Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр .
(ступінь вищої освіти)

на тему **«Модернізація електроприводу формуючої машини для витяжки склодроту»**

Виконав: студент 4 курсу, групи 401-МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Михайленко В.Ю.
(прізвище та ініціали)
Керівник Єрмілова Н.В.
(прізвище та ініціали)
Рецензент Кислиця С.Г.
(прізвище та ініціали)

Полтава - 2023 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти Бакалавр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій

_____О.В. Шефер
“ 01 ” квітня 2023 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРУ СТУДЕНТУ
Михайленку Владиславу Юрійовичу

1. Тема роботи **«Модернізація електроприводу формуючої машини для витяжки склодроту»**
керівник роботи Єрмілова Наталя Василівна, к.т.н., доцент
затверджена наказом вищого навчального закладу від 20. 03. 2023 року
№ 236-фа .
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 14.06.2023 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Технічна документація на формуючу машину. Забезпечити плавне регулювання швидкості обертання мундштука формуючої машини в діапазоні 2,5÷25 об/хв. Забезпечити підтримку заданої швидкості обертання мундштука з точністю ± 0,1 об/хв, що відповідає похибці не більше 0,4%. Забезпечити перерегулювання у межах 10%, час регулювання – не більше 1 сек.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Опис технологічного процесу витяжки склодроту та методи автоматизації процесу. Постановка задач на кваліфікаційну роботу. Аналіз технологічного процесу, вибір типу електродвигуна та схеми управління двигуном. Розробка функціональної та принципової схеми електроприводу формуючої машини. Розрахунок потужності, вибір та перевірка вибору електродвигуна. Розрахунок та дослідження системи автоматичного керування. Визначення якісних параметрів та стійкості САК.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
1) загальний вигляд формуючої машини;
2) технологічний процес витяжки склодроту;
3) функціональна схема ЕП формуючої машини;
4) принципова схема ЕП формуючої машини;
5) структурна схема контуру швидкості та перехідний процес по швидкості;
6) структурна схема контуру струму та перехідний процес по струму;
7) аналіз стійкості системи

6. Дата видачі завдання 01.05.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
1	Опис технологічного процесу витяжки склодроту та методи автоматизації процесу Постановка задач на кваліфікаційну роботу	26.04.23	I	20%	Пл. 1
2	Аналіз технологічного процесу, вибір типу електродвигуна та схеми управління двигуном	10.05.23		40%	Пл. 2
3	Розробка функціональної та принципової схеми електроприводу формуючої машини. Розрахунок потужності, вибір та перевірка вибору електродвигуна	24.05.23	II	60%	Пл. 3
4	Розрахунок параметрів та дослідження системи автоматичного керування. Визначення якісних параметрів та стійкості САК	07.06.23		80 %	Пл. 4,5
5	Оформлення кваліфікаційної роботи бакалавра	14.06.23	III	100%	Пл. 6

Студент _____ Михайленко В.Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Єрмілова Н.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи бакалавра "Модернізація електроприводу формуючої машини для витяжки склодроту"

Робота містить 59 сторінок, 16 ілюстрацій, 2 таблиці, 18 використаних джерел.

Ключові слова: електропривод, склодріт, широтно-імпульсний модулятор, регулятор швидкості, перехідний процес.

Предметом дослідження кваліфікаційної роботи є електропривод формуючої машини. Об'єктом дослідження є розроблення системи автоматичного управління електроприводом.

Розроблена система автоматичного управління електроприводом формуючої машини дозволяє не тільки забезпечити потрібні параметри технології виробництва склотрубки та точність регулювання її параметрів, а також якісно підвищити надійність функціонування як окремих елементів системи управління, так і електроприводу в цілому.

Використання в схемі управління уніфікованих та широко застосованих пристроїв значно полегшує задачу ремонту та накладки обладнання, скорочує тривалість вимушених простоїв при виникненні несправності, а отже підвищує гнучкість та надійність виробничого процесу.

Робота має практичну цінність і її результати після більш детальної доробки можуть бути розглянуті для використання на даному підприємстві.

ЗМІСТ

Вступ …….. 6
1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА …… 9
1.1 Загальні відомості про технологічний процес витяжки склодроту ...……...…. 9
1.2 Технічні вимоги до процесу витяжки склодроту ……. 12
1.3 Характеристика процесу витяжки склодроту з точки зору автоматизації. ……..…… 13
1.4 Висновки по розділу ……. 14
2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА …...…… 16
2.1 Аналіз технологічного процесу та вибір типу електродвигуна 16
2.2 Аналіз типових схем управління двигуном постійного струму та вибір схеми управління ……..…… 17
2.3 Розробка функціональної схеми електроприводу формуючої машини …….……...…….. 22
2.4 Розрахунок та вибір електродвигуна формуючої машини …... 28
2.5 Висновки по розділу …….. 33
3 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ……. 34
3.1 Розрахунок точності функціонування цифрової системи управління …….. ……. 34
3.2 Розроблення датчика швидкості ……..…. 36
3.3 Розрахунок та дослідження системи автоматичного керування 40
3.4 Оцінка стійкості розробленої САК …… 55
3.5 Висновки по розділу……. 56
ВИСНОВКИ …….. 57
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА ……... 58
ДОДАТКИ ……..... 60

ВСТУП

Розвиток власної конкурентоспроможності промисловості на Україні є найважливішою і невід'ємною частиною державної економічної політики. Полтавський завод медичного скла є єдиним крупним на території України виробником медичного скла та виробів з нього. Проведена реконструкція скловареного цеху дала можливість виробництва медичного скла гідролітичного класу, що повністю відповідає останнім міжнародним вимогам до медичного скла.

Темою даної кваліфікаційної роботи бакалавра обрана модернізація системи керування електроприводом формуючої машини "DANNER" фірми "OLIVOTTO", що працює в складі лінії витяжки склотрубки зі скломаси. Підставою для написання даної роботи послужив той факт, що обладнання для витяжки склотрубки (склодроту), призначеної для медичних цілей, у світі випускає тільки ця фірма, а модель формуючої машини є дещо застарілою. Тому основною задачею є удосконалення системи автоматичного керування електроприводом формуючої машини.

Система керування даної машини являє собою складну систему автоматичного регулювання швидкості обертання мундштука формуючої машини, який безпосередньо контактує з розплавленою скломасою, виконану по блочно-модульній схемі з окремих функціональних блоків та модулів імпортного виробництва.

Предметом дослідження кваліфікаційної роботи є електропривод формуючої машини. **Об'єктом дослідження** є розроблення системи автоматичного керування електроприводом.

Основними задачами, які призвана вирішити система автоматичного управління електроприводом формуючої машини, є регулювання швидкості обертання мундштука та підтримка її з заданою точністю. До якості

регулювання швидкості обертання мундштука пред'являються підвищені вимоги по точності, так як від їх дотримання залежать показники якості випускаємого скловарним цехом склодроту.

Це наступні параметри:

- циліндричність склодроту - форма склодроту по всій його довжині повинна бути строго циліндрична;

- відсутність конічності – не допускається зміна діаметру склодроту по всій довжині його відрізку;

- зовнішній діаметр – даний показник являється одним із основних при визначенні сортності типу склодроту;

- товщина стінки – відноситься до основних параметрів, визначаючим тип та сортність склодроту;

- однорідність – відсутність бульбашок повітря (капілярів) в структурі склодроту.

Мета даної роботи полягає в рішенні комплексу питань по модернізації та дослідженню системи автоматичного регулювання процесом витяжки склодроту.

Актуальність поставленої цілі обумовлена:

а) широким використанням виробів з медичного скла в медичній та мікробіологічній промисловості;

б) відсутністю вітчизняної промислової реалізації як систем автоматичного управління процесом витяжки склодроту, так і самого технологічного обладнання.

Необхідність роботи по модернізації системи автоматичного управління процесом витяжки полягає в тому, що блоки та модулі, які входять у склад системи автоматичного управління електроприводом формуючої машини, представляють собою закінченні вузли імпортного виробництва та являється комерційною таємницею фірми виробника. Тому докладної технічної

документації на систему автоматичного управління електроприводом формуючої машини на Полтавському заводі медичного скла немає. В теперішній час обслуговування та ремонт системи автоматичного управління електроприводом формуючої машини проводиться тільки на рівні заміни вузлів, які вийшли з ладу, на аналогічні імпортного виробництва. В першу чергу, дана магістерська робота повинна вирішити проблему, зв'язану з придбання нових вузлів та блоків, а також з тим, що пусконаладні та ремонтні роботи можуть бути виконані тільки спеціальними фірмами виробника. Дана робота не вносить змін в технологічний процес з точки зору заміни технологічного обладнання лінії витяжки скла, а також зміни її параметрів. Необхідність модернізації системи автоматичного управління електроприводом формуючої машини продиктована, перш за все, міркуваннями економічності та швидкості обслуговування.

В ході бакалаврської роботи повинні бути вирішені **наступні задачі:**

- розрахунок та вибір приводного електродвигуна формуючої машини;
- розробка системи автоматичного управління електроприводом формуючої машини, що забезпечить якість регулювання, аналогічну системі управління імпортного виробника;
- розробка системи плавного регулювання швидкості обертання мундштука.

1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Загальні відомості про технологічний процес витяжки склодроту

Медичне скло є одним з основних матеріалів для виготовлення медичного обладнання та виробів фармакологічної промисловості. Особливо ефективним є застосування медичного скла в якості захисного матеріалу для різних видів фармакологічних препаратів. У зв´язку з цим виникає необхідність вдосконалення технологічних процесів отримання медичного скла та виробів з нього [1].

