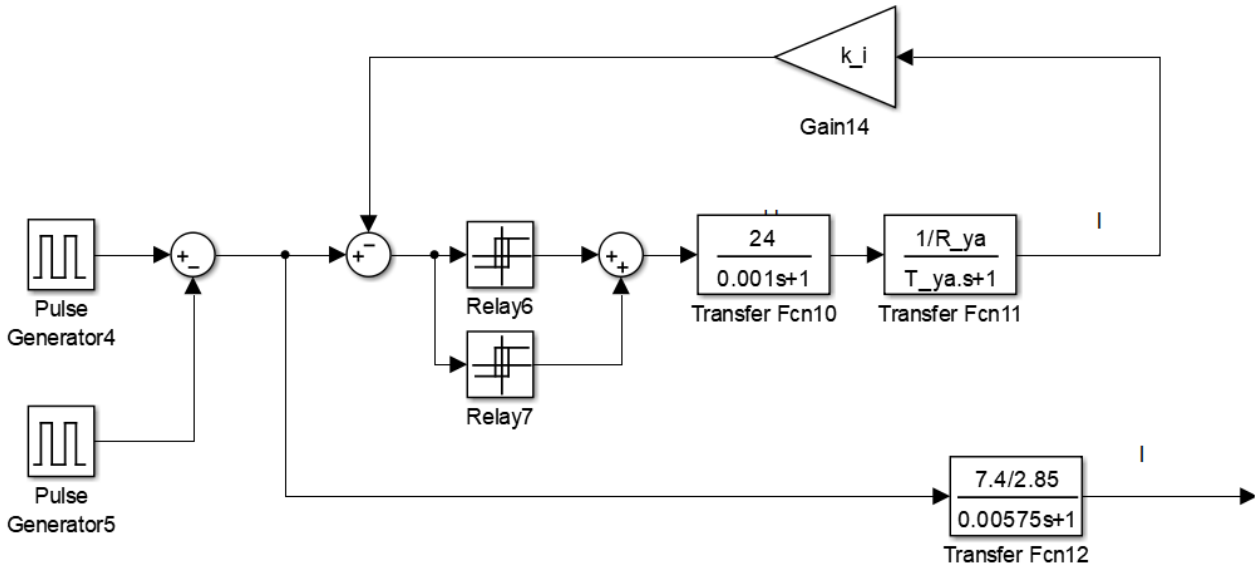


Рисунок 3.1 – Структурна схема контуру струму з релейним регулятором струму

де R_{ya}=0.4669 Ом – опір якоря двигуна, T_{ya}=0.0095 с – стала часу якоря двигуна, k_i=1 – коефіцієнт зворотного зв’язку по струму, $T_п$=0,001с – стала часу перетворювача.

Результати моделювання процедури апроксимації представлені на рисунку 3.2.

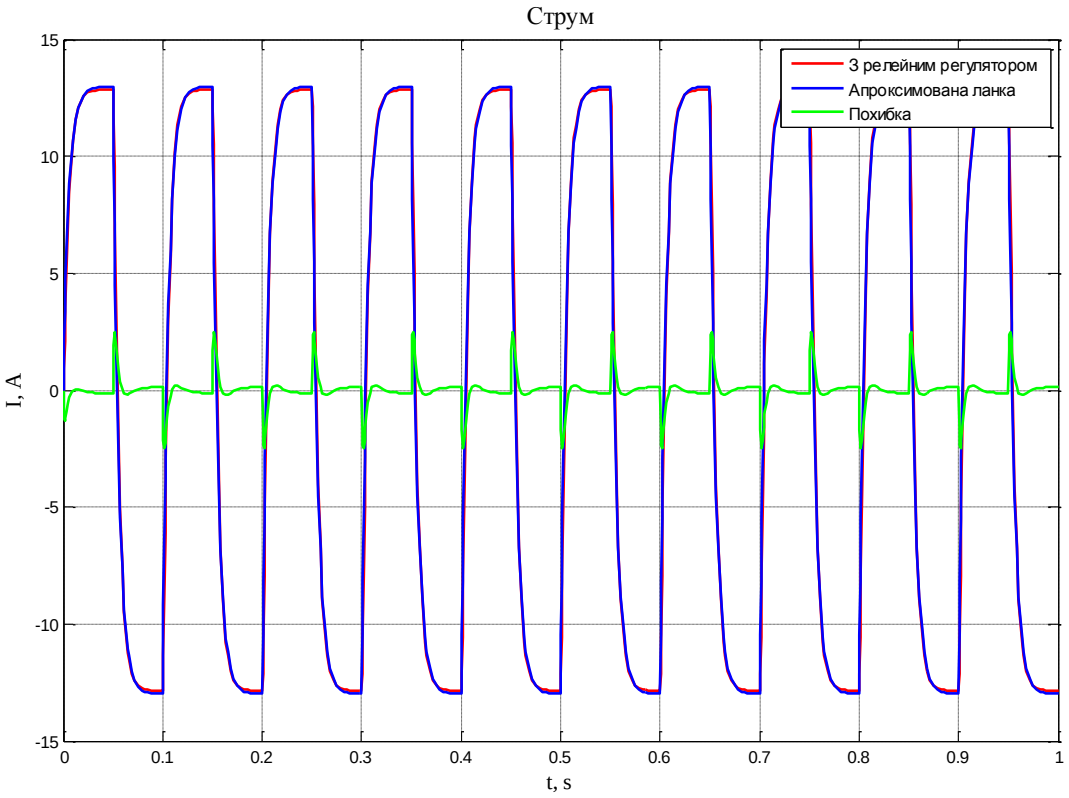


Рисунок 3.2 – Результати моделювання процедури апроксимації контуру струму

В результаті апроксимації контуру струму отримано передаточну функцію контуру струму у вигляді:

$$W_i(p) = \frac{k_{\text{i.апр}}}{T_{\text{i}}\text{p} + 1} = \frac{2{,}6}{0{,}00575\text{p} + 1} \tag{3.2}$$

де $k_{\text{i.апр}}$=2,6 – коефіцієнт передачі апроксимованого контуру струму, T_i=0,00575 – стала часу апроксимованого контуру струму.

Як видно з графіку перехідного процесу, релейний регулятор здатен забезпечити необхідну швидкодію та точність відпрацювання, тому для подальшої процедури синтезу контуру швидкості будемо використовувати передатну функцію контуру струму вигляду (3.2).

Розглянемо процедуру синтезу контуру швидкості.

Структурна схема контуру швидкості, приведеного до одиничного зворотного зв’язку матиме вигляд (рис. 3.3).

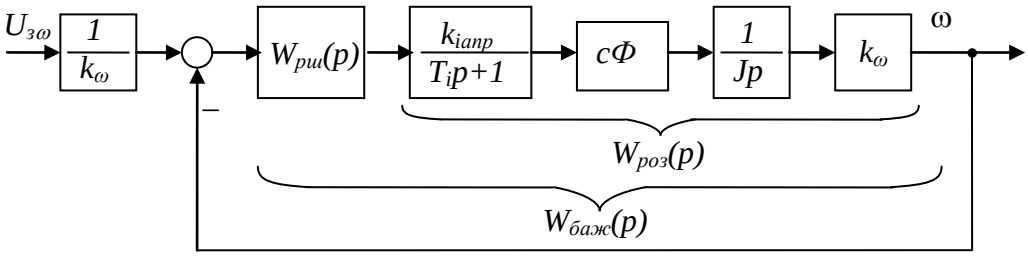


Рисунок 3.3 – Структурна схема контуру швидкості

де, T_i – стала часу контуру струму, $W_{рш}$ – передатна функція регулятора швидкості, сФ – конструктивна стала двигуна, J – момент інерції, $k_ω$ – коефіцієнт зворотного зв'язку по кутовій швидкості.

Налаштуємо контур швидкості на симетричний оптимум. Тоді передаточна функція регулятора швидкості

$$W_{рш}(p)=\frac{W_{баж}(p)}{W_{роз}(p)}=\frac{4T_ip+1}{4T_ip}\frac{1}{2T_ip\left(T_ip+1\right)}\frac{1}{W_{роз}(p)}=k_{рш}\frac{T_{рш}p+1}{T_{рш}p}, \qquad (3.3)$$

де $T_{рш}=4T_i$; $k_{рш}=\frac{J}{2T_icФ_нk_ωk_{i.апр.}}$.

У результаті синтезу контуру швидкості отримано ПІ-регулятор.

Структурна схема САК, що реалізована у пакеті програм середовища Matlab представлена на рис. 3.4.

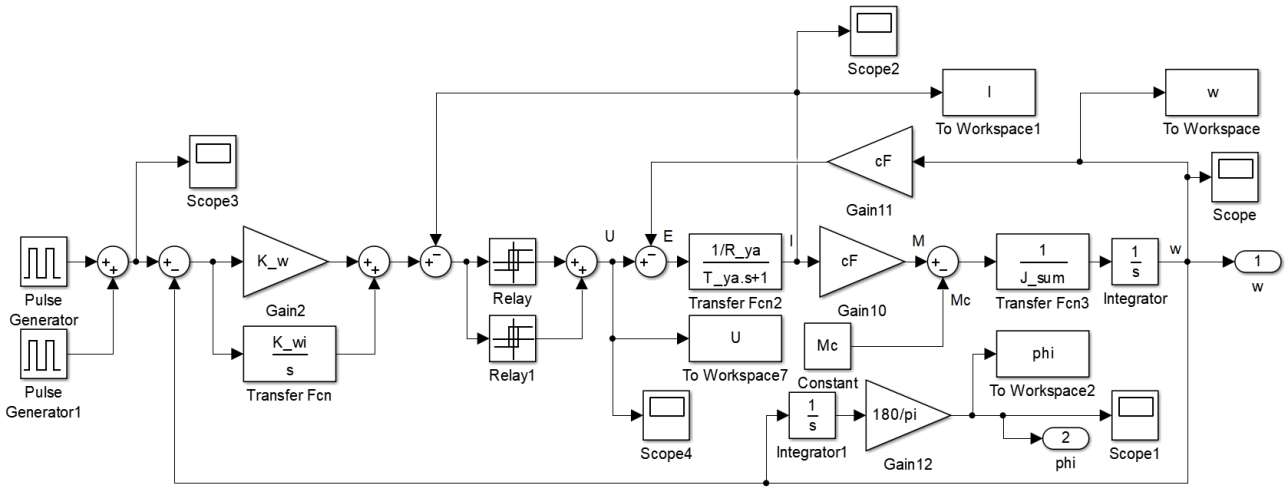


Рисунок 3.4 – Математична модель системи керування швидкістю

де M – момент двигуна, M_c – момент навантаження, I – струм двигуна, E – електрорушійна сила.

В математичній моделі формувач завдання частоти обертання виконаний за допомогою генератора імпульсів.

ПІ-регулятор швидкості (пропорційно-інтегральний регулятор)

Схема на основі операційного підсилювача, яка реалізує ПІ-регулятор в системі керування швидкістю, показана на рис. 3.5.

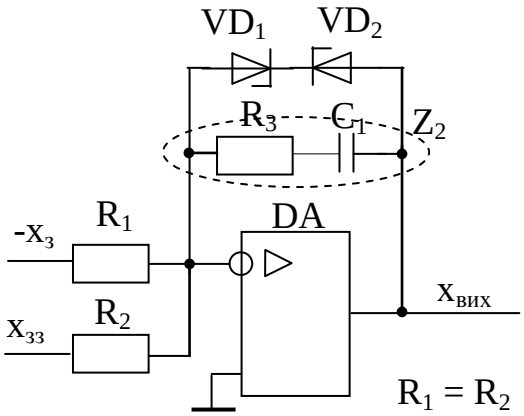


Рисунок 3.5 – Схема реалізації ПІ-регулятора

Передаточна функція схеми має наступний вигляд

$$W_{cx}(p) = -\frac{R_3 + \frac{1}{C_1 p}}{R_1} = -\frac{R_3 C_1 p + 1}{R_1 C_1 p} = -\left[\frac{R_3}{R_1} + \frac{1}{R_1 C_1 p}\right]. \quad (3.4)$$

Передаточну функцію регулятора можливо записати як суму пропорційної та інтегральної складових

$$W_p(p) = K_{рш} + \frac{K_{рш}}{T_{рш} p} = 0.023 + \frac{1.04}{p} \quad (3.5)$$

Прирівнюючи відповідні складові передаточних функцій, отримаємо умови для розрахунку опорів та ємностей

$$\begin{cases} \frac{1}{R1C1} = 1.04 \\ \frac{R3}{R1} = 0.023 \end{cases} \quad (3.6)$$

С1 обираємо номіналом 10 мкФ

$$\frac{1}{R1C1} = 1.04$$
$$R1 = \frac{1}{C1 \cdot 1.04} = \frac{1}{1.04 \cdot 10^{-5}} \approx 100000[Ом] \quad (3.7)$$

Обираємо із стандартного ряду Е24 R1=91 кОм.

$$R3 = R1 \cdot 0.023 = 2093[Ом] \quad (3.8)$$

Із стандартного ряду Е24 обираємо R3=2.2 кОм.

Скореговані значення коефіцієнтів ПІ-регулятора мають наступні значення

$$k_{рш} = \frac{2093}{91000} = 0.023 \quad (3.9)$$

$$\frac{1}{R1C1} = \frac{1}{91000 \cdot 1 \cdot 10^{-5}} = 1.09 \quad (3.10)$$

Оберемо операційний підсилювач LM358DR [19].

LM358DR - двохканальний операційний підсилювач з низьким споживанням, розроблений компанією Texas Instruments. Підсилювач випускається в міцному монолітному корпусі SOIC-8 та складається з 2-х автономних операційних підсилювачів (ОП) з високим коефіцієнтом підсилення. Полоса пропускання сигналу до 1,1 МГц. LM358DR працює у широкому діапазоні напруг 3 ... 32 В. Струм живлення — 1,2 мА. Мінімальний коефіцієнт пригнічення завад складає 65dB. Підсилення за напругою до 100dB. LM358DR призначений для використання в цифрових системах, зокрема, в цифрових датчиках в якості підсилювача сигналу.

Тип: операційний підсилювач;

Кількість каналів: 2 шт.;

Вхідна напруга зсуву нуля: 7 мВ;

Вхідний струм зсуву: 150 нА;

Смуга пропускання сигналу: 1,1 МГц;

Максимальна швидкість нарощування вихідної напруги: 0,6 В/мс;

Коефіцієнт послаблення синфазного сигналу: 85dB;

Діапазон напруги живлення: 3 - 32 В;

Максимальний споживаний струм кожного каналу: 0,35 мА;

Діапазон робочих температур: 0 - 70 °С

Корпус: SOIC-8

Також приймемо стабілітрони 1N4740A [20].

Потужність розсіювання, Вт – 1

Мінімальна напруга стабілізації, В – 9.5

Номінальна напруга стабілізації, В – 10

Максимальна напруга стабілізації, В – 10.5

Статичний опір Rст., Ом – 7

при струмі I ст, мА – 25

Температурний коефіцієнт напруги стабілізації Uст.,%/С – 0.08

Мінімальний струм стабілізації ІСТ.МИН., мА – 25

Максимальний струм стабілізації ІСТ.МАКС., мА – 91

Робоча температура, С – -55 ... 200

Спосіб монтажу – в отвір

Корпус – do41

Вага, г – 0.4

4. Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи керування швидкістю. Розробка системи керування положенням

Нижче надані графіки перехідних процесів електромеханічної системи.