Одним з основних етапів виробництва медичного скла є витяжка склодроту, який слугує напівфабрикатом для виготовлення медичних ампул. Основні технологічні стадії процесу виготовлення скла представлені на рис. 1.1.

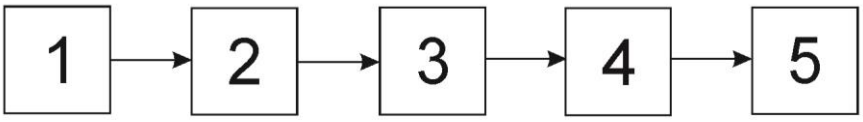


Рисунок 1.1 – Основні технологічні стадії виробництва скла: 1-дозування компонентів; 2-приготування шихти; 3-варка скла; 4-витяжка склодроту; 5-виробницто готової продукції

Склодріт, поряд з медичними ампулами, являє собою основну продукцію Полтавського заводу медичного скла. До медичного скла та виробів з нього представляються високі вимоги як з точки зору хімічного складу, так і з точки зору механічних та геометричних параметрів. Отримання склодроту являє собою складний технологічний процес, який неможливий без автоматизації та механізації як окремих операцій, так і всього процесу в цілому.

Процес витяжки склодроту може складатись з двох етапів:

1) процес варки скла;

2) витяжка з отриманої скломаси склодроту заданих геометричних розмірів.

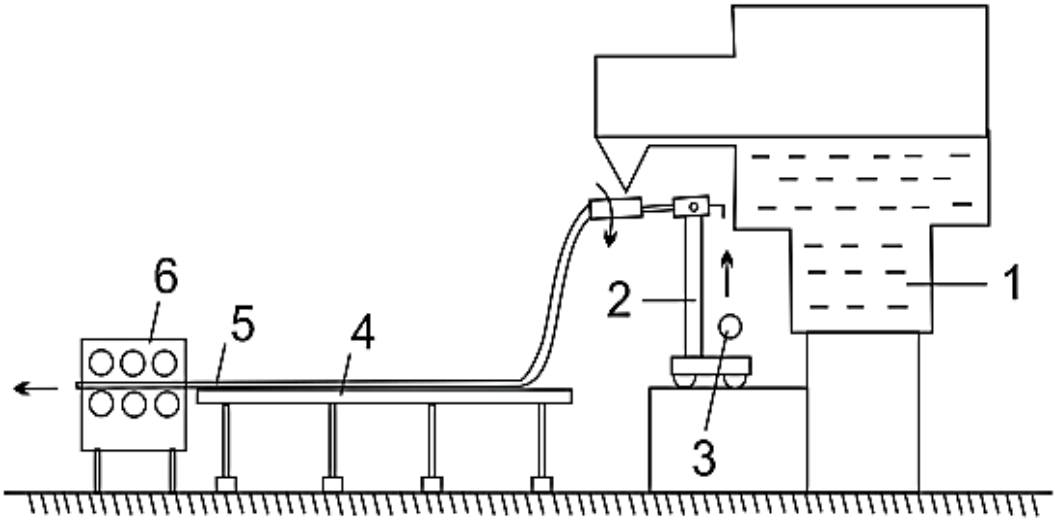


Рисунок 1.2 – Спрощена технологічна схема лінії витяжки склодроту

1- скловарна піч; 2- формувальна машина; 3- пристрій роздуву склотрубки; 4- лінія підтримки склодроту на час затвердіння; 5- склодріт; 6- тянульна машина

Витяжка склодроту виготовляється за допомогою технологічного обладнання, яке входить в склад лінії витяжки склодроту. Спрощена технологічна схема лінії склодроту представлена на рис. 1.2.

Варка скла здійснюється в скловарній печі ванного типу, яка представляє собою ванну з вогнестійкого матеріалу. Нагрів печі здійснюється стрижневими електродами, встановленими в робочій зоні печі. В остиглому стані скло є гарним діелектриком, але в рідкому, нагрітому стані скло добре проводить електричний струм, та електричний опір його тим нижчий, чим вища температура скломаси. Процес варіння здійснюється безперервно за рахунок пропускання електричного струму великої напруги між парами молібденових електродів.

За рахунок конвекційного руху більш гаряче, зварне скло піднімається в верхній прошарок розплавленої скломаси, звідки через спеціальний отвір (лоток) в корпусі печі поступає безперервним потоком на ліні витяжки скла.

Витяжка скла здійснюється за допомогою трьох технологічних агрегатів:

1) формуючої машини, яка обертає мундштук;
2) лінії підтримки склодроту на час його затвердіння;
3) тянульної машини.

Формуюча машина, яка являє собою об’єкт модернізації, має наступну конструкцію. На змінній платформі встановлена опорна колона мундштука, в горі на якій влаштований електричний привод обертання мундштука. Платформа має 4 колеса, які ковзають по рельсам, що дозволяє її демонтаж з муфеля печі при необхідності заміні мундштука. Коли платформа знаходиться в робочому стані, одне з чотирьох колес блокується ручним гальмом. Вал мундштука обертається електродвигуном, з’єднаним через муфту з черв’ячним редукторним блоком з гелікоїдальним колесом. Для підтримання навантаження електродвигуна стабільним, не змінюючи при цьому точність регулювання швидкості, використовується гальмівний блок.

Мундштук являє собою конічної форми металеву трубу довжиною 2 метри з конічністю 3°, виготовлену з жаростійкої сталі. В тій частині, де мундштук безпосередньо контактує з розігрітим склом, він покритий жаростійкою керамікою, так як температура скла складає, згідно з технології варки, 1200°. Вал мундштука частково охолоджується за допомогою водяної сорочки та є цільним. Мундштук приводиться до обертання за допомогою спеціального приводу та обертається з однією швидкістю. Підтримка незмінної величини швидкості обертання мундштука, в сукупності з рядом інших вимог, є важливішою умовою отримання заданих характеристик якості склотрубки. Вісь обертання мундштука нахилена по відношенню до горизонтальної вісі на кут 12-18°. Скломаса, яка подається на мундштук безперервним потоком, утворює

на його поверхні спіраль, яка внаслідок нахиленого положення мундштука стікає до його нижнього, відкритого кінця та утворює скляний циліндр. За рахунок подачі стислого повітря у внутрішню порожнину мундштука на нижньому, відкритому його кінці зі скломаси утворюється неперервна скляна трубка. Цю трубку потрібно весь час стягувати, так як скло ще не позбулося своєї текучості. Далі склотрубка поступає на лінію затвердіння.

Лінія затвердіння являє собою металевий горизонтальний лоток. Для утримання від деформацій склодроту, по всій довжині лотка розміщуються форсунки, через які подається стисле повітря. Тим самим вирішуються дві задачі: охолодження склодроту та підтримання його на повітряній подушці, що запобігає деформації.

В кінці лінії затвердіння розташована тянульна машина, яка стягує склодріт з мундштука з постійною швидкістю. Після тянульної машини склодріт потрапляє на обрізну машину, в якій він розділяється на відрізки довжиною 1,5м.

1.2. Технічні вимоги до процесу витяжки склодроту

Основними вимогами до технологічного процесу є отримання та підтримка заданих геометричних параметрів склодроту [2]. Ця задача вирішується системою автоматики, в склад якої входить формуюча машина. Формуюча машина призначена для отримання та підтримки заданої швидкості обертання мундштука, а також регулювання її в заданому діапазоні: 2,5÷25 об/хв.

В даній роботі розглядається модернізація системи автоматичного управління процесом витяжки склодроту, одним з компонентів якого є електропривод формуючої машини.

Схема процесу витяжки скла, отримана на основі досвіду експлуатації, представлена на рис. 1.3.

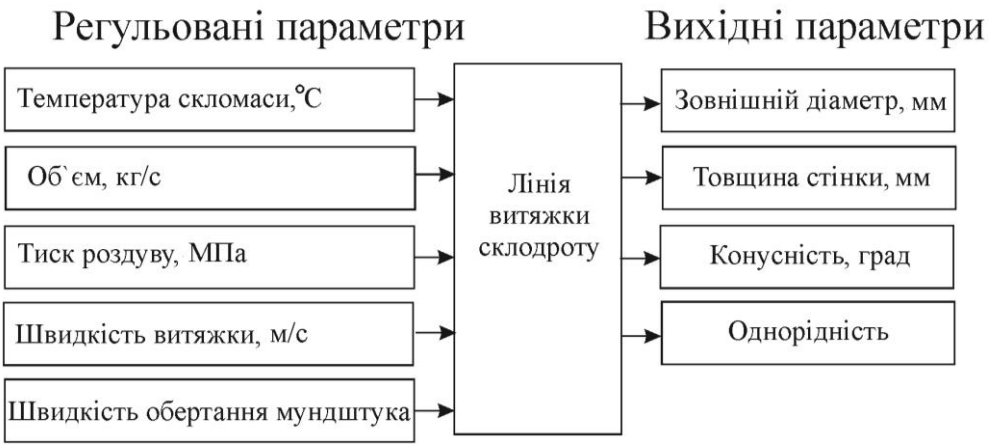


Рисунок 1.3 – Схема процесу витяжки склодроту.

З точки зору технології роботи електропривод формуючої машини повинен забезпечити:

1) Плавне регулювання швидкості обертання мундштука в діапазоні 2,5÷25 об/хв;

2) Підтримку заданої швидкості обертання мундштука з точністю ± 0,1 об/хв, що відповідає похибці не більше 0,4%.

1.3 Характеристика процесу витяжки склодроту з точки зору автоматизації

Процес отримання склодроту з розплавленої скломаси є кінцевою стадією в видобуванні склотрубки, яка використовується в медичній промисловості в якості напівфабрикату для виготовлення різного роду ампул, пробок, флаконів та інших виробів. Основним технічним обладнанням, яке використовується для склодроту, є лінія витяжки, принцип дії якої оснований на вдуванні повітря в скляний циліндр, який постійно витягується. Завдяки високій технологічності та водночас, простоті й надійності в роботі, лінія витяжки отримала широке поширення на підприємствах, які випускають медичне скло.

На Полтавському заводі медичного скла в ході реконструкції скловарного цеху була встановлена лінія витяжки склодроту італійського виробництва. З

точки зору технологічного процесу рівень автоматизації не повністю забезпечує вимоги якості, тому існує ряд моментів, які потребують доопрацювань.

Розглянемо ті з них, котрі безпосередньо відносяться до об’єкту модернізації даної роботи – електроприводу формуючої машини.

1) В відповідності з існуючою документацією, швидкість обертання мундштука регулюється в межах 0÷15 об/хв, але технологія виробництва склотрубки різного сортаменту, згідно технічній документації, потребує регулювання в більш широкому діапазоні – 2,5÷25 об/хв.

2) Скловарна піч, внаслідок протікання високих потоків між парами електродів, є сильним джерелом електромагнітного випромінювання, що відображається на роботі датчика зворотного зв´язку по швидкості (тахогенератора) в системі управління електроприводом формуючої машини.

3) Сам факт використання потенціометра, який включає електричні контакти, як основного елементу пристрою, що задає швидкість обертання мундштука, значно знижує якість та надійність управління електроприводом формуючої машини.

1.4 Висновки по розділу

Проведений вище аналіз стану автоматизації процесу витяжки склодроту дозволяє отримати ряд загальних висновків та встановити напрямки реальної розробки:

- технологічний процес витяжки склодроту має ряд вищеописаних особливостей, які необхідно враховувати в процесі модернізації його окремих конструктивних модулів.
- рівень автоматизації процесу витяжки склодроту на Полтавському заводі медичного скла не повністю задовольняє вимогам якості та потребує введення ряду вдосконалень.

У відповідності з вищеописаним, метою даної роботи є розширення комплексу запитань на модернізацію системи автоматичного управління електроприводом формуючої машини.

Виходячи з цієї мети в роботі поставлені задачі:

1. Удосконалити існуючу систему автоматизації управління електроприводом формуючої машини шляхом створення автоматизації контролю та регулювання швидкістю.

2. Для реалізації автоматичного управління електроприводом формуючої машини необхідно встановити:

- прилад виміру інтенсивності обертання валу приводного електродвигуна формуючої машини;

- регулятор швидкості обертання мундштука в діапазоні 2,5÷25 об/хв.;

- прилад, який задає швидкість обертання мундштука.

3. Розробити засоби захисту силових кіл та кіл управління.

4. Перевірити модернізовану систему на якість та стійкість.

2. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Аналіз технологічного процесу та вибір типу електродвигуна

Виходячи з вимог технології процесу витяжки склодроту нам необхідно забезпечити можливість регулювати швидкість обертання мундштука формуючої машини в діапазоні 2,5÷25 об/хв.

Тому, в першу чергу, потрібно вибрати тип електродвигуна, який міг би забезпечити за своїми конструктивними можливостями роботу в заданому температурному діапазоні та діапазоні регулювання швидкості, а також обумовити доцільність його застосування.

Згідно [3] двигун постійного струму допускається застосовувати тільки в тих випадках, коли двигун змінного струму не забезпечує вимог характеристик механізму або економічно недоцільний.

З точки зору простоти, економічності та надійності в експлуатації найбільш оптимальним є застосування асинхронних двигунів. Існує декілька способів регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів, також кожний з них має свої недоліки, основними з яких є:

1) вузький діапазон регулювання кутової швидкості;

2) складність плавного регулювання;

3) різке зниження ККД двигуна при регулюванні.

З усіх можливих способів широкий діапазон при плавній зміні кутової швидкості (до 10:1) забезпечує тільки частотний спосіб [3]. Але він характеризується рядом суттєвих недоліків, перш за все – велика вартість обладнання.

Таким чином, застосування двигуна постійного струму в даній роботі є більш актуальним, ніж двигун змінного струму. Найбільш оптимальним для даного режиму роботи є двигун постійного струму з незалежним збудженням, так як двигун цього типу має жорстку механічну характеристику і тому застосовується в установках, де необхідно мати незмінну швидкість; також такі

двигуни знаходять своє призначення в системах з широким діапазоном регулювання швидкості.

2.2 Аналіз типових схем управління двигуном постійного струму та вибір схеми управління

Рівняння кутової швидкості згідно [3] має вигляд:

$$\omega = \frac{(U - I_a R_a)}{c\Phi}, \tag{2.1}$$

де U – підведена до двигуна напруга, В;

I_a – струм якоря А;

R_a – опір кола якоря;

Φ – магнітний потік двигуна, Вб.

Згідно з (2.1) швидкість двигуна можливо регулювати трьома способами:

- зміною опору в ланцюзі якорю;
- зміною струму збудження;
- зміною поданої напруги.

Розглянемо ці способи регулювання.

1) Регулювання швидкості зміною опору в ланцюзі якоря. При даному способі регулювання виникають значні втрати в регульованому реостаті, що визиває зниження ККД. При цьому його величина пропорційна швидкості. Чим менша швидкість, тим нижчий ККД. Тому спосіб регулювання, який розглядається, є економічно недоцільним для досягнення мети даної роботи.

2) Регулювання швидкості зміною магнітного потоку. Регулювання забезпечується зміною струму збудження. Даний спосіб є одним з найбільш простих способів регулювання швидкості двигуна постійного струму, тому знаходить широке застосування. Але межі регулювання частоти обертання є (1,5-2,5):1 для двигуна звичайного виконання та до 8:1 для спеціально

спроектованих машин, внаслідок чого цей спосіб регулювання також не може бути використаний в даній роботі.

3) Регулювання швидкості зміною поданої напруги. Реалізація цього способу реальна, але двигун отримує живлення від окремого джерела. Розглянемо найбільш характерні різновиди даного способу регулювання:

– в якості джерела використовується генератор постійного струму незалежного збудження. Граничний діапазон регулювання D_{max}, згідно [3], складає у відносних одиницях 7-15. В загальному випадку до недоліків системи «генератор-двигун» можна віднести велику масу та габарити, високу вартість установки, порівняно низький ККД (0,6…0,7);

– в якості джерела живлення використовується напівпровідниковий перетворювач, який перетворює змінну напругу в регульовану випрямлену. В порівнянні з системою «генератор-двигун» такі установки мають меншу вагу та більший ККД. Вони забезпечують широкий діапазон регулювання швидкості та високу швидкодію;

– схеми з широтно-імпульсною модуляцією напруги живлення обмотки якоря ДПС дозволяють отримати більш високу якість регулювання у порівнянні з вищевказаними типовими схемами. Результати дослідження електроприводів, згідно [5] показують, що в рамках діапазону потужності (0,1÷3 кВт) широтно-імпульсні перетворювачі (ШІП) мають ряд переваг у порівнянні з тиристорними перетворювачами: принципово більш високі динамічні показники; найкраще використання двигуна при одночасному зберіганні динамічних показників; більш широка смуга пропускань; підвищена лінійність характеристик управління.

Приведені вище переваги ШІП обумовлюють його застосування до електроприводу з високою точністю регулювання. Наявні недоліки відносяться, у більшій степені, до електроприводу потужністю більше 3 кВт; зокрема деякі зміни електроенергії від пульсації робочого струму, а також складність відводу

енергії при гальмуванні електроприводу, який живиться від мережі змінного струму через випрямляч (останнє майже не відноситься до даного електроприводу у зв'язку відсутністю режиму гальмування). Таким чином, є всі підстави використовувати метод широтно-імпульсного управління в електроприводах малої потужності та високими вимогами до швидкодії та точності регулювання, таким і є електропривод формуючої машини.

Частота комутації широто-імпульсних модуляторів, які використовуються в наш час, складає 1,5-3 кГц. В даній роботі частота комутації напруги прийнята рівною3 кГц.

При імпульсному живленні середнє значення напруги на якорі, яке визначає швидкість двигуна, згідно [1], дорівнює:

$$U_{ср} = \frac{1}{T_ц}\int_0^{t_і} U dt = \gamma U \ , \qquad (2.2)$$

де $\gamma = \frac{t_і}{T_ц}$ - коефіцієнт заповнення імпульсів, в.о.;

$T_ц$, $t_і$ - тривалість циклу та імпульсу, с.

Постійна по амплітуді та напрямку напруга періодично подається на якір у вигляді окремих імпульсів (рис. 2.1).

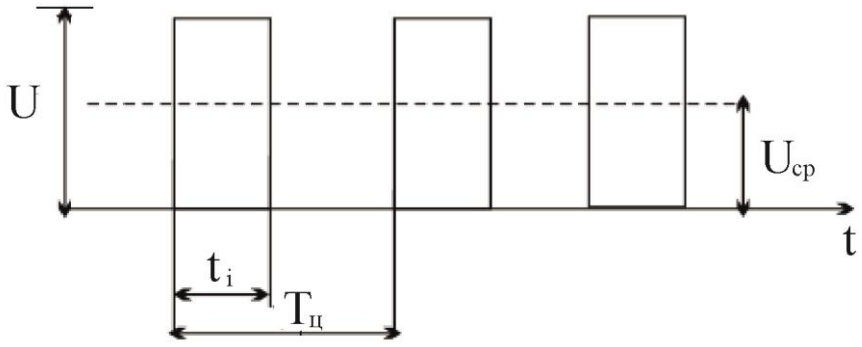


Рисунок 2.1 - Імпульси напруги, які подаються на якір двигуна.