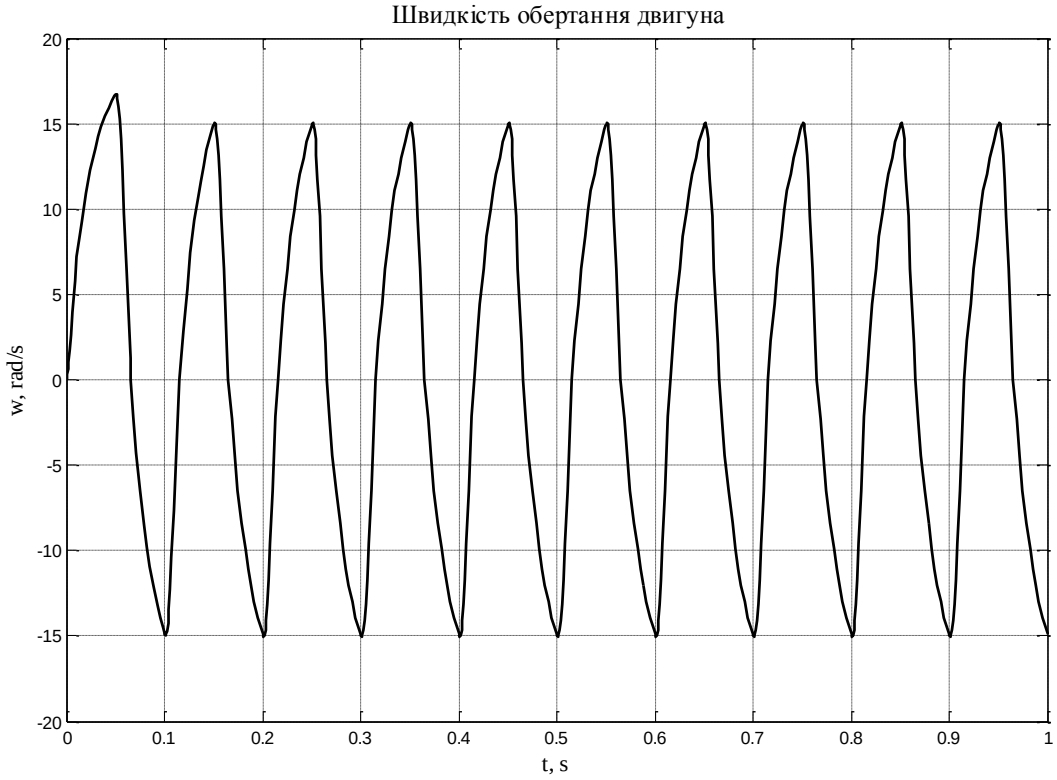


Рисунок 4.1 – Перехідний процес кутової швидкості

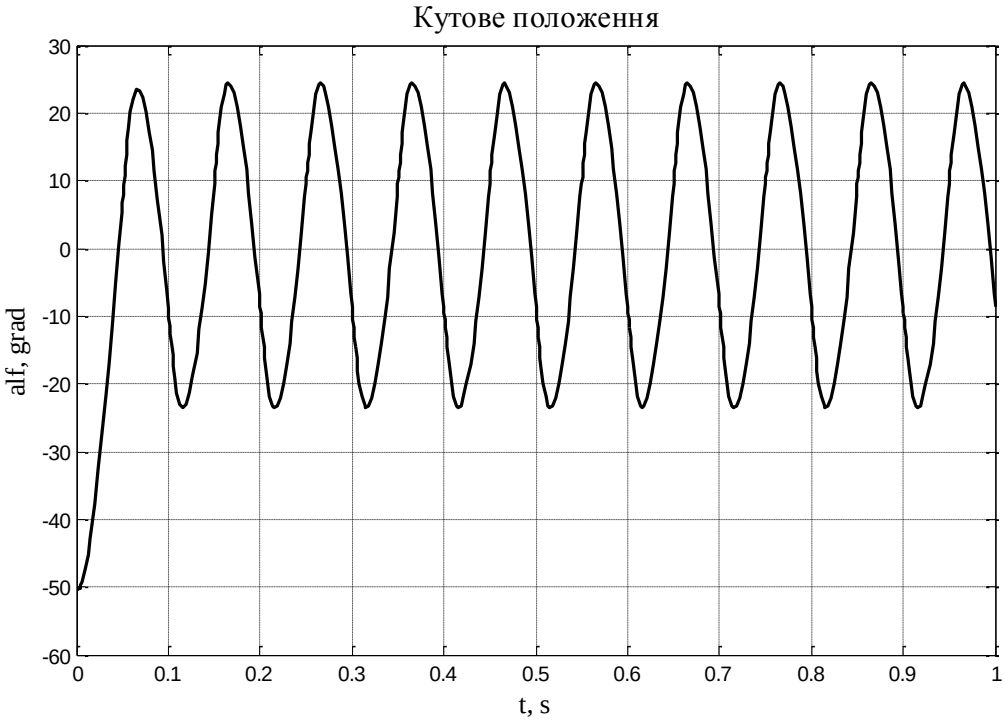


Рисунок 4.2 – Перехідний процес кутового положення

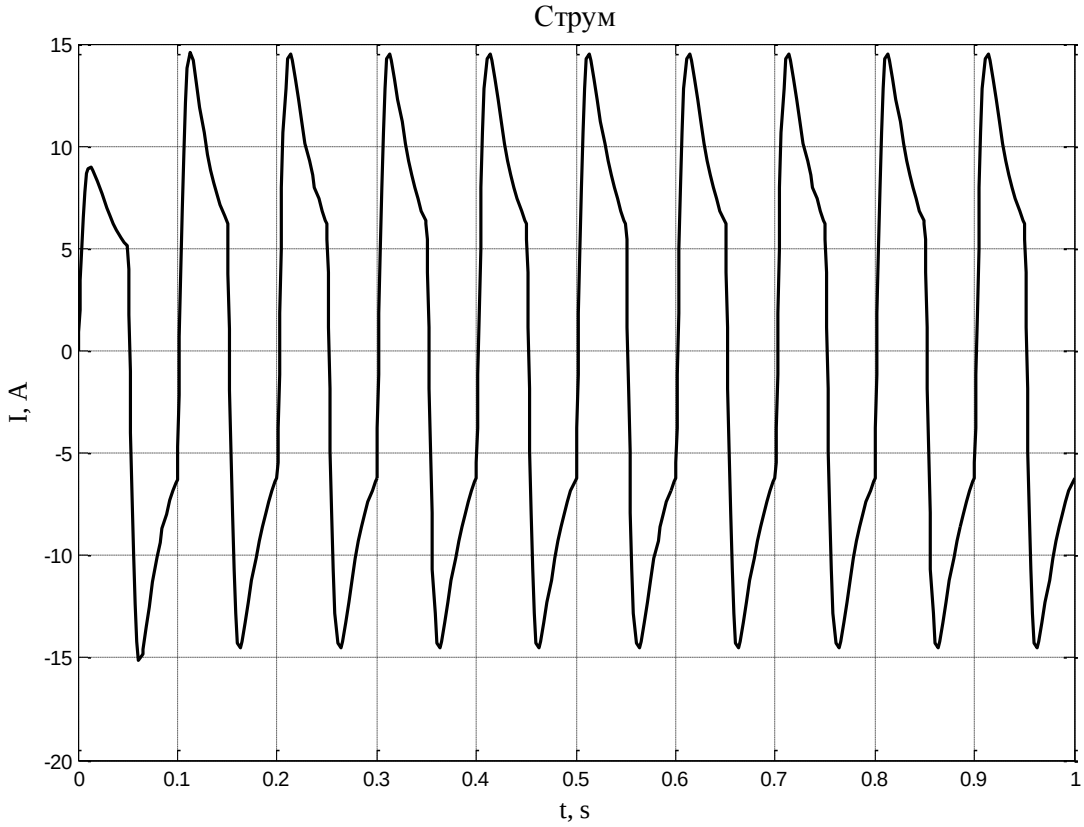


Рисунок 4.3 – Перехідний процес струму

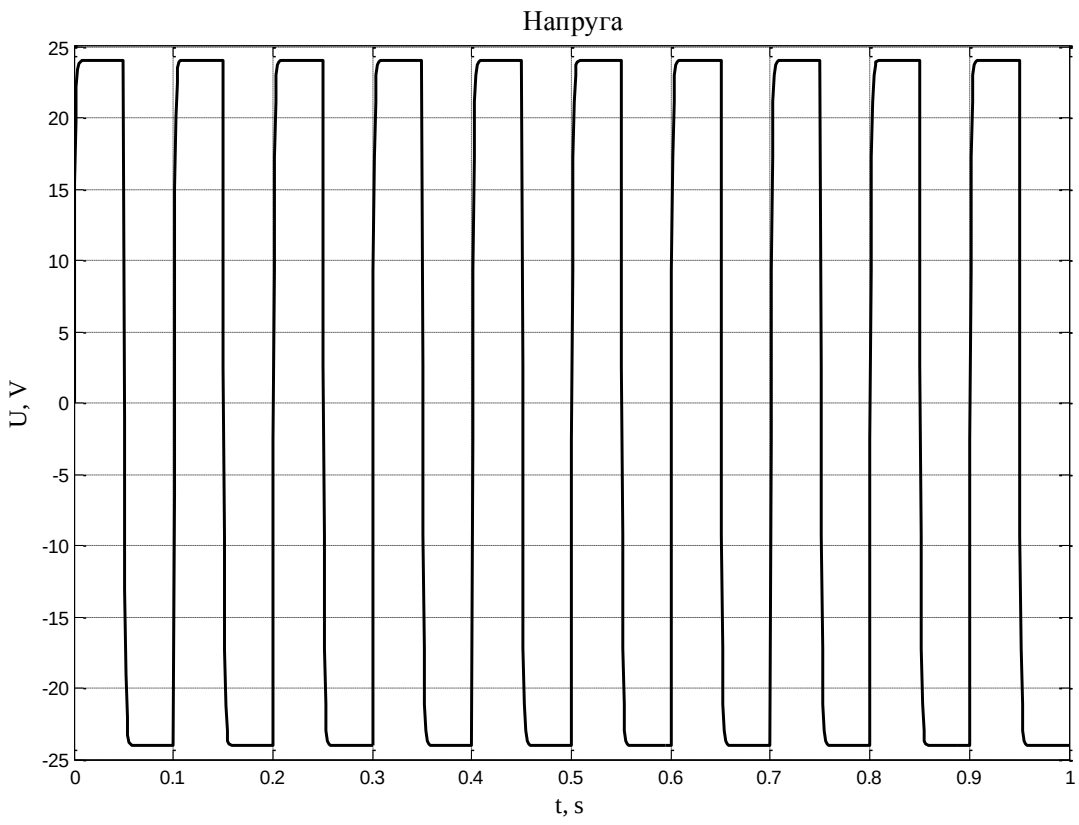


Рисунок 4.4 – Перехідний процес напруги

Як видно з графіків перехідних процесів струму та напруги, коливання цих величин знаходяться в межах номінальних значень. Час розгону і гальмування, а також довжина ділянки рівномірного руху теж відповідають вимогам до системи. Але відпрацювання кутового положення запізнюється приблизно на 0,01 с, що складає 5% періоду коливання. Це відбувається тому, що керування швидкістю обертання здійснюється у функції часу. Виправити це можливо за рахунок використання датчика кутового положення який даватиме команду на реверс, тобто керування у функції кутового положення.

Розробка системи керування положенням

Структурна схема системи керування положенням має наступний вигляд (рисунок 4.5).

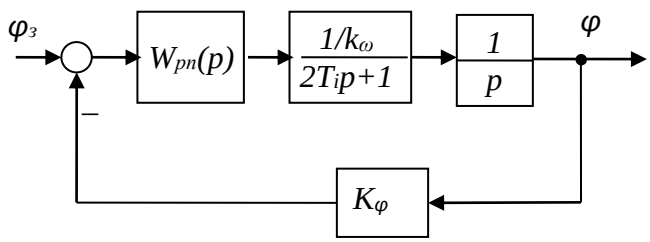


Рисунок 4.5 – Структурна схема системи керування положенням

Де, $W_{рп}(p)$ – передатна функція двуконтурної системи керування швидкості.

При налаштуванні контура швидкості на модульний оптимум:

$$W_{зам.\omega}(p) = \frac{1/k_\omega}{2T_i^2p^2 + 2T_ip + 1} \approx \frac{1/k_\omega}{2T_ip + 1} \tag{4.1}$$

При налаштуванні контуру положення на модульний оптимум передатна функція контура положення має наступний вигляд.

$$W_{рш}(p) = \frac{W_{баж}(p)}{W_{роз}(p)} = \frac{1}{4T_ip(2T_ip+1)} \frac{2T_ip+1}{1/k_\omega} p = \frac{k_\omega}{4T_i} = k_{рп} \tag{4.2}$$

Математична модель системи керування кутового положення представленя на рис. 4.6. Завдання кутового положення в даній моделі подається у вигляді синусоїди з амплітудою коливань 24 градусів, і періодом коливань 10 Гц.

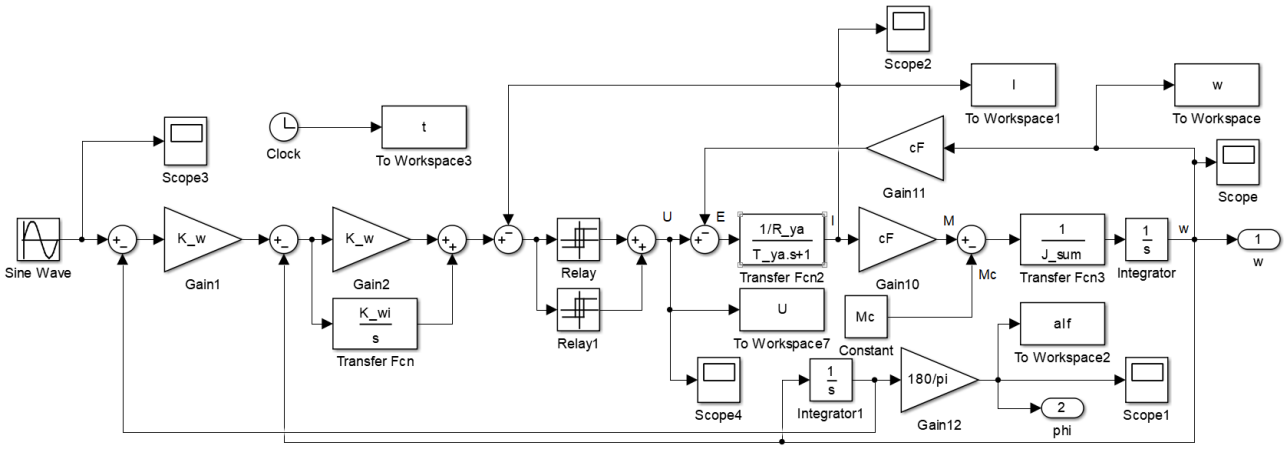


Рисунок 4.6 – Математична модель системи з керуванням кутового положення

Технічна реалізація П-регулятора положення в системи керування положення з використанням операційного підсилювача показана на рис. 4.7.

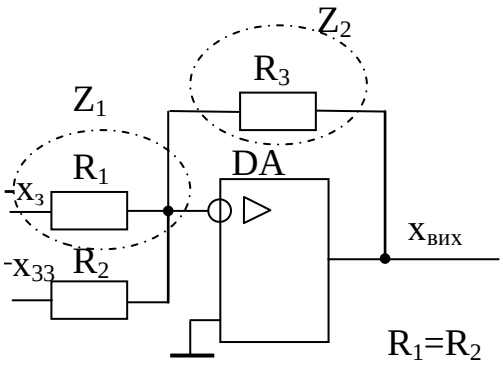


Рисунок 4.7 – Схема технічної реалізації П-регулятора

Передаточна функція схеми

$$W_{cx}(p) = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R_3}{R_1}. \quad (4.3)$$

Для того, щоб реалізувати заданий коефіцієнт передачі, необхідно щоб виконувалась рівність:

$$K_{рп} = \frac{R_3}{R_1} = 43.47. \quad (4.4)$$

Обираємо із стандартного ряду E24 R1=1 кОм,

$$R3 = R1 \cdot 43.47 = 1 \cdot 43.7 = 43.7[кОм]. \quad (4.5)$$

Із стандартного ряду E24 обираємо R3=43 кОм.

Скореговане значення $k_{рп}$=43.

Результати моделювання надані на наступних рисунках 4.8–4.13.

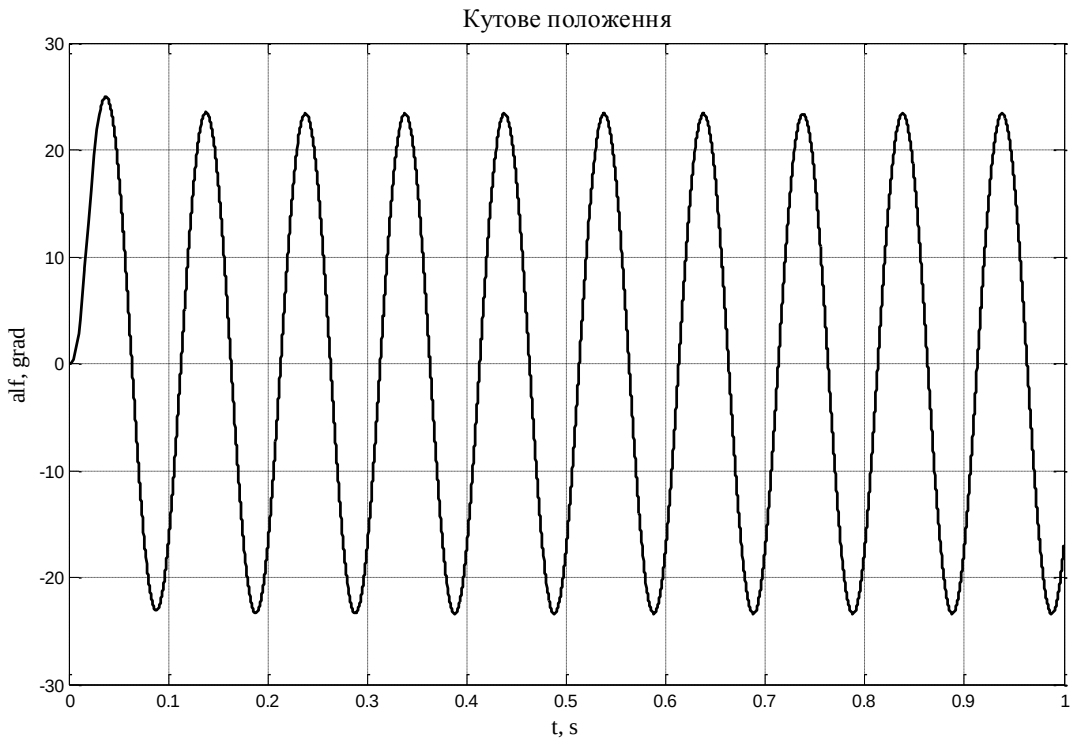


Рисунок 4.8 – Перехідний процес відпрацювання заданного кута у САК кутового положення