Змінюючи значення γ, можна регулювати $U_{ср}$, а з цього випливає, що й швидкість подачі імпульсів напруги здійснюється за допомогою транзисторного або тиристорного імпульсного переривання. Спрощена схема

двигуна з широтно-імпульсним регулюванням приведена на рис. 2.2. При роботі двигуна з імпульсним живленням у встановленому режимі струм якоря I_a буде мати наступний характер (рис 2.3). Пульсуючий струм якоря можна розділити на дві складові: постійну (середню) та змінну з амплітудою.

$$I_{a\,ср} = \frac{I_{a\,max} + I_{a\,min}}{2}, \tag{2.3}$$

$$I_{a\sim} = \frac{I_{a\,max} - I_{a\,min}}{2}. \tag{2.4}$$

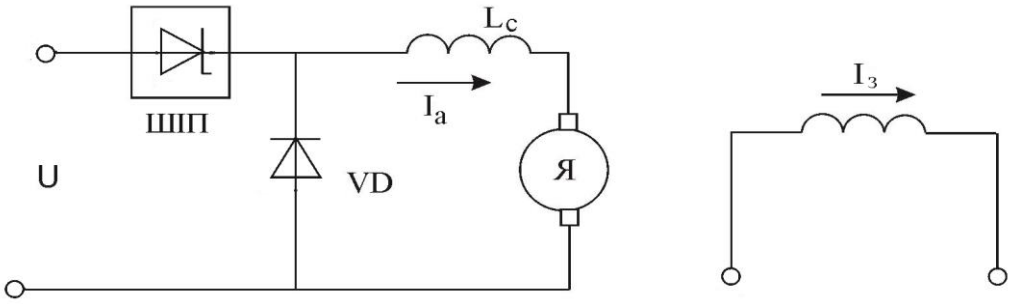


Рисунок 2.2 – Спрощена схема імпульсного регулювання швидкості.
ШІП - широтно-імпульсний перетворювач.

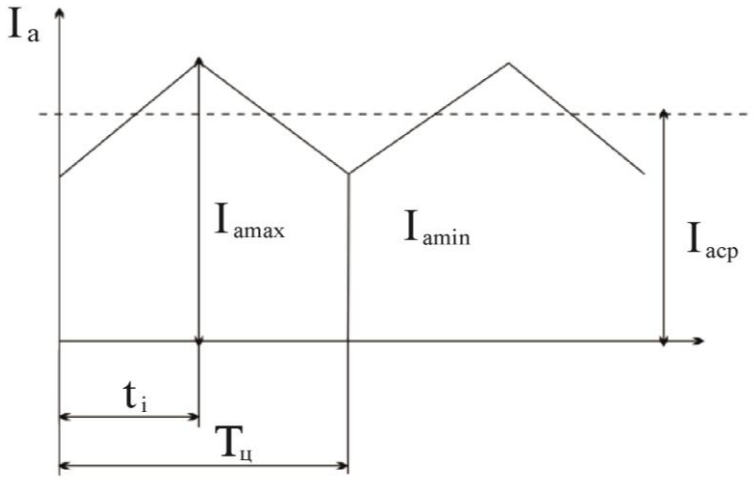


Рисунок 2.3 - Форма кривої струму при імпульсному регулюванні швидкості

Обертальний момент двигуна створюється постійною складовою струму $I_{a\,ср}$. Змінна складова струму є небезпечною, вона збільшує витрати та нагрівання двигуна, а також знижується швидкість комутації.

Для зниження змінної складової струму послідовно з якорем увімкнена згладжуюча котушка індуктивності L_c.

Вид швидкісної характеристики двигуна постійного струму при імпульсному регулюванні швидкості представлений на рис. 2.4. Тут помітний більш крутий стрибок характеристик, що обумовлено появою перериваючих струмів в ланцюзі якоря при малих моментах та струмах якоря, які викликані імпульсним характером напруги. Для звуження зони перервних струмів слід збільшити частоту комутації ключового елемента, таким чином скоротити час циклу $T_ц$.

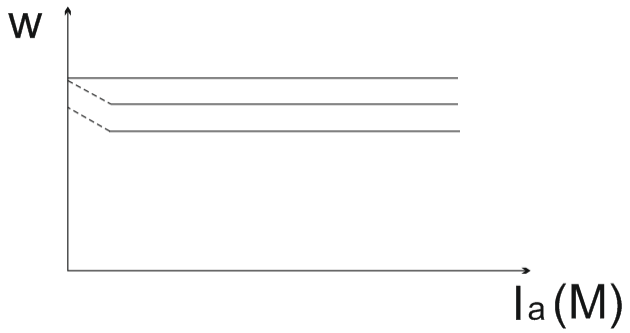


Рисунок 2.4 - Швидкісні характеристики двигуна при імпульсному живленні

Згідно технологічних вимог, які відносяться до електроприводу формуючої машини, необхідно підтримувати постійну частоту обертання мундштука, а також валу приводного електродвигуна. Тому в системі автоматичного управління електроприводом формуючої машини повинен бути зворотній зв’язок по швидкості та регулятор.

Додатній зворотній зв’язок дозволяє розширити межі регулювання швидкості та забезпечити високу швидкодію системи управління. Але збільшення $К_{зз}$, (коефіцієнта зворотного зв’язку) обмежено динамічною стійкістю системи та чутливістю до неполадок.

В типових схемах регулювання частоти обертання вихідного валу електродвигуна постійного струму окрім контуру регулювання швидкості

вводиться ще контур регулювання струму якоря для запобігання перенавантаження двигуна по струму при його пуску.

В системі автоматичного управління електроприводом формуючої машини, яка буде розроблена в даній роботі, немає необхідності вводити контур регулювання струму якоря двигуна, так як двигун працює з постійним навантаженням, без пусків та гальмувань. Крім того, згідно до вимог управління електроприводом формуючої машини, немає необхідності в системі передбачувати можливість реверсування приводного двигуна.

Так як в даній роботі в якості пристрою, регулюючого подачу живлення на якір двигуна, використовується ключовий безконтактний елемент, то ми маємо можливість реалізувати потрібний закон регулювання без використання силової комутуючої апаратури.

Спрощена схема системи управління електроприводом формуючої машини представлена на рис. 2.5

Рисунок 2.5 – Спрощена схема системи управління електродвигуном формуючої машини: РШ - регулятор швидкості; ШІМ - широтно-імпульсний модулятор; КЕ - ключовий елемент; М - двигун; ДШ - датчик швидкості; ЗС – задатчик сигналу, ЗЗ – зворотній зв'язок

2.3 Розробка функціональної схеми електроприводу формуючої машини

В даній роботі поставлена задача розробки системи автоматизації електроприводу постійного струму з широтно-імпульсним регулюванням та стабілізацією швидкості обертання вала виконавчого механізму. В якості приводного двигуна використовується ДПС з незалежним збудженням. Обмотка збудження електродвигуна живиться від стабілізованого джерела

живлення, яке підтримує на ній постійну напругу, рівну номінальному значенню. Обмотка якоря електродвигуна отримує живлення від трифазного некерованого випрямляча через ключовий елемент.

Датчик зворотного зв’язку побудований на базі оптопари світлодіод-фотодіод та виробляє імпульси, частота слідування яких пропорційна швидкості обертання електродвигуна.

В даній бакалаврській роботі в якості системи управління електроприводом використовуємо цифрову систему стабілізації та регулювання швидкості. Застосування цифрової системи управління в проектованому електроприводі обумовлене, перш за все, підвищеними вимогами до точності регулювання вихідних координат. За технологічними вимогами похибка при регулюванні швидкості обертання вала мундштука не повинна перевищувати 0,4%. Системи, які використовуються в наш час, мають, як правило, точність не більше 0,5-1%. Такий низький рівень точності обумовлюється неспроможністю аналогових пристроїв та датчиків зворотного зв’язку виміряти малі величини координат та здійснити точне порівняння сигналів зворотного зв’язку з заданим значенням. При цьому внутрішні похибки аналогових пристроїв є співмірними з сигналами управління. Застосування цифрових систем управління (ЦСУ) забезпечує регулювання координат з точність 0,01% та вище. Крім цього, спрощується реалізація режимів індикації та завдань вихідних параметрів. З економічної точки зору, доцільність використання ЦСУ обумовлена невисокою вартістю компонентів цифрової техніки та тенденцією до подальшого її зниження. До вищевказаного необхідно додати, що в наш час існує ряд уніфікованих серій цифрових інтегральних мікросхем, застосування яких в окремо взятій серії практично не потребують використання допоміжних елементів та налаштування параметрів. Це, в свою чергу, спрощує розробку та налаштування систем управління.

Спроектована в даній роботі ЦСУ електроприводом формуючої машини складається з наступних компонентів: пускового пристрою (ПП), блока формування кодових сигналів (БФКС), широтно-імпульсного модулятора (ШІМ), цифрового регулятора (ЦР), блока індикації (БІ) та блока живлення системи управління (рис. 2.6). Всі компоненти, які входять в склад ЦСУ, взаємозв'язані між собою таким чином, щоб забезпечити оптимальну якість регулювання.

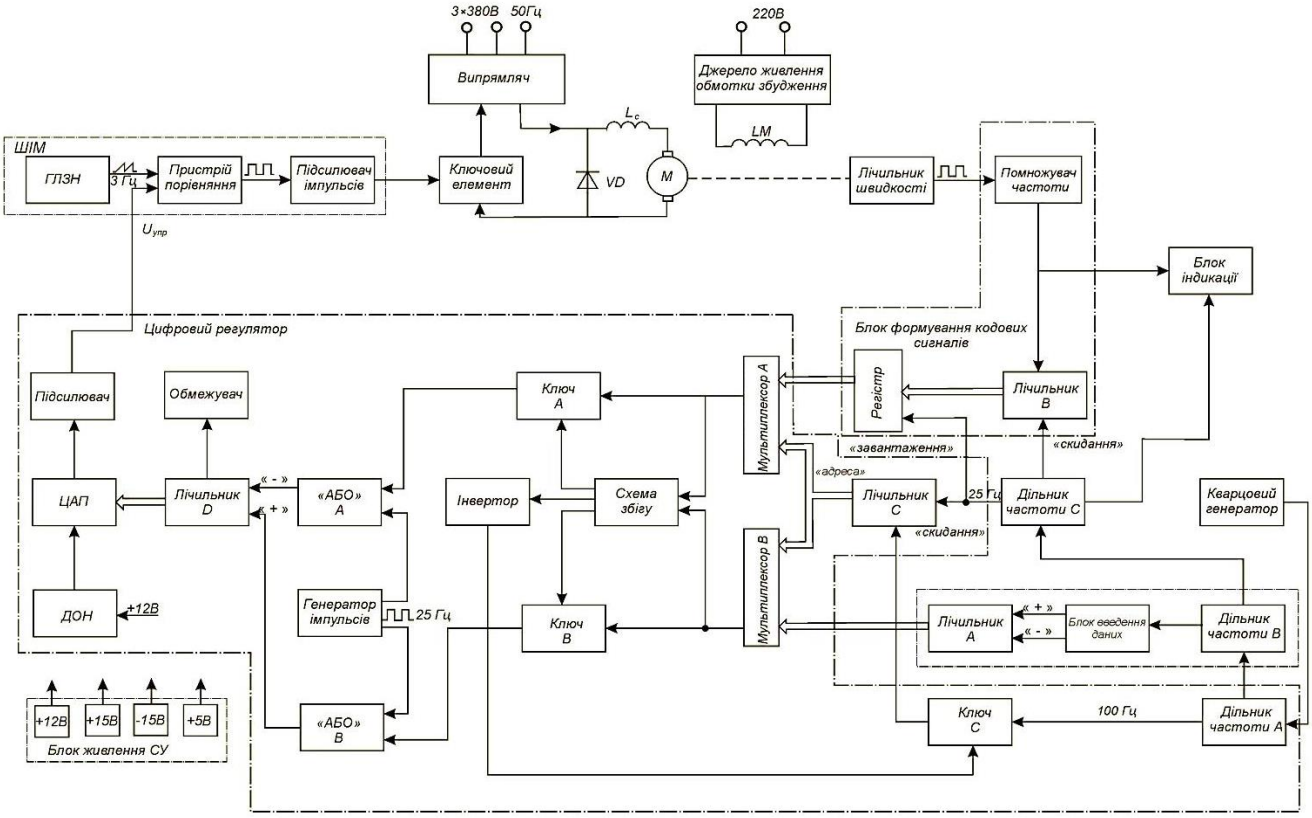


Рисунок 2.6 – Схема електрична функціональна ЕП формуючої машини

Розглянемо більш детально структуру та функції кожного з цих компонентів.

1. Пусковий пристрій (ПП) – призначений для формування сигналу завдання швидкості обертання мундштука в двійковому коді. Включає в себе наступні елементи: дільник частоти, блок набору даних, лічильник імпульсів. Функціонує пристрій наступним чином: дільник частоті виконує перетворення

вхідного сигналу частоти 100 Гц у вхідний сигнал частоти 50 Гц. Блок вводу даних представляє собою два ключі (дві кнопки управління, розміщених на панелі управління), які виконують подачу тактових імпульсів з дільника частот або на вхід прямого лічіння, або на вхід лічіння реверсивного двійкового лічильника А, відповідно зменшуючи або збільшуючи значення коду на його виході.

2. Блок формування кодових сигналів (БФКС) – виконує функцію пропорційного перетворення вихідних імпульсів датчику швидкості (ДШ) в двійковий код, а також формує на вході кодовий сигнал, пропорційний швидкості обертання мундштука, в дискретний момент часу. У склад БФКС входять: помножувач частоти, лічильник імпульсів В та регістр. Помножувач частоти виконує збільшення частоти сигналу, який поступає з датчику швидкості.

Дана операція необхідна для досягнення заданих параметрів точності регулювання. С помножувача частоти сигнал надходить на тактовий вхід нереверсивного двійкового лічильника В, збільшуючи значення цифрового коду на його виході. Число в двійковому коді подається з виходу лічильника В на паралельні входи регістру зсуву, працюючого в режимі паралельного завантаження. В дискретній момент часу відбувається одночасна подача сигналів «скидання» на лічильник В та «завантаження» на регістр. Таким чином, на вході регістру протягом деякого часу тактовими управляючими імпульсами є число в двійковому коді, яке характеризує значення швидкості обертання мундштука. Частота реєстрації - 25 Гц.

3. Широтно-імпульсний модулятор (ШІМ) – виконує порівняння сигналу опорної частоти з керуючим сигналом цифрового регулятора швидкості та модулює на вході імпульс з постійним періодом слідування, але змінної ширини. Включає в себе наступні елементи: генератор лінійно-змінної напруги (ГЛЗН), прилад порівняння, підсилювач імпульсів. Генератор лінійно-змінної

напруги виробляє імпульси пилкоподібної форми з частотою 3 кГц. На вхід приладу поступають два сигнали: опірна напруга $U_{\text{оп}}$, яку формує ГЛЗН, і постійна, регульована напруга управління $U_{\text{упр}}$ з цифрового регулятора. Значення вихідного сигналу приладу порівняння залежить від різниці амплітуд опорної та управляючої напруги. В тому випадку, коли $U_{\text{оп}} - U_{\text{упр}} > 0$ – на виході сигнал високого рівня. Далі сигнал з приладу порівняння надходить на підсилювач імпульсів (ПІ), де виконується його підсилення за потужністю. Таким чином, ШІМ модулює прямокутні імпульси опорної частоти, довжина яких залежить від величини управляючої напруги.

4. Цифровий регулятор – виконує наступні функції:

1) формування сигналу управління потрібної амплітуди для досягнення заданої швидкості обертання;

2) порівняння цифрових сигналів, які надходять з ПП та БФКС в дискретний момент часу та корекцію $U_{\text{упр}}$ в залежності від відношення цих сигналів. Цифровий регулятор включає в себе два основних блоки приладу порівнянь кодів та електронний регулятор рівня сигналу управління. У склад приладу порівняння кодів входять два мультиплексора – селектора, схема співпадіння, дільник частоти А, лічильник імпульсів С, інвертор та три цифрових ключі. Мультиплексор-селектор здійснює підключення одного з інформаційних входів до виходу залежно від кодової комбінації на адресних входах. Схема співпадіння реалізована на основі логічного елемента «виключне АБО» та формує логічний сигнал «О» на виході при збігу сигналу на входах. Дільник частоти А перетворює вхідний сигнал в тактові імпульси частотою 100 кГц. Лічильник С – двійковій нереверсивній, високошвидкісний.

Електронний регулятор рівня сигналу управління включає наступні елементи: генератор імпульсів, лічильник D, два логічних елементи «АБО», цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), джерело опірної напруги (ДОН), підсилювач та обмежувач. Генератор імпульсів формує імпульси з частотою

слідування 25 Гц. Лічильник B – двійковій реверсивний; призначений для створення цифрового сигналу управління. Обмежувач виконує функцію вимкнення лічіння в прямому напрямку при досягненні верхньої межі, та в зворотному напрямку при досягненні нижньої межі лічильника. ДОН виробляє стабілізовану напругу, необхідну для якісного функціонування ЦАП. Нижче приводиться короткий опис роботи цифрового регулятора.

На інформаційних входах мультиплексора B постійно діє кодова комбінація сигналу, що задається. При проході імпульсу з дільника частоти C виходить обнуление лічильника C та подача нового значення цифрового сигналу зворотного зв'язку по швидкості на інформаційні входи мультиплексора A. При цьому відкривається ключ C та на лічильник C починають поступати імпульси з дільника частоти A, що призводить до зміни кодової комбінації на адресних входах мультиплексора. По мірі зміни цифрового сигналу на адресних входах на вході кожного з мультиплексорів синхронно та послідовно з'являються значення розрядів (починаючи зі старшого), що відповідають двійковим числам на цих входах. З виходів мультиплексорів сигнали поступають на схему співпадіння. При рівності їх значень ключі A та B закриті, а ключ C відкритий та пропускає імпульси на лічильник, який продовжує збільшувати значення двійкового коду, що подається на адресні входи мультиплексорів. Якщо сигнали не збігаються, припиняється рахунок та відкриваються ключі A та B. Таким чином, виникає побітове порівняння двох чисел. В тому випадку, якщо сигнал, що задається, більше сигналу зворотного зв'язку, на виході логічного елементу «АБО» B формується імпульс низького рівня, а на виході логічного елементу «АБО» A – високого рівня. В зв'язку з тим, що виходи прямого та зворотного лічильника D є інверсними, для здійснення рахунку необхідно подавати сигнал низького рівня, який передбачається на виході логічного елементу «АБО» B. Тому відбувається збільшення інформації на лічильнику D. В тому випадку, якщо

сигнал, що задається, менше сигналу зворотного зв’язку, відбувається зменшення інформації лічильника. Цифровий код з паралельних входів лічильника D надходить на входи в ЦАП, перетворюється в аналоговий сигнал (напругу), який підсилюється та подається на ШІМ.