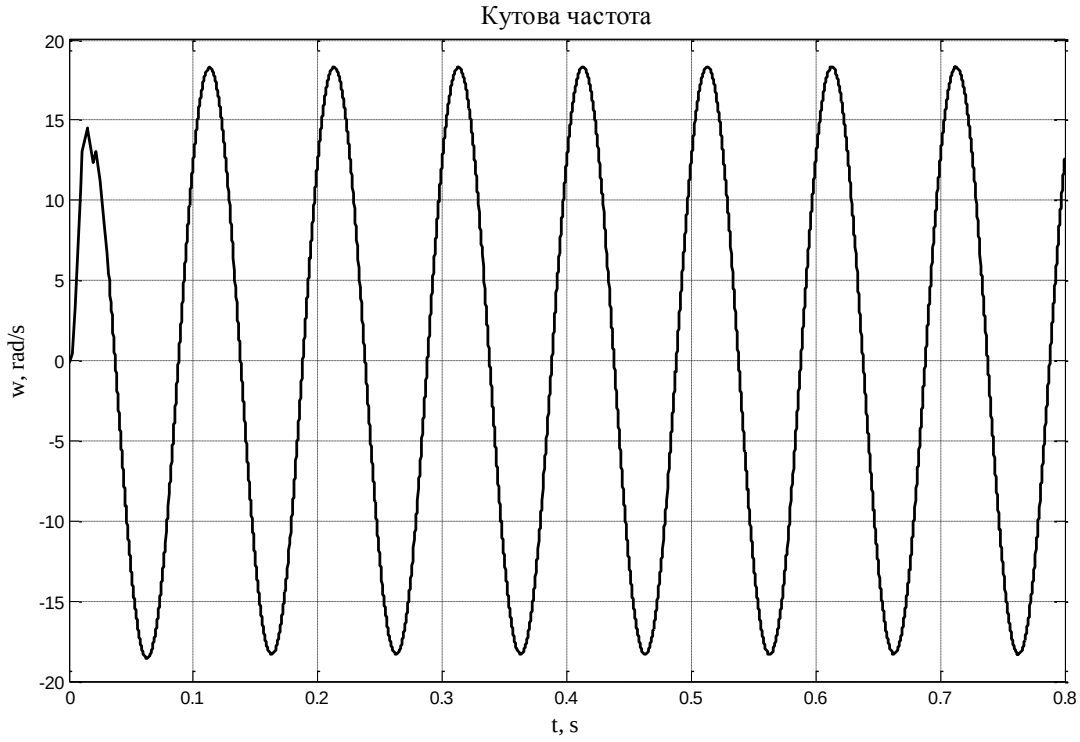


Рисунок 4.9 – Перехідний процес кутової швидкості у САК кутового положення

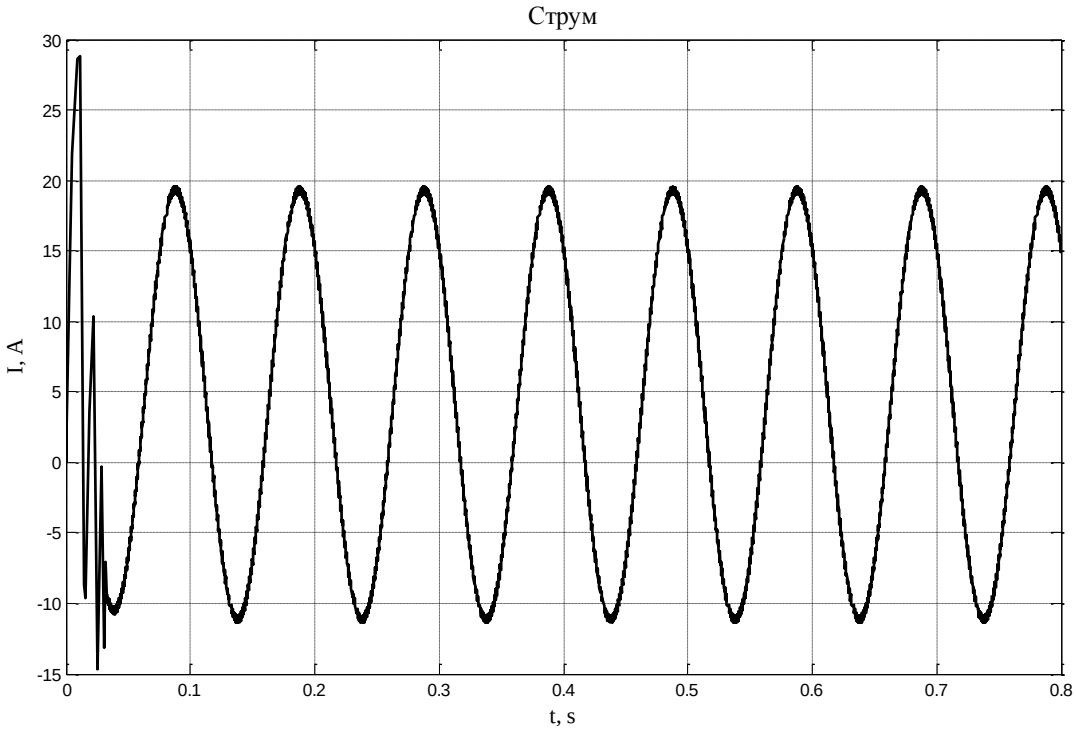


Рисунок 4.10 – Перехідний процес струму у САК кутового положення

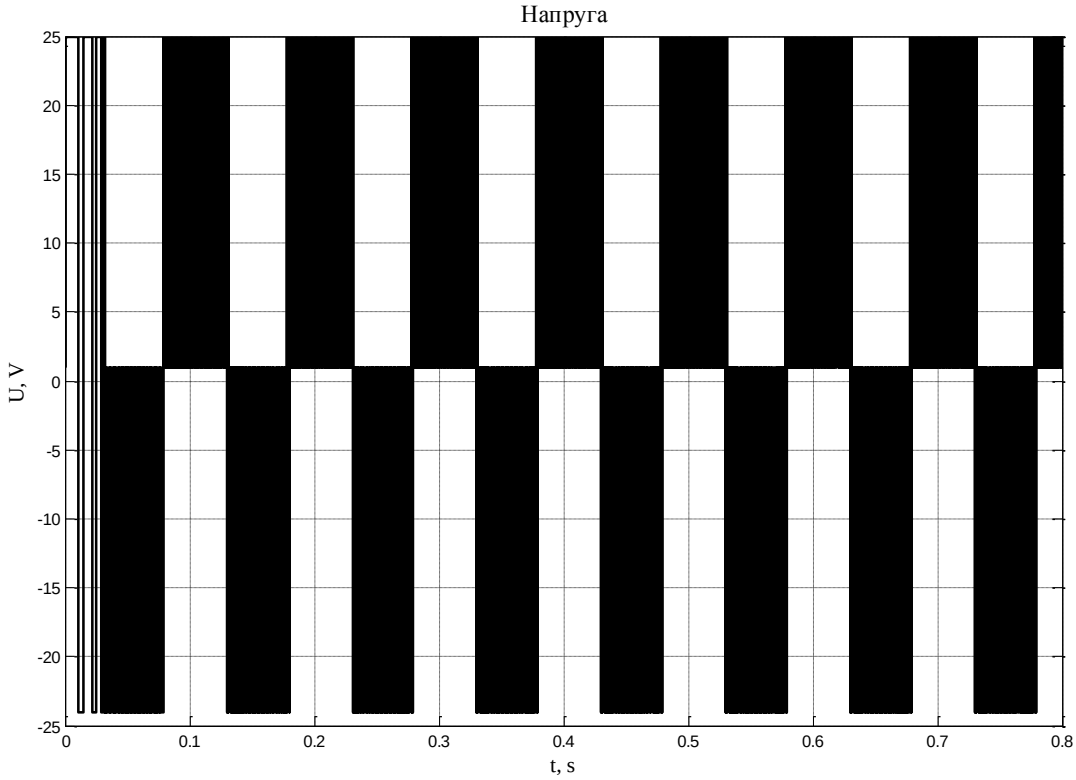


Рисунок 4.11 – Перехідний процес напруги у САК кутового положення

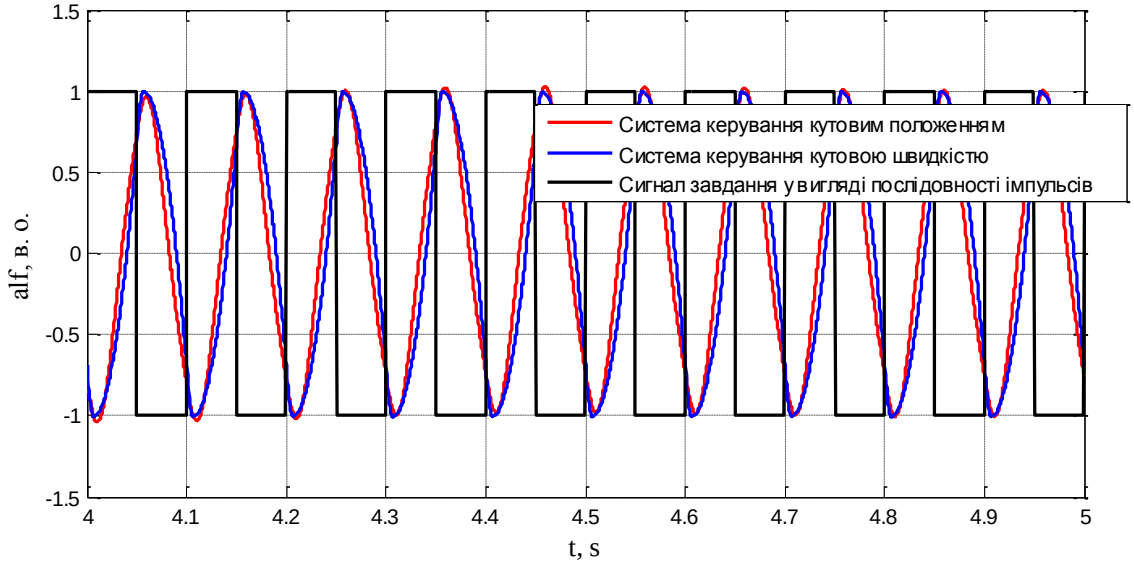


Рисунок 4.12 – Перехідні процеси відпрацювання кутового положення систем при сигналі завдання сформованим генератором імпульсів

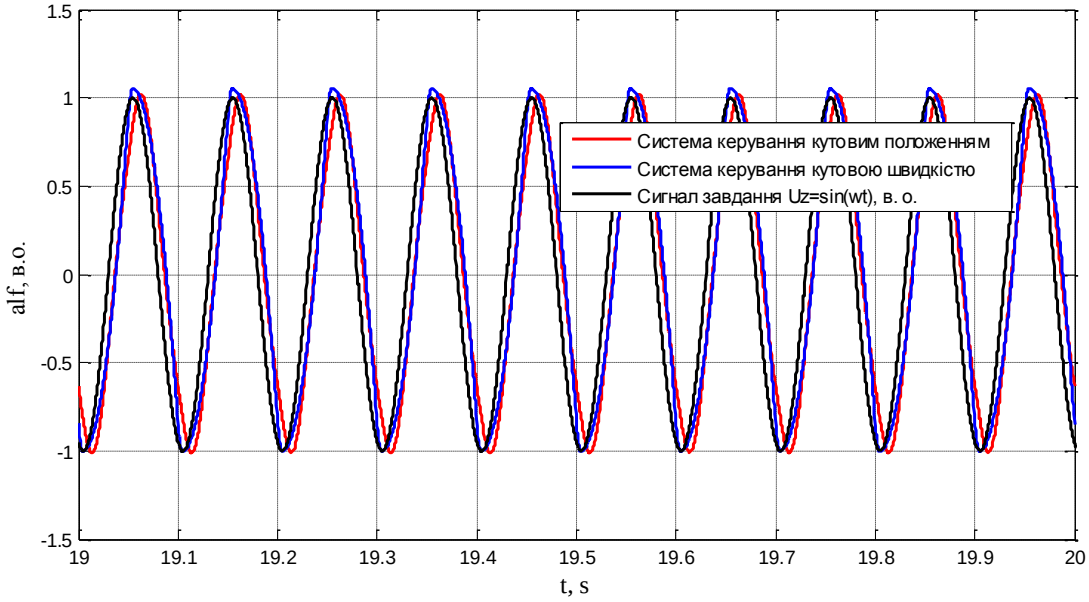


Рисунок 4.13 – Перехідні процеси відпрацювання кутового положення систем при сигналі завдання $U_z=\sin(\omega t)$

Висновок

Аналіз результатів моделювання САК швидкості та САК положення показав можливість використання обох систем для відпрацювання коливального руху платформи із виробом. Використання САК швидкості для відпрацювання заданих кутів відхилення платформи у процесі електродугового

наплавлення пов’язано з встановленням концевих вимикачів, що робить таку систему більш складною порівняно із системою керування положенням.