5. Блок індикації (БІ) – використовується для відображення діючого значення швидкості обертання мундштука.

6. Блок живлення системи управління – забезпечує вироблення постійної напруги окремих номіналів для живлення елементів системи управління електроприводом формуючої машини.

2.4 Розрахунок та вибір електродвигуна формуючої машини

2.4.1 Опис кінематики роботи

Приводний електродвигун з’єднаний за допомогою муфти з черв’ячним двоступінчастим блоком. Перша ступінь редукторного блоку має передавальне число і =10; друга ступінь (з геликоїдальним колесом) має передавальне число і =3. З виходу редукторного блоку обертаючий момент безпосередньо передається на вал мундштуку.

2.4.2 Вихідні данні для розрахунку та вибору електродвигуна

Згідно завданню на дану бакалаврську роботу необхідно розробити систему автоматичного управління електроприводом формуючої машини, яка б не змінювала параметри протікання технологічного процесу.

Вихідними даними для розрахунку є технічні характеристики формуючої машини «Danner», що працює на даному підприємстві. Технічні характеристики машини приведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики формуючої машини «Danner»

Найменування параметру	Умовні позначення	Значення
Максимальна швидкість обертання валу мундштука, об/хв	$n_{m\,max}$	25
Мінімальна швидкість обертання валу мундштука, об/хв	$n_{m\,min}$	2,5
Передавальне число першої степені редукторного блоку, в.о.	$i_{\text{чер1}}$	10
Передавальне число другої степені редукторного блоку, в.о.	$i_{\text{чер2}}$	3
Коефіцієнт корисної дії черв'ячної передачі, в.о.	$\eta_{\text{чер}}$	0,65
Коефіцієнт корисної дії передачі з геликоїдальним колесом, в.о.	$\eta_{\text{гел}}$	0,9
Тривалість вмикання, %	ТВ	100
Момент опору на валу мундштука, Н×м	M_{cm}	400

2.4.3 Розрахунок параметрів та вибору електродвигуна формуючої машини

Для знаходження характеристик електродвигуна скористаємося рівнянням енергетичного балансу, запис якого для даної машини має наступний вигляд:

$$M_{\text{дв}}\,\omega_{\text{дв}}\,\eta_{мех} = M_{\text{ст}}\,\omega_{\text{м}}, \qquad (2.5)$$

де $M_{\text{дв}}$ - момент на валу електродвигуна, Н×м;

$M_{\text{ст}}$ - момент опору на валу мундштука, Н×м;

$\omega_{\text{дв}}$ - кутова швидкість обертання валу двигуна, рад/с;

$\omega_{\text{м}}$ - кутова швидкість обертання валу мундштука, рад/с;

$\eta_{мех}$ - коефіцієнт корисної дії механізму, в.о.

Необхідно визначити значення:

1) статичного моменту на валу двигуна, $М_{ст}$;

2) максимальної частоти обертання, $\omega_{дв\,max}$;

3) номінальної потужності двигуна, $Р_{ном}$.

Кутову швидкість обертання валу мундштука знаходимо з відношення

$$\omega_{м} = \frac{\pi n_{м}}{30}; \tag{2.6}$$

Після підстановки числових даних для максимальної швидкості обертання отриманий результат

$$\omega_{м\,max} = \frac{3{,}14\ \times 25}{30} = 2{,}62\ рад/с.$$

Для мінімальної швидкості обертання отриманий результат

$$\omega_{м\,min} = \frac{3{,}14\ \times 2{,}5}{30} = 0{,}262\ рад/с.$$

Використовуючи знайдене відношення для отримання передавального числа $i = \frac{\omega_{дв}}{\omega_{м}}$, знайдемо значення кутової швидкості двигуна

$$\omega_{дв} = \omega_{м} \times i\ ; \tag{2.7}$$

Загальне передавальне число редукторного блоку отримаємо з:

$$i = i_{чер} \times i_{гел}, \tag{2.8}$$

де $i_{чер}$ - передавальне число черв'ячної передачі, в.о;

$i_{гел}$ - передавальне число передачі з геликоїдальним колесом, в.о.

$$i = 10 \times 3 = 30.$$

Тоді максимальна кутова швидкість обертання валу двигуна дорівнює:

$$\omega_{дв\,max} = 2{,}62\ \times 30 = 78{,}6\ рад/с.$$

Відповідно мінімальна кутова швидкість

$$\omega_{\text{дв}\,min} = 0{,}262\ \times 30 = 7{,}86\,рад/с.$$

Для знаходження частоти обертання валу приводного двигуна використано відношення:

$$i = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\text{м}}}; \tag{2.9}$$

Звідси максимальна частота обертання

$$n_{\text{дв}\,max} = 30 \times 25 = 750\,об/с.$$

Аналогічно для мінімальної частоти обертання знаходимо

$$n_{\text{дв}\,min} = 30 \times 2{,}5 = 75\,об/с.$$

Загальний коефіцієнт корисної дії механізму знаходимо з наступного виразу:

$$\eta_{\text{мех}} = \eta_{\text{чер}} \times \eta_{\text{гел}}; \tag{2.10}$$

$$\eta_{\text{мех}} = 0{,}85 \times\ 0{,}9 = 0{,}765.$$

Значення моменту на валу руху знаходимо перетворивши рівняння (3.1)

$$\text{М}_{\text{дв}} = \frac{\text{М}_{\text{ст}}\omega_{\text{м}}}{\omega_{\text{дв}}\eta_{\text{мех}}}; \tag{2.11}$$

$$\text{М}_{\text{дв}} = \frac{400 \times 2{,}62}{0{,}765 \times 78{,}6} = 17{,}43\ \text{Н×м}.$$

Так як електродвигун формуючої машини працює в однаковому режимі при незначному впливі динамічних навантажень, має місце рівняння:

$$\text{М}_{\text{дв}} = \text{М}_{\text{1ст}}, \tag{2.12}$$

де $\text{М}_{\text{1ст}}$ – статичний момент на валу двигуна, Н×м

$$\text{М}_{\text{1ст}} = 17{,}43\ \text{Нм}.$$

Таким чином визначальними при виборі електродвигуна є статичні навантаження.

Для визначення потужності двигуна скористаємося відомим рівнянням:

$$\text{Р}_{\text{ном}} = K_{\text{з}} M_{\text{1ст}} \omega_{\text{дв}\,max}\ \times 10^{-3}, \tag{2.13}$$

де $K_{\text{з}}$ =1,1÷1,5 – коефіцієнт запасу, який враховує вплив динамічних навантажень; приймаємо $K_{\text{з}}$ =1,15.

Значення потужності приводного двигуна буде рівне:

$$P_{ном} = 1{,}15 \times 17{,}43 \times 78{,}6 \times 10^{-3} = 1{,}575\ кВт.$$

Згідно технічним вимогам тривалість включення приводного електродвигуна формуючої машини складає ТВ=100%, при цьому перерахунок потужності на стандартну тривалість включення не здійснюється.

За отриманими даними розрахункової потужності приводного електродвигуна Р=1,575 кВт та максимальної частоти обертання його валу $n_{дв\,max}$= 750 об/с при виконанні вимоги $M_{1ст}<M_{дв\,ном}$ вибраємо двигун постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН з наступними технічними даними (табл.2.2).

Таблиця 2.2 – Технічні дані двигуна постійного струму типу 2ПН

Найменування параметру	Умовні позначення	Значення
Номінальна потужність, кВт	$P_н$	1,6
Номінальний струм в обмотці якоря, А	$I_н$	10,6
Номінальна частота обертання, об/с	$n_н$	750
Номінальна напруга живлення, В	$U_н$	220
Момент інерції, кг× $м^2$	J	0,038
Номінальний момент, Нм	$M_н$	52
Опір обмотки якоря, Ом	$R_я$	1,88
Опір обмотки додаткових полюсів, Ом	$R_д$	1,39
Опір обмотки збудження, Ом	$R_{оз}$	134
Номінальна напруга обмотки збудження, В	$U_{оз}$	220
Індуктивність ланцюга якорю, мГн	$L_я$	38,6

Двигуни типу 2ПН мають відцентровий реверсивний вентилятор, насаджений на вал якорю зі сторони, протилежної колектору.

Режим роботи ДПС - тривалий (S1). Перевищення температури обмоток при сталому тепловому стані відповідає класу ізоляції В (130°С).

Допустимі короткочасні перевантаження по струму при номінальному потоці збудження: 2 $I_{ном}$ - протягом 60 с, 3 $I_{ном}$ - протягом 10 с.

Частота обертання регулюється зміною напруги на якорі (в сторону зменшення) та ослаблення потоку збудження (в сторону збільшення).

Умови експлуатації: температура оточуючого середовища 5÷40°С.

2.5 Висновки по розділу

1) В даній роботі в якості електроприводу формуючої машини запропонований електропривод постійного струму з широтно-імпульсним управлінням, який дозволяє забезпечити потрібний діапазон частоти обертання.

2) Для управління електроприводом запропонована цифрова система регулювання та стабілізації швидкості обертання мундштука, яка повинна забезпечити високу точність та необхідний рівень автоматизації.