5. Опис схеми керування

Структурна схема ВЕП з позначеннями всіх елементів і сигналів представлена на рис.5.1 [18].

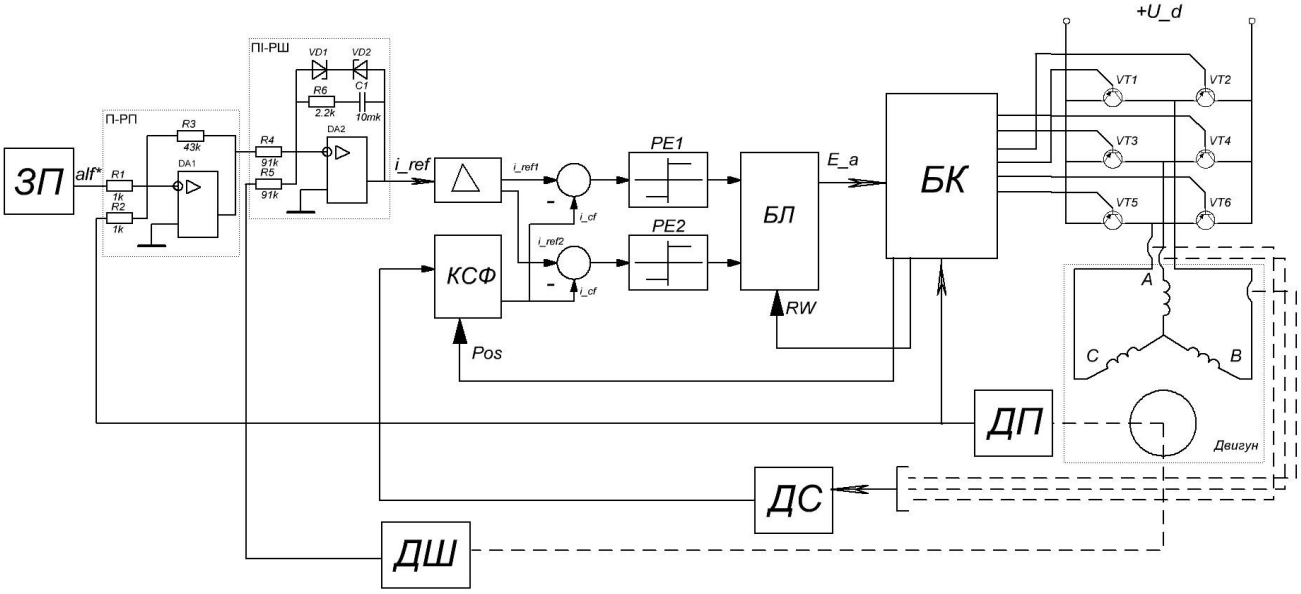


Рисунок 5.1 – Функціональна схема ВЕП

ЗШ – формувач завдання частоти обертання електродвигуна; ПІ-РШ – пропорційно-інтегральний регулятор швидкості; РРС – релейний регулятор струму; БК – блок комутації транзисторів; ДП – датчик положення ротора; ДШ – датчик частоти обертання; w_ref – завдання частоти обертання електродвигуна; i_ref – завдання струму фази електродвигуна; ДС – зворотний зв’язок по струму фаз електродвигуна; Pos – код положення ротора електродвигуна; RW – код режиму роботи електродвигуна; E_a – дозвіл включення силового блоку; A, B, C – фази електродвигуна; Ud - напруга живлення силового блоку електропривода.

Пропорційно-інтегральний регулятор швидкості (ПІ-РШ) отримує завдання на частоту обертання валу ВЕП «w_ref» від формувача завдання (ФШ) відповідно до встановленої тахограми руху.

Для забезпечення широкого діапазону регулювання частоти обертання і точності її підтримки в ВЕП введений зворотний зв'язок від датчика частоти обертання (ДШ). Зворотний зв'язок по частоті обертання надходить на вхід ПІ-

РШ, на виході якого формується сигнал завдання струму «i_ref» і завдання на напрямок обертання ротора «Dir» ВЕП.

Контур струму складається з релейного регулятора струму (РРС), блоку комутації транзисторів (БК) і силового блоку з індивідуальними датчиками струму фаз електродвигуна. На вхід РРС надходить сигнал завдання струму «i_ref» з регулятора швидкості і сигнали зворотного зв'язку по струму фаз «i_A, i_B, i_C». Управління регулятором струму здійснюється за допомогою сигналів коду робочої фази «Pos» і режиму роботи ВЕП «RW». За допомогою цих сигналів управління РРС відпрацьовує задане значення струму фази в рушійному, або гальмівному режимі роботи ВЕП з максимальною швидкодією.

Функціональна схема РРС показана на рис. 5.2.

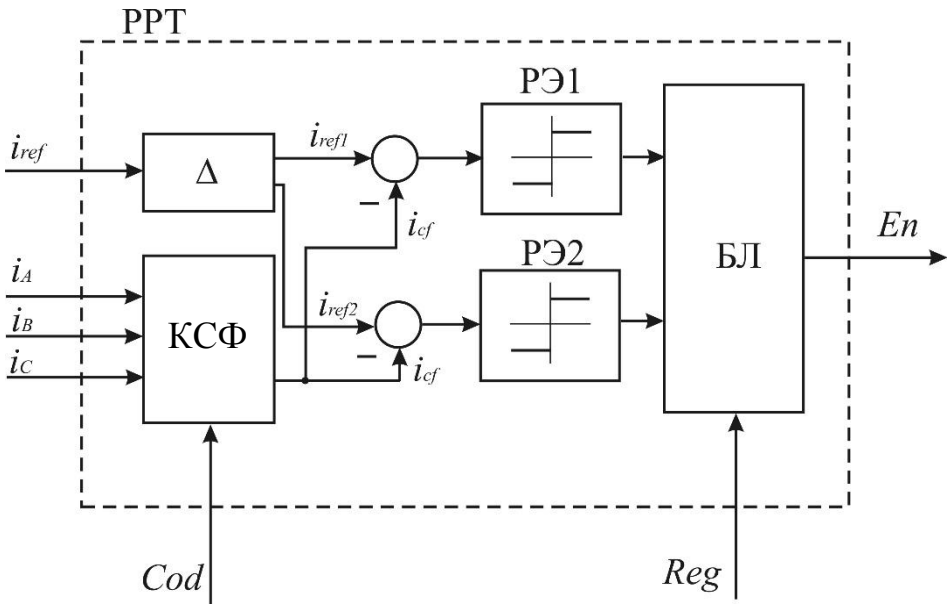


Рисунок 5.2 – Функціональна схема РРС

Δ – формувач зони регулювання струму фази; КТФ – комутатор струму фази; РЭ1, РЭ2 - релейні елементи; БЛ - блок логіки.

Завдання струму «i_ref» подається на формувач зони регулювання струму фази (Δ), де розділяється по рівню на два сигналу «i_ref1» і «i_ref2», різниця яких визначає зону регулювання. Внутрішні сигнали завдання струму надходять на входи суматорів релейних елементів РЭ1 і РЭ2, де порівнюються з сигналом зворотного зв'язку по струму фази «i_cf». Комутатор струму фаз (КТФ) по черзі перемикає сигнали з датчиків струму фаз «i_A», «i_B», «i_C» на

від’ємні входи суматорів релейних елементів по сигналу коду робочої фази «Cod». Логічні сигнали з виходів РЭ1 і РЭ2 надходять на блок логіки (БЛ), де виходячи з режиму роботи ВЕП, який задається сигналом «RW(Reg)», формується сигнал дозволу роботи «E_a».

Сигнал дозволу роботи силового транзистора «E_a» з виходу РРС надходить на вхід БК, де за сигналом положення ротора електродвигуна, що надходить з датчика положення (ДП), і заданому напрямку обертання «Dir» визначаються комутовані транзистори силового блоку (СБ). Транзистори СБ підключають фази електродвигуна «A, B, C» до джерела постійного струму з напругою U_d. У СБ реалізована мостова трифазна схема з шістьма силовими транзисторами.

6. Спецчастина. Автоматизація технологічного процесу

Установка має здійснювати коливання з заданою частотою в межах 24° (розгін та гальмування в межах 4°). Для цього застосований давач положення (на принциповій схемі – ДП). В ключових точках руху давач положення видає сигнали які відповідають кутовому положенню платформи на момент подачі сигнала і мають слугувати сигналами на зупинку або реверс привода. Для керування установкою предбачені кнопки «Пуск» і «Стоп».

Присвоїмо назви вхідних змінних:

a – Пуск;

b – Стоп;

0p – Сигнал від давача положення: кутове положення – 0°;

4p – Сигнал від давача положення: кутове положення – 4° в додатну сторону від вертикального положення;

4n – Сигнал від давача положення: кутове положення – 4° у від'ємну сторону від вертикального положення;

20p – Сигнал від давача положення: кутове положення – 20° в додатну сторону від вертикального положення;

20n – Сигнал від давача положення: кутове положення – 20° у від'ємну сторону від вертикального положення.

Вихідні змінні:

Dir – завдання на напрямок обертання приводу (01 – обертання в додатну сторону від вертикального положення; 10 – обертання у від'ємну сторону від вертикального положення);

RW – режим роботи приводу (01 – рушійний режим; 10 – гальмівний режим; 11 – реверс);

BR – привод механічного фіксатора (0 – зафіксовано; 1 – не зафіксовано).

Сформулюємо алгоритм, який має відпрацьовуватися установкою.

При натисканні кнопки «Пуск» привод починає рухатись в додатну сторону від вертикального положення. При надходженні сигналу «20p» вмикається реверс і привод починає рух у від'ємну сторону від вертикального

положення. При надходженні сигналу «20n» вмикається реверс і привод починає рух в додатну сторону від вертикального положення і так по колу поки не надійде команда «Стоп».

Якщо команда «Стоп» надходить коли привод знаходиться в додатній стороні від вертикального положення подається команда на обертання у від'ємну сторону від вертикального положення. При надходженні сигналу «4p» привод переходить в гальмівний режим. При надходженні сигналу «0p» вмикається привод механічного фіксатора.

Якщо команда «Стоп» надходить коли привод знаходиться у від'ємній стороні від вертикального положення подається команда на обертання в додатну сторону від вертикального положення. При надходженні сигналу «4n» привод переходить в гальмівний режим. При надходженні сигналу «0p» вмикається привод механічного фіксатора.

Виконаємо синтез метотом графопереходу на RS-тригерах. Графоперехід для заданого алгоритму зображений на рис. 6.1.

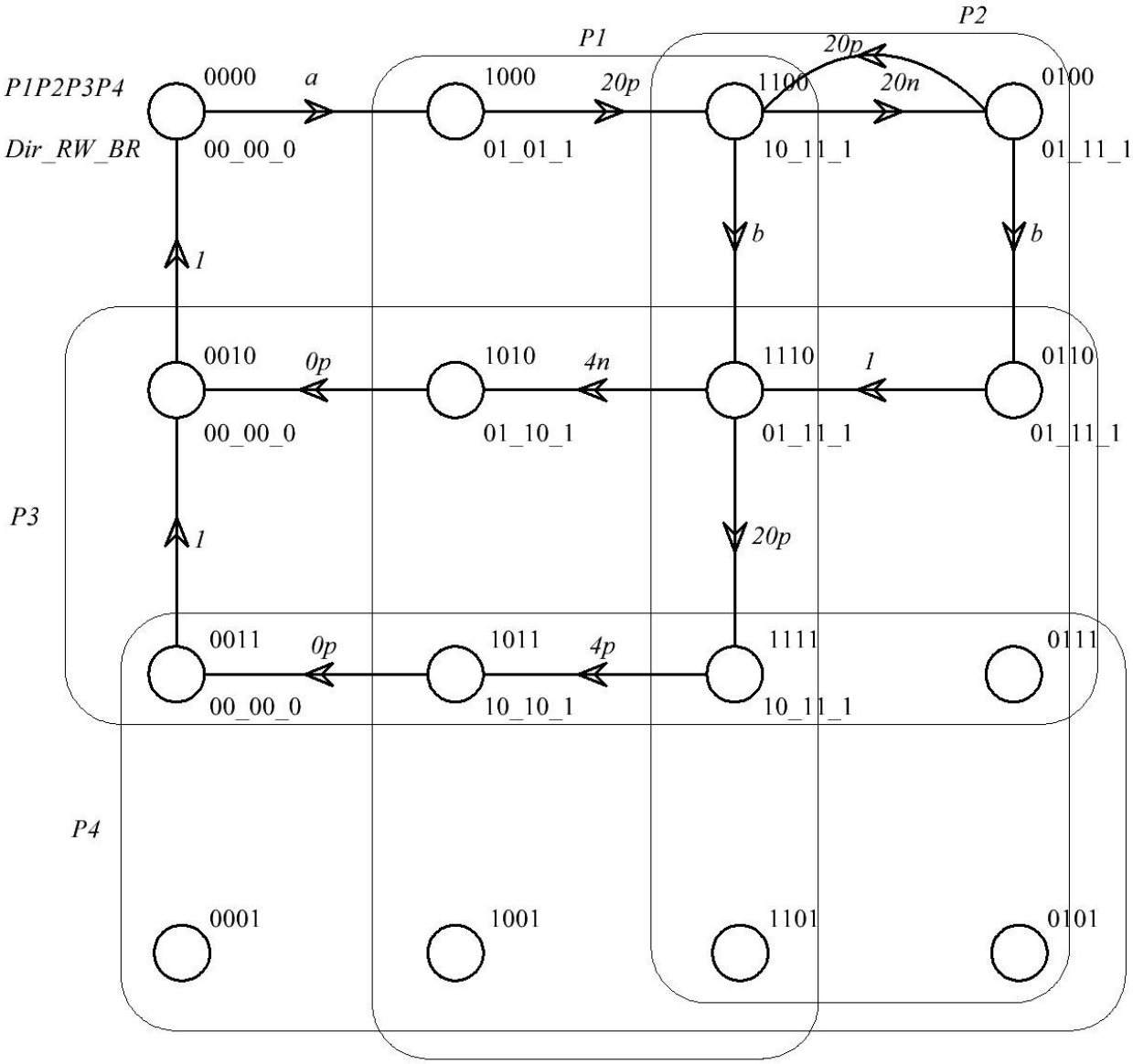


Рисунок 6.1 – Графопорехід

Умови вмикання та скидання тригерів:

$$Sp1 = a \cdot \overline{p2} \cdot \overline{p3} \cdot \overline{p4} + p2 \cdot p3 \cdot \overline{p4} + 20p \cdot p2 \cdot \overline{p3} \cdot \overline{p4} \tag{6.1}$$

$$Sp2 = 20p \cdot p1 \cdot \overline{p3} \cdot \overline{p4} \tag{6.2}$$

$$Sp3 = b \cdot \overline{p1} \cdot p2 \cdot \overline{p4} + b \cdot p1 \cdot p2 \cdot \overline{p4} \tag{6.3}$$

$$Sp4 = 20p \cdot p1 \cdot p2 \cdot p3 \tag{6.4}$$

$$Rp1 = 20n \cdot p2 \cdot \overline{p3} \cdot \overline{p4} + 0p \cdot \overline{p2} \cdot p3 \cdot \overline{p4} + 0p \cdot \overline{p2} \cdot p3 \cdot p4 \tag{6.5}$$

$$Rp2 = 4n \cdot p1 \cdot p3 \cdot \overline{p4} + 4p \cdot p1 \cdot p3 \cdot p4 \tag{6.6}$$

$$Rp3 = \overline{p1} \cdot \overline{p2} \cdot \overline{p4} \tag{6.7}$$

$$Rp4 = \overline{p1} \cdot \overline{p2} \cdot p3 \tag{6.8}$$

Рівняння для таймерів та вихідних змінних:

$$Dir(01) = xy = p1 \cdot \overline{p2} \cdot \overline{p4} + p1 \cdot p3 \cdot \overline{p4} + \overline{p1} \cdot p2 \cdot \overline{p4} \tag{6.9}$$

$$Dir(10) = yx = p1 \cdot p2 \cdot \overline{p3} \cdot \overline{p4} + p1 \cdot p3 \cdot p4 \tag{6.10}$$

$$RW(01) = xz = p1 \cdot \overline{p2} \cdot \overline{p3} \cdot \overline{p4} \tag{6.11}$$

$$RW(10) = zx = p1 \cdot \overline{p2} \cdot p3 \tag{6.12}$$

$$RW(11) = zz = p2 \cdot \overline{p4} + p1 \cdot p2 \cdot p3 \tag{6.13}$$

$$BR = p1 \cdot \overline{p4} + p2 \cdot \overline{p4} + p1 \cdot p3 \tag{6.14}$$

На рисунках нижче надана програма на мові LD.

```
0001 PROGRAM PLC_PRG
0002 VAR
0003     P1: BOOL;
0004     P4: BOOL;
0005     P3: BOOL;
0006     P2: BOOL;
0007     a: BOOL;
0008     twp: BOOL;
0009     b: BOOL;
0010     twn: BOOL;
0011     zp: BOOL;
0012     fn: BOOL;
0013     fp: BOOL;
0014     xy: BOOL;
0015     yx: BOOL;
0016     xz: BOOL;
0017     zx: BOOL;
0018     zz: BOOL;
0019     BR: BOOL;
0020 END_VAR
```

Рисунок 6.2 – Оголошення змінних

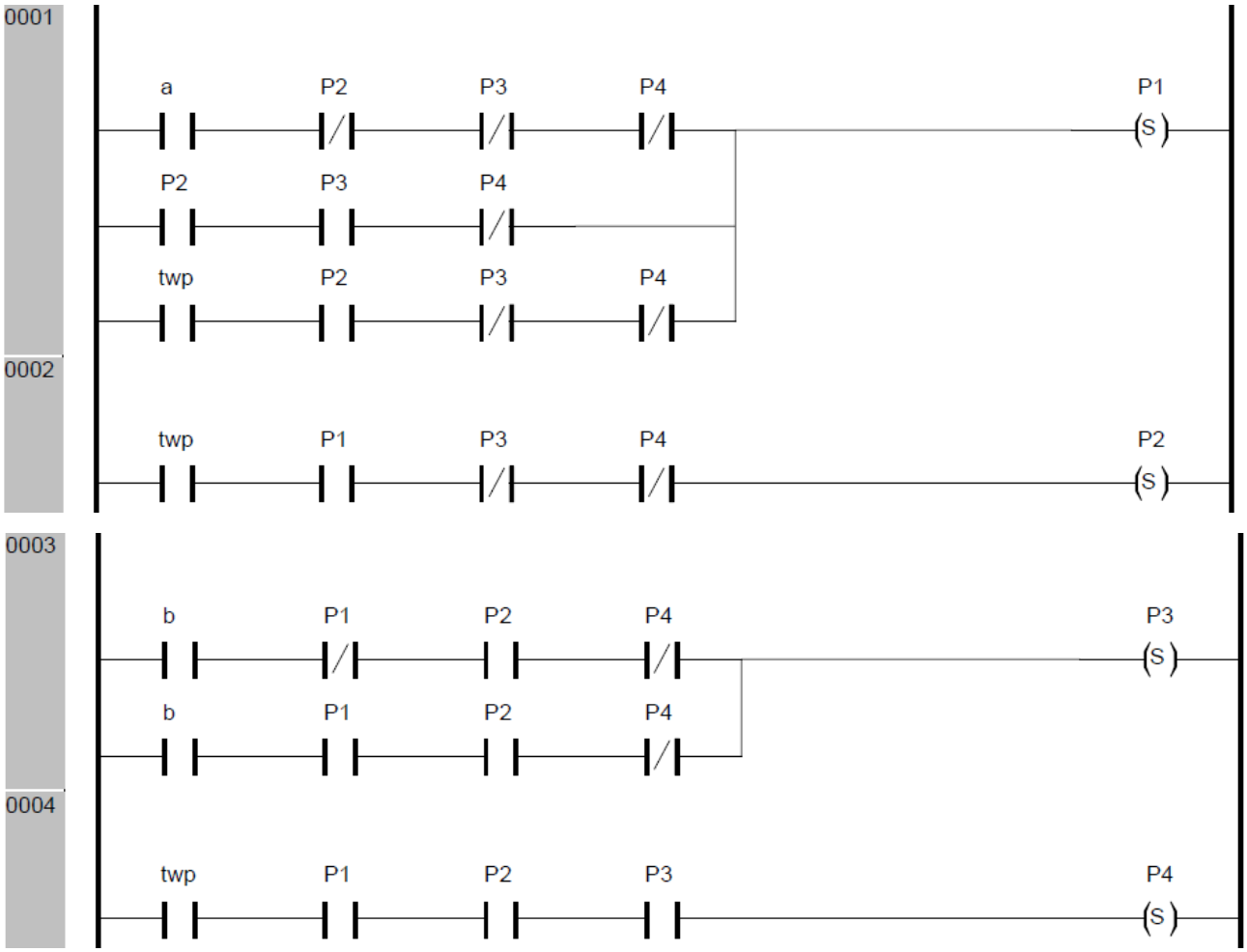


Рисунок 6.3 – Програма

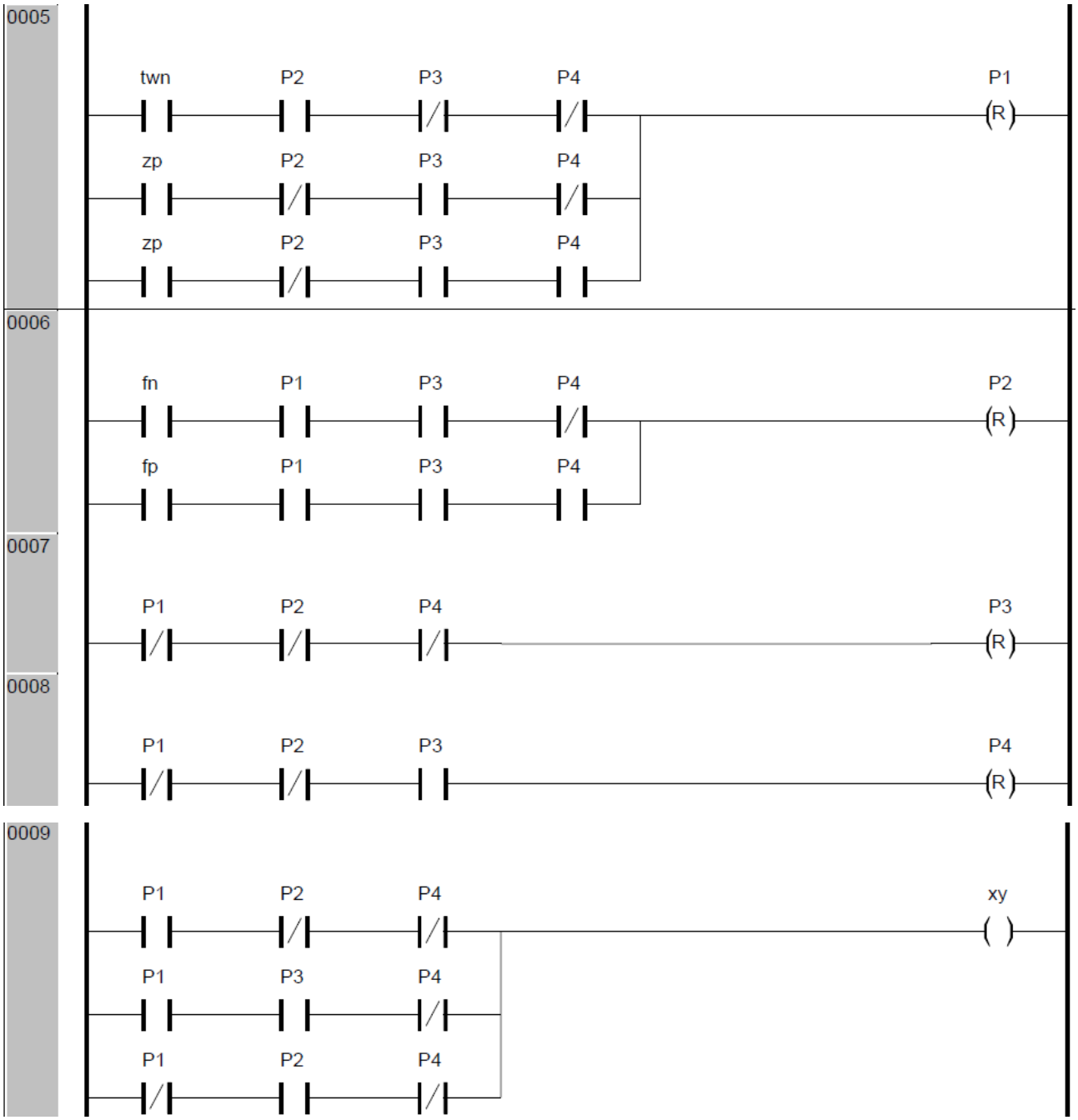


Рисунок 6.4 – Програма (продовження)