3) Електропривод формуючої машини є установкою невеликої потужності.

4) Потужність вибраного двигуна незначно відрізняється від потужності двигуна італійського виробництва, що використано в базовому варіанті:

$$P_{італ}=1,5 \text{ кВт},$$

$$P_{обр}=1,6 \text{ кВт}.$$

3. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

3.1 Розрахунок точності функціонування цифрової системи управління

Для оцінки цифрової системи управління (ЦСУ) з точки зору точності її функціонування необхідно виділити ряд факторів, які безпосередньо визначають величину похибки при регулюванні. Для даної ЦСУ такими є:

1) параметри датчику швидкості;

2) розрядність лічильника, що формує сигнал зворотного зв'язку (рис. 2.6, лічильник В);

3) розрядність ЦАП.

Проведемо дослідження кожного з вищевикладених факторів.

Точність виміру цифрового лічильника швидкості, згідно [18], знаходиться зі співвідношення:

$$\delta = \frac{1}{N}, \tag{3.1}$$

де N – кількість імпульсів в заданий період часу, яка характеризує середнє значення швидкості.

В даній роботі було прийнято значення точності регулювання швидкості $\delta = 0{,}4\%$ або $\delta = 0{,}004$ в. о.

Необхідне число імпульсів, які надходять на лічильник в заданий період часу, рівне:

$$N_{\text{необ}} = \frac{1}{0{,}004} = 250 \text{ імпульсів;}$$

Величина N визначається наступним виразом:

$$\text{N} = \frac{N_{\text{д}.i} T.n}{60}, \tag{3.2}$$

де $N_{\text{д}.i}$ - число імпульсів лічильника за один оборот валу двигуна, імп/об;

T - період заміру, с;

n - частота обертання двигуна, об/хв.

При аналізі формул (3.1) та (3.2) очевидно, що точність виміру лічильника швидкості вища, коли більше значення параметрів $N_{д.i}$ та T.

На основі прикладу конструкції реально використаних імпульсних датчиків частоти обертання [10], отримуємо $N_{д.i}$=625 імп/об, T =0,04 с. Таким чином, частота реєстрації швидкості визначається виходячи з виразу:

$$f = \frac{1}{T}\ ; \tag{3.3}$$

$$f = \frac{1}{0{,}04} = 25 \text{ Гц.}$$

Максимальна похибка лічильника відповідає мінімальній частоті обертання двигуна; що було визначено раніше, отже n= $n_{\text{дв } min}$= 75 об/ хв. Після підстановки чисельних даних в формулу (4.2) знаходимо:

$$N = \frac{625 \times 0{,}04 \times 75}{60} = 31{,}25 \text{ імп.}$$

Так як $N_{\text{необ}} > N$, необхідно збільшити значення останнього. Ця задача вирішена за допомогою помножувача частоти імпульсів. Кратність множення розрахована з співвідношення:

$$\text{К} = \frac{N_{\text{необ}}}{N}; \tag{3.4}$$

$$\text{К} = \frac{250}{31{,}25} = 8.$$

Похибка при роботі пристрою порівняння кодів даної роботи визначається за формулою:

$$\delta = \frac{1}{N_{min}}, \tag{3.5}$$

де N_{min} – мінімальне значення числа, що поступає на інформаційні входи мультиплексора.

$$N_{min} = \frac{1}{0.004} = 250.$$

Так як величина N_{min} відповідає мінімальній швидкості обертання двигуна, а діапазон регулювання, згідно пункту 2.2. дорівнює D=10:1.

$$N_{max}=D\times N_{min}\ ; \tag{3.6}$$

$$N_{max}=10\times 250=2500.$$

В двійковому коді це число має вигляд:

$$N_{max2}=100111000100.$$

Кількість розрядів даного числа n =12, тому розрядність лічильника B та всіх наступних в ланцюзі цифрового сигналу пристрою (регістру, мультиплексорів, лічильника A) повинна бути не менша.

Похибка ЦАП визначається виразом:

$$\delta=\frac{1}{2^n}, \tag{3.7}$$

де n – кількість розрядів ЦАП, а $\delta = 0{,}004$.

Таким чином, можна визначити, що мінімальне число розрядів цифро-аналогового перетворювача, відповідно і лічильника D згідно вимогам точності регулювання n_{min}= 8.

Розроблена принципова схема автоматичного керування електроприводом формуючої машини приведена в додатку.

3.2 Розроблення датчика швидкості

В даній бакалаврській роботі в якості датчику зворотного зв’язку по швидкості запропонований датчик, конструкція якого зображена на рис 3.1.

Датчик 1 встановлений на вісі 2 електродвигуна та має рівномірно розташовані на колі з кроком F отвори або прорізи. При обертанні диск модулює світловий потік освітлювача 3, який сприймається фотоприймачем 4 (як правило, фотодіодом).

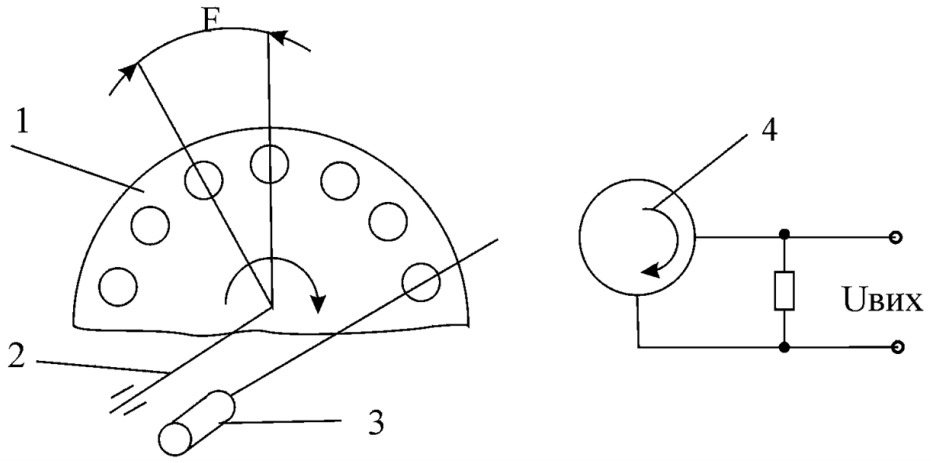


Рисунок 3.1 - Загальний вигляд фотоелектричного датчика швидкості

З виходу фотоприймача при цьому знімається вихідний сигнал, частота якого:

$$f = \frac{\text{п}N}{60}, \tag{3.8}$$

де N - число реперних точок (прорізів) в диску;

n - частота обертання валу електродвигуна, об/хв.

Фотоелектричні датчики швидкості мають ряд переваг перед датчиками швидкості інших типів. По-перше, амплітуда вихідного сигналу датчика не залежить від частоти обертання диску, що дозволяє вимірювати низьку швидкість (1-5 об/хв). По-друге, висока чутливість фотоприймача дозволяє забезпечити працездатність датчика при малій ширині світлового штриху, що дозволяє нарізати на диску 100 та більше штрихів, тобто отримувати 1000 та більше імпульсів на оберт, в той час як інші датчики швидкості забезпечують, як правило, 150-240 імпульсів на оберт. Окрім того, похибка монтажу диску в декілька десятих частин міліметру не впливає на амплітуду сигналу та інших характеристик датчика, в той час, як у інших типів датчика ця похибка не повинна перевищувати соту частину міліметру.

Важливе значення при оцінці переваг фотоелектричних датчиків швидкості перед іншими типами датчиків є й те, що за рахунок збільшення частоти вихідного сигналу похибки можуть бути знижені більш простим методом, ніж в системах з традиційним тахометром.

Слід також відзначити, що щільовий диск значно технологічний, чим наприклад, модулятор індукційного датчика або ротор тахогенератора. Інша точність виконання реперних точок при цьому непотрібна. До переваг фотоелектричних датчиків також відносяться й їх нечутливість до зовнішніх магнітних та електричних полів, що є серйозним аргументом в їх застосуванні в електроприводі, що проектується, враховуючи вірогідність впливу цих факторів на працездатність останнього.

Недоліки фотоелектричних датчиків швидкості обумовлені в основному двома факторами. По-перше, це висока чутливість фотоприймачів до різного роду подразнення – пил, волога, сторонні джерела випромінювання і т.д. По-друге, фотодатчики чутливі до вібрацій, температури, мають обмежений строк дії. В сучасних схемах в якості освітлювачів використовуються світлопроменеві діоди, які мають велику довготривалу стійкість до вібрацій. Що стосується чутливості фотоелектричних датчиків до різного роду подразників, то при дотриманні технічних умов експлуатації обладнання та постійному контролі за фізичними параметрами навколишнього середовища (це також відноситься до питання охорони праці) вплив таких факторів як запиленість, вологість та температура повітря можливо підтримувати на допустимому рівні.

Таким чином, є всі підстави для застосування фотоелектричного датчика в якості датчика зворотного зв’язку по швидкості в електроприводі, що проектується.

Принципова схема даного пристрою зображена на рис. 3.2.

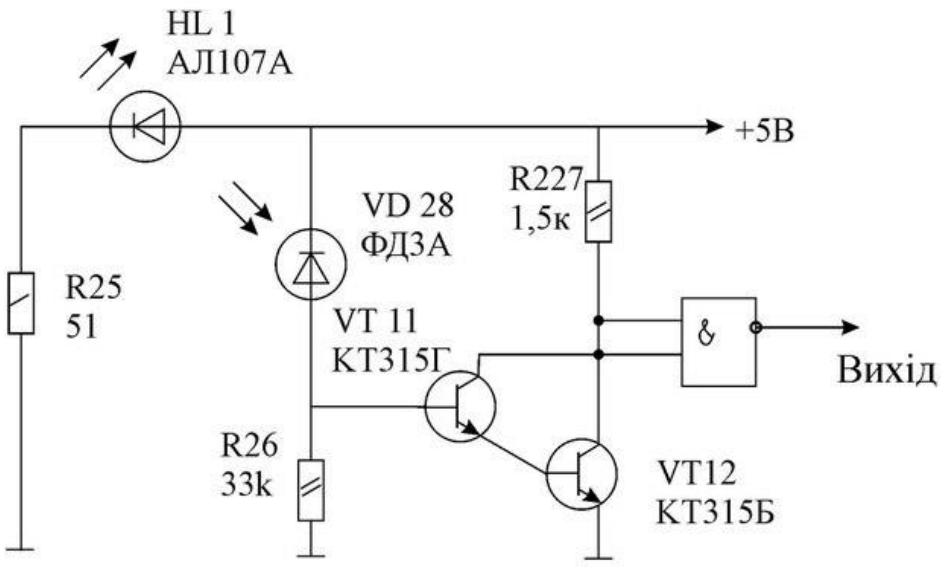


Рисунок 3.2 – Схема електрична принципова фотоелектричного лічильника швидкості

Технічні дані оптоелектронного елементу HL1 приведені нижче.

Таблиця 3.1 – Основні параметри світлодіоду АЛ107А

Найменування параметру	Умовні позначення	Значення
Максимальна пряма напруга, В	$U_{\text{пр}\,max}$	1,8
Максимальний прямий постійний струм, мА	$I_{\text{пр}\,max}$	100
Діаметр фоточутливого елементу, мм	d_e	2,45
Діапазон спектральної характеристики, мкм	$\Delta\lambda$	0,4…1,8
Робоча напруга, А	$U_{\text{р}}$	10

Максимальна частота вихідного сигналу визначається у відповідності з формулою (3.8), де n=750 об/хв., N=625. Після підстановки чисельних даних отримуємо результат:

$$f_{max}=\frac{750\times625}{60}=7812{,}5 \text{ Гц.}$$

3.3 Розрахунок та дослідження системи автоматичного керування

При побудові системи автоматичного керування (САК) використаємо принцип підпорядкованого регулювання [17]. Для даної роботи система є стандартною і містить в собі два контури: струму та швидкості. Вихідний сигнал зовнішнього контуру являється задаючим для зосередженого всередині нього контуру, тобто внутрішній контур регулювання підпорядкований зовнішньому контуру. Для керування кожною із цих координат використовується окремий регулятор, утворюючий з об'єктом керування замкнений контур, шляхом замикання відповідних зворотніх зв'язків. Розрахунок параметрів системи регулювання положення електропривода з підпорядкованими контурами струму та швидкості виконується методом послідовної корекції [17].

3.3.1 Визначення параметрів структурної схеми ДПС

Для отримання передаточної функції ДПС запишемо диференційні рівняння роботи двигуна (для якірного кола та ланцюга збудження) та основне рівняння електропривода:

$$\begin{cases} U_{я} = I_{я}\cdot R_{О} + L_{я}\cdot\dfrac{dI_{я}}{dt} + k\cdot\Phi\cdot\omega \\ U_{З} = I_{З}\cdot R_{З} + L_{З}\cdot\dfrac{dI_{З}}{dt} \\ M = k\cdot\Phi\cdot I_{я} \\ M - M_{С} = J\dfrac{d\omega}{dt} \end{cases}, \qquad (3.9)$$

де I_A, $I_З$ – струм відповідно в ланцюзі якоря та збудження, А;

$R_О$, $R_З$ – відповідно сумарний опір в колі якоря та в ланцюзі збудження, Ом;

L_A, $L_З$ – індуктивність обмотки якоря та збудження, Гн;

M, $M_С$ – моменти на валу двигуна та статичний момент протидії, Н·м;

ω – кутова швидкість ротора, 1/с;

Ф – магнітний потік, Вб;

k – конструктивний коефіцієнт (постійна двигуна).

Будемо розглядати модель ДПС, як частковий випадок, у вигляді лінійної системи не враховуючи нелінійність зумовлену квадратом магнітного потоку, що справедливо при розгляді питань щодо синтезу регуляторів.

Визначаємо параметри якірного ланцюга з врахуванням параметрів тиристорного перетворювача та перетворювального трансформатора.

Розрахунковий активний опір якірного ланцюга двигуна приведений до температури 75^0С складає:

$$R_0 = 1{,}2 \cdot (R_Я + R_{ДП}) + (R_{ТР} + R_a) + R_Щ + R_У, \qquad (3.10)$$

де $R_Я$ – опір обмотки якоря при 15°С, Ом;

$R_{ДП}$ – опір додаткових полюсів при 15°С, Ом;

$R_{ТР}$ – опір обмоток трансформатора, приведений до ланцюга випрямленого струму, Ом;

R_a – опір за рахунок перекриття анодних струмів, Ом;

$R_Щ$ – опір щіткового контуру, Ом;

$R_У$ – опір урівнюючого реактора, Ом.

Для розрахунку якірного кола необхідно визначити слідуючі параметри цього кола.

Розрахункове значення напруги вторинної обмотки трансформатора становить:

$$U_2 = E_2 \cdot k_\alpha \cdot k_{мер} \cdot k_R, \qquad (3.11)$$

де $E_2 = k_e \cdot U_н$ - теоретичне значення ЕРС вторинної обмотки силового трансформатора, В (k_e - відношення напруги силового трансформатора до середнього значення випрямленої напруги. Для трифазної схеми з нульовим виводом приймаємо k_e=0,857);

k_α - коефіцієнт запасу, що враховує неповне відкриття вентилів при максимальному сигналі. Приймаємо $к_\alpha$=1,2;

$k_{мер}$ - коефіцієнт запасу за напругою, який враховує можливе зниження напруги мережі. Приймаємо $к_{мережі}$=1,1;

k_R - коефіцієнт запасу, що враховує падіння напруги у вентилях і обмотках трансформатора, а також наявності кутів комутації. Приймаємо $к_R$=1,05.

Підставивши всі ці значення, маємо номінальну фазову напругу вторинної обмотки трансформатора (при куті регулювання $\alpha = 0$):

$$U_2 = 0{,}857 \cdot 220 \cdot 1{,}2 \cdot 1{,}1 \cdot 1{,}05 = 261{,}32 \text{В}.$$

Напруга вторинної обмотки трансформатора рівна розрахунковому значенню.

Струм вторинної обмотки трансформатора становить:

$$I_2 = k_i \cdot k_2 \cdot I_{ЯН}, \qquad (3.12)$$

де k_i - коефіцієнт прямокутності струму, що враховує відхилення форми струму від прямокутної. Приймаємо $k_i = 1{,}1$;

k_2 - коефіцієнт, рівний відношенню діючого значення лінійного струму вторинної обмотки силового трансформатора до середнього значення випрямленого струму. Приймаємо $k_2 = 0{,}578$;

$I_{ЯН}$ - номінальний струм якоря двигуна, А.

$$I_2 = 1{,}1 \cdot 0{,}578 \cdot 26{,}15 = 16{,}63 \text{ А}.$$

Сумарний опір обмоток трансформатора $R_{ТР}$ і опір, створений за рахунок перекриття анодних струмів (R_a), становить:

$$R_{TP} + R_a = 0{,}06 \cdot \frac{U_2}{I_2} \quad , \tag{3.13}$$

$$R_{TP} + R_a = 0{,}06 \cdot \frac{261{,}32}{16{,}63} = 0{,}94 \text{ Ом}$$

Опір щіткового контакту за умови, що падіння напруги на ньому буде дорівнювати 2 В, визначаємо таким чином:

$$R_{Щ} = \frac{2}{I_{ЯН}} \quad , \tag{3.14}$$

$$R_{Щ} = \frac{2}{26{,}15} = 0{,}076 \text{ Ом} .$$

Сумарний активний опір двигуна і трансформатора:

$$R_{Д} = 1{,}2 \cdot (R_{Я} + R_{ДП}) + (R_{тр} + R_a) + R_{Щ} \quad , \tag{3.15}$$

$$R_{Д} = 1{,}2 \cdot (0{,}516 + 0{,}407) + 0{,}94 + 0{,}076 = 1{,}94 \text{ Ом.}$$

Опір урівнюючого реактора становить:

$$R_{У} \approx (0{,}1...0{,}2) R_{Д} \ , \tag{3.16}$$

$$R_{У} = 0{,}15 \cdot 1{,}94 = 0{,}291 \text{ Ом.}$$

Розрахунковий опір якірного ланцюга двигуна складає:

$$R_0 = 1{,}94 + 0{,}291 = 2{,}231 \text{ Ом} . \tag{3.17}$$

Розрахункова індуктивність якірного ланцюга двигуна становить:

$$L_0 = L_{Я} + L_{ТР} , \tag{3.18}$$

де $L_{ТР}$ - індуктивність трансформаторної обмотки, яка знаходиться за формулою:

$$L_{TP} = \frac{X_{mp}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad . \tag{3.18}$$

Реактивна складова опору трансформаторної обмотки становить

$$X_{TP} = \frac{U_{кз} \cdot U_2}{I_2}, \tag{3.19}$$

де $U_{кз}$ - напруга короткого замикання трансформатора. Приймаємо $U_{кз} = 0{,}095$. Після