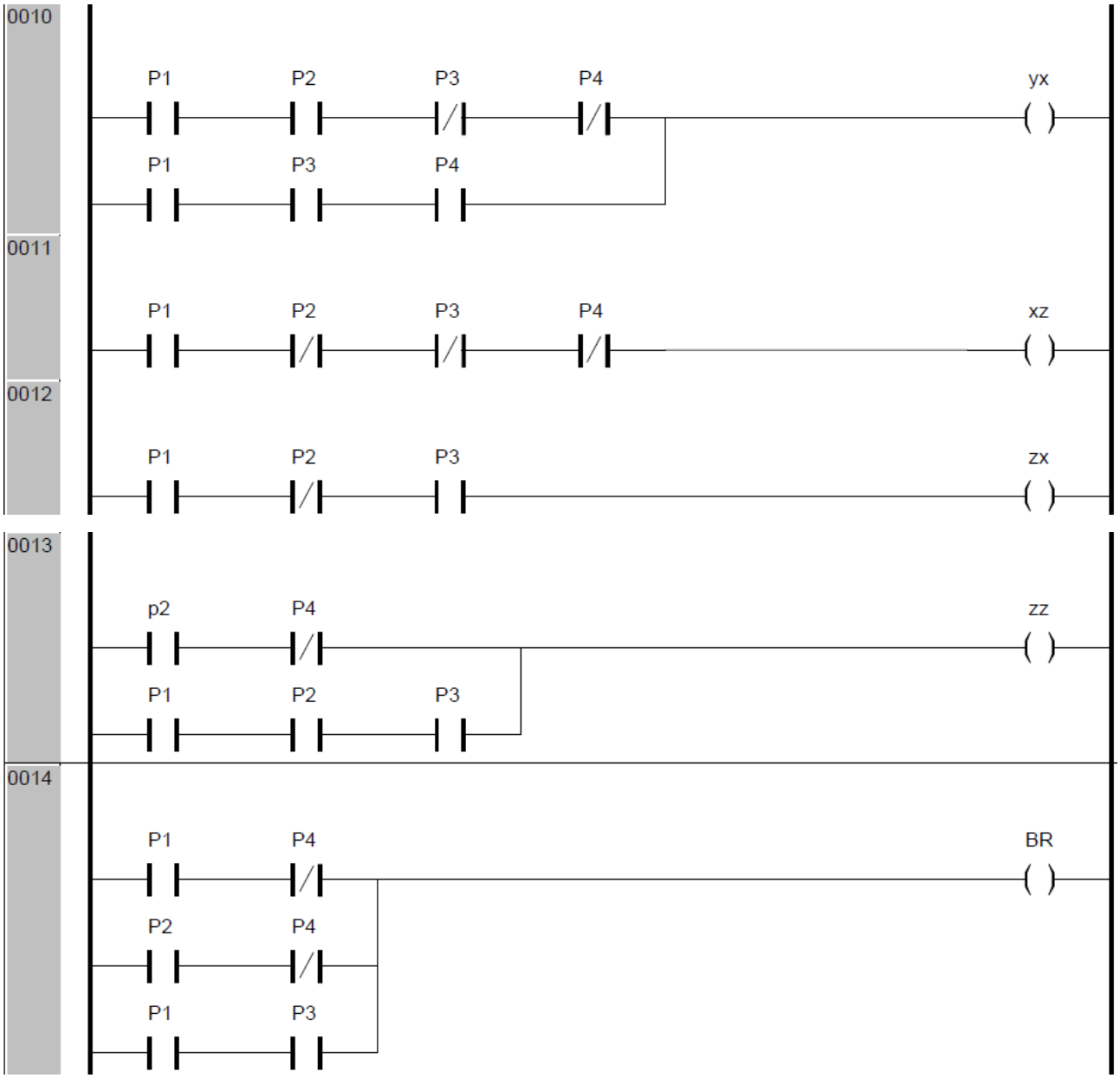


Рисунок 6.5 – Програма (продовження)

Висновок

В результаті синтезу була отримана програма на мові LD для керування платформою. Програма обробляє сигнали давача положення і видає команди на зміну режиму роботи. Таким чином буде забезпечено максимальну точність відпрацювання.

7. Охорона праці та техніка безпеки

Для подібних установок нормативи з охорони праці та техніки безпеки регламентуються державним стандартом ДСТУ 2456-94.

Допустимі максимальні значення номінальної напруги холостого ходу джерел живлення змінного (~) та постійного (=) струму [21]

Таблиця 2

Робочі умови зварювання	Рід струму та номінальна напруга холостого ходу, В, не більше
Середовище з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом	(=) 113 середнє значення (~) 42 ефективне значення
Середовище без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом	(=) 113 середнє значення (~) 80 ефективне значення
Зварювання з механічним переміщенням пальника, з підвищеним захистом зварника	(=) 141 середнє значення (~) 100 ефективне значения

Вимоги до технологічних процесів. При створенні технологічних процесів дугового і електрошлакового зварювання металів слід передбачати максимально можливу механізацію та автоматизацію процесу зварювання і його окремих елементів і застосування засобів колективного захисту від впливу шкідливих виробничих факторів.

Під час вибирання матеріалів для дугового і електрошлакового зварювання, необхідно віддавати перевагу електродам, зварювальним дротам, флюсам, захисним газам та їх сумішам, застосування яких супроводжується мінімальним утворенням шкідливих речовин згідно з СП № 1042. Не дозволяється застосування матеріалів, що не мають нормативних документів, затверджених в установленому порядку і узгоджених з Міністерством охорони здоров’я.

Устаткування, яке використовується для дугового і електрошлакового зварювання, повинно відповідати вимогам ГОСТ 12.2.003, ГОСТ 12.2.049, ГОСТ 12.2.007.8, «Правилам устройства электроустановок», «Правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей» і «Правилам техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей».

Під час дугового і електрошлакового зварювання в приміщенні необхідно застосувати пристрої місцевої витяжної вентиляції з очисткою видаленого повітря від твердої і газоподібної фази зварювального аерозолю у відповідності з вимогами СНиП 2.04.05 і ОНД-86. Механізоване зварювальне обладнання повинно мати вмонтовані повітроприймачі.

Не допускається проведення зварювання за недіючої місцевої витяжної вентиляції.

Вимоги до виробничих приміщень. Виробничі приміщення для проведення дугового і електрошлакового зварюваня повинні відповідати вимогам СН № 245.

Колірне оброблення інтер’єрів приміщень та устаткування в складальнозварювальних цехах повинно відповідати вимогам СН № 181.

Робочі місця для дугового зварювання повинні захищатися стаціонарними або переносними світлонепроникними огорожами з неспалимих матеріалів, висота яких повинна бути не менше ніж 2,5 м і забезпечувати надійність захисту.

Відстань між устаткуванням, від устаткування до стін та колон приміщення, інших споруд, ширина проходів та проїздів повинні відповідати чинним будівельним нормам, нормам технологічного проектування заготівельно — зварювальних цехів та ГОСТ 12.3.002.

Ширина проходів по периметру робочого стола, стенда, зварюваного виробу повинна бути не менше 1 м.

Підлоги виробничих приміщень для виконання дугового і електрошлакового зварювання повинні бути неспалимими, мати малу

теплопровідність, рівну нековзьку поверхню, а також задовольняти санітарно-гігієнічним вимогам у відповідності зі СНиП11-В.8.

Виробничі приміщення повинні бути обладнані загальнообмінною припливно — витяжною вентиляцією, відповідно до СНиП 2.04.05.

Повітрообмін зварювальних цехів належить розраховувати на розбавлення шкідливих речовин, невловлених місцевими витяжними пристроями, до рівнів ГДК. При цьому кількість повітря, що поддається припливними системами, повинна розраховуватися у відповідності з СП № 1009.

Видалене повітря з виробничих приміщень в атмосферу повинне проходити фільтрацію (очистку) від шкідливих речовин до концентрацій, що не перевищують допустимих рівнів викидлннм, V відповідності з СНиП 2.04.05, ОНД-86.

Подавання припливного повітря треба здійснювати в робочу зону або у напрямку робочої зони. Температура повітря, що подається вентиляційними установками, повинна бути не нижче +20 °С, згідно з СН № 4088. У випадку відсутності місцевого або загальноцехового вентилювання повітря до рівнів ГДК (дугове зварювання всередині виробів з антикорозійним покриттям слід передбачати примусове подавання чистого повітря під маску зварника в об’ємі гід 6 до 8 $м^3$/год, підігрітого в холодну пору року до температури не нижче +18°С, згідно з СН № 4088.

За інтенсивності теплового опромінення працюючих, що перевищує СН № 4088, слід передбачати спеціальні засоби захисту: екранування джерела, повітряне душовання, засоби індивідуального захисту.

Освітлення цехів, площадок і робочих місць, де проводяться роботи з дугового і електрошлакового зварювання, повинно відповідати СНиП 11-4.

Освітлення під час виконання дугового зварювання всередині замкнутих і важкоприступних просторів (ємкостей, корпусів, відсіків) повинно здійснюватися зовнішніми джерелами світла спрямованої дії чи місцевим

освітленням з напругою не більше 12 В, при цьому освітленість робочої зони повинна становити не менше 30 лк.

Для працюючих всередині виробничих приміщень повинні бути передбачені санітарно-побутові приміщення та пристрої згідно з СНиП 2.09.04, групи виробничих процесів 2в, 26; для працюючих на відкритому повітрі належить передбачати побутові приміщення пересувного або контейнерного типу, групи виробничих процесів 1 в, 1б, 1г.

Вимоги до експлуатації зварювального устаткування.

Підключення та вимкнення мережі живлення устаткування для дугового і електрошлакового зварювання, спостереження за його справним станом, а також ремонт повинен провадити електротехнічний персонал, що має групу допуску не нижче Ш.

Джерела живлення повинні підмикатися до розподільних електричних мереж з напругою не вище 600 В.

Безпосереднє живлення зварювальної дуги від силової, освітлювальної та контактної мережі не допускається.

Пересувні джерела живлення на час їх переміщення необхідно відключати від мережі.

Біля роз’ємів (затискачів) для підмикання джерел дугового і електрошлакового зварювання повинен бути напис: «МЕРЕЖА!».

На видному місці корпуса джерела живлення повинен бути напис: «БЕЗ ЗАЗЕМЛЕННЯ НЕ ВМИКАТИ!».

Металеві частини всіх видів зварювального устаткування, які в процесі експлуатації можуть опинитись під напругою, повинні бути надійно заземлені.

Кожна одиниця зварювального устаткування повинна мати окремий провід заземлення, який приєднується до магістралі заземлення.

Вимоги до виконання захисного заземлення на всіх видах зварювального устаткування — згідно з ГОСТ 12.2.007.0.

Допуск осіб до виконання зварювальних робіт повинен здійснюватися після ознайомлення їх з технічною документацією і проведення інструктажу з експлуатації устаткування та охороня праці.

В процесі експлуатації напруга холостого ходу джерел живлення для дугового зварювання не повинна перевищувати:

- 80 В — для джерел змінного струму;
- 100 В — для джерел постійного струму.

Установки ручного дугового зварювання повинні забезпечуватися обмежниками напруги холостого ходу.

Обмежник повинен бути забезпечений світловою сигналізацією про наявність небезпечної напруги в зварювальному колі, заземлений окремим провідником, а також забезпечувати зниження напруги холостого ходу не вище 12 В і не пізніше чим через 1 с після розмикання зварювального кола.

З’єднування джерел живлення із зварювальними установками при дуговому зварюванні повинно здійснюватися кабелями.

Під час дугового зварювання повинні бути передбачені щитки, обладнані вольтметром та сигнальною лампочкою, які вказують на наявність або відсутність напруги у зварювальному колі.

Для ручного дугового зварювання повинні застосовуватися електродотримачі згідно з ГОСТ 14651.

Приєднання зварювальних кабелів до електродотримача, виробу та зварювальної установки повинно бути надійним і здійснюватися механічними затискачами.

Схема приєднання декількох джерел живлення під час роботи на одну зварювальну дугу повинна виключати можливість виникнення між виробом та електродом напруги, що перевищує найбільшу напругу холостого ходу одного з джерел живлення.

Під час експлуатації устаткування для електрошлакового зварювання повинна бути забезпечена надійність закріплення зворотних та бокових роликів ходового механізму.

Устаткування для дугового і електрошлакового зварювання повинно регулярно, перед початком кожної зміни, підлягати перевірці на відсутність замикання, оголених струмоведучих частин, справність ізоляції, проводів та кабелів живлення, цілісність провода та справність блокіровок.

Вимоги до організації робочих місць.

Стаціонарні місця для працюючих в сидячому положенні повинні бути укомплектовані робочими кріслами з регульованими параметрами згідно з ГОСТ 12.2.049.

Сидіння і спинка крісла повинні бути виконані з негорючих матеріалів, які легко очищуються, з низьким коефіцієнтом теплопровідності.

Під час виконання робіт з дугового і електрошлакового зварювання в одному приміщенні з іншими роботами необхідно вживати заходи, що виключають можливість впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів на працюючих.

Робоче місце зварника щодо розташування робочої поверхні, органів управління та контролю повинно відповідати вимогам ГОСТ 12.2.032, ГОСТ 12.2.033.

Зварювання відкритою дугою виробів малих і середніх розмірів у стаціонарних умовах повинна провадитись у спеціально обладнаних кабінах. Кабіни повинні бути з відкритим верхом, а між стінками кабіни та підлогою належить залишати зазор не менший 50 мм, при зварюванні в середовищі захисних газів — не менше 300 мм. Вільна площа в кабіні на один зварювальний пост повинна складати не менше 3 м^2.

Кабіна на два і більше постів, а також робочі місця на потоково-конвейєрних лініях повинні бути розділені захисними ширмами, згідно з ГОСТ 12.2.062, що захищають зварників від випромінювання дуги, бризок розплавленого металу та забезпечують достатній простір кожному працюючому.

Під час виконання робіт з дугового і електрошлакового зварювання на відкритому повітрі над устаткуванням та зварювальними постами повинні бути

споруджені навіси з негорючих матеріалів. За відсутності навісів роботи по зварюванню під час атмосферних опадів проводити забороняється.

Розташування обладнання належить провадити таким чином, щоб ширина проходів складала:

- між стіною будинку та устаткуванням — не менше 0,5 м;

- між стаціонарними джерелами живлення — не менше 0,8 м;

- між устаткуванням та стаціонарними багач он остови ми джерелами живлення електрошлакового зварювання (ЕШЗ), а також рухомими механізмами та деталями, що переміщуються — не менше 1,5 м;

- між устаткуванням та місцями складування — не менше 1,0 м.

Стаціонарні робочі місця при зварюванні металоконструкцій масою понад 15 кг повинні бути обладнані вантажопідйомними пристроями згідно СП №1009.

Стаціонарні робочі місця, пости, стенди дугового і електрошлакового зварювання належить обладнати фільтровентиляційними припливно-витяжними пристроями та атестувати їх по ГДК.

Під час зварювання виробів з підігріванням робоче місце повинно бути обладнане екранами, укриттям для підігрітих виробів, які забезпечують зменшення опромінення зварника відповідно з вимогами СН № 4088. Устаткування для дугового зварювання в захисних газах і газових сумішах повинно мати захисні (переносні або стаціонарні) екрани, які забезпечують захист електрозварників від оптичного випромінювзння.

Зварювальні роботи у замкненому або обмеженому просторі повинні провадитись під контролем двох спостерігачів з кваліфікаційною групою з техніки безпеки не нижче II, яким належить знаходитись ззовні. Зварник повинен мати запобіжний пояс з канатом, кінець якого знаходиться у спостерігачів.

Робочі місця, розташовані вище 1,3 м від рівня землі або суцільного покриття, повинні бути оснащені огорожами висотою не менше 1,1 м згідно з ГОСТ 12.4.059.

Для виконання зварювальних робіт на висоті більше ніж 5 м слід установлювати риштування (площадки) з неспалимих матеріалів згідно з вимогами ГОСТ 26887, ГОСТ 27321, ГОСТ 27372. Працюючі зобов’язані користуватись вогнестійкими запобіжними поясами та страхувальними фалами з карабінами, а також спеціальними сумками для інструменту та збирання недогарків електродів.

Не допускається проведення робіт з дугового і електрошлакового зварювання без вжиття заходів, що виключають можливість пожежі як під час зварювання, так і після закінчення.

Під час проведення зварювальних робіт за температури нижчій ніж мінус 20 °С повинні бути забезпечені умови, які відповідають вимогам СНиП 2.09.04.

Вимоги до персоналу, який виконує зварювальні роботи. До виконання дугового зварювання допускаються особи, не молодші 18 років, які пройшли попередній медичний огляд (з урахуванням медичних протипоказань), навчання, інструктаж та перевірку знань вимог безпеки згідно з ГОСТ 12.0.004, мають кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижчу II і посвідчення.

Помічник зварника до самостійного виконання електрошлакового зварювання не допускається.

Повторний інструктаж проводиться не рідше ніж один раз у три місяці з відміткою в журналі.

Зварники, які виконують роботи на об’єктах, які підлягають контролю Держнаглядохоронпраці, повинні підлягати атестації, згідно вимог «Правил аттестации сварщиков».

До зварювальних робіт на висоті 5 м і вище від поверхні землі, перекриття, площадок, настилу допускаються зварники, які пройшли спеціальний медичний огляд, мають стаж верхолазних робіт не менше одного року і розряд зварника не нижче III.

Працвіники, які виконують зварювання чи інші роботи, зв’язані із зварюванням, повиині не рідше одного разу на рік проходити періодичні медичні огляди.

Висновки

Метою даної роботи була розробка швидкодіючого автоматизованого електроприводу механізму, що забезпечує періодичні коливання платформи з виробом у процесі електродугового наплавлення.

В першій частині роботи був виконаний аналітичний огляд та аналіз літературних джерел в області автоматизованих систем електродугового зварювання. Були сформовані вимоги до електроприводу, розглянуті різні системи електроприводу та на підставі порівняльного аналізу технічних характеристик електродвигунів та вимог до технологічного процесу для розробки САК у якості приводу було обрано електропривод на основі вентильного двигуна.

На основі розрахунку параметрів системи було обрано силове обладнання. Результати моделювання підтвердили працездатність розроблених моделей систем. При синтезі САК використовувались стандартні налаштування контурів.

Аналіз результатів моделювання показав, що система здатна досить точно відпрацьовувати завдання швидкості або положення.

В частині «Охорона праці» викладено основні положення щодо технологічного процесу, організації робочих місць, вимог до персоналу та медотів контролю за виконанням вимог безпеки.

Перелік використаних джерел

1. Патон Б. Е. Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций. Автоматическая сварка. 2003. Октябрь – ноябрь.

2. Гладырев А. И., Родькин Д. И. Технологические предпосылки применения регулируемого и управляемого электропривода. Научные труды КПГИ. 2000. Вып. 1.

3. Патон Б. Е., Лебедев В. А., Пичак В. Г. и др. Применение полуавтоматов блочно-модульной конструкции типа ПШ107 для сварки, наплавки и резки сталей и алюминия. Автомат. сварка. 2004. № 4.

4. Лебедев В. А., Новгородский В. Г. Автоколебательные транзисторные электроприводы постоянного тока для сварочного оборудования инженер. Сварочное производство. 2003. № 8.

5. Omron Device Net Operation Manual Cat. No. W267-E1-11 Revised, April. 2008.

6. Патон Б. Е., Ющенко К. А., Лычко И. И., Ковалев В. Д., Великий С. И., Притула С. И., Чепурной А. Д, Никитченко С. П., Шалашный А. Н. Оборудование, техника и технология электрошлаковой сварки неповоротных кольцевых стыков. Автоматическая сварка. 2007. № 7 (651).

7. URL:https://visnyk.tntu.edu.ua/pdf/93/479.pdf

8. Максимов С. Ю., Лебедев В. А., Лендел И. В. Герметизация труб теплообменников «мокрой» сваркой на глубине 200 м. Вопросы материаловедения. 2015. № 1.

9. Paul Acarnley. Stepping motors. A guide to theory and practice. 4th ed. London: Institution of Engineering and Technology, 2007.

10. URL:https://www.ni.com/ru-ru/innovations/white-papers/06/motor-fundamentals.html

11. URL:https://electricityshock.com/advantages-and-disadvantages-of-brushless-dc-motor/

12. Павловський М. А. Теоретична механіка: Підручник. – К.: Техніка, 2002.

13. URL:https://www.ato.com/1-kw-72v-brushless-dc-motor

14. URL:https://www.chipdip.ru/product/irfz44n?from=rec_group

15. Министерство образования и науки Российской Федерации, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», магистерская диссертация на тему Математическое моделирование вентильного двигателя.

16. ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА-1. КУРС ЛЕКЦІЙ для студентів напряму підготовки 6.050702 "Електромеханіка", спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод"

17. Ключев В. И. «Теория электропривода». Учебник для вузов. – М.: Энэргоматиздат. 1985

18. Быстродействующий вентильный электропривод для оборудования механизированной дуговой сварки. Лебедев В.А., докт. техн. наук, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины (г. Киев), Гулый М. В. канд. техн. наук ООО «Электротехника - Новые технологии» (г.Одесса).

19. URL: http://geekmatic.in.ua/ua/lm358dr

20. URL: https://www.chipdip.ru/product/1n4740a

21. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ. ЗВАРЮВАННЯ ДУГОВЕ І ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ. Вимоги безпеки. ДСТУ 2456-94

Поз. познач.	Найменування	Кіл.	Примітка
ЗП	Формувач завдання кутового положення	1	
ПІ-РШ	ПІ-регулятор кутової швидкості обертання	1	
РРС	Релейний регулятор струму	1	
БК	Блок комутації	1	
ДП	Датчик положення	1	
ДС	Датчик струму	1	
ДШ	Датчик швидкості	1	
VT1...VT6	Силові транзистори	6	
П-РП	П-регулятор кутового положення	1	
КСФ	Комутатор струму фази	1	
РЕ1, РЕ2	Релейні елементи	2	
БЛ	Блок логіки	1	
A, B, C	Фази двигуна	3	
DA1, DA2	Операційний підсилювач	2	
R1...R6	Резистор	6	
VD1, VD2	Стабілітрон	2	

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	141.0013.011. ПБР		
Розроб.		Шишка Д.			Перелік елементів	Літ.	Арк. 67 / Аркушів 67
Перевір.		Халімовський О.					
Рецензн.						Організація	
Н. Контр.							
Затверд.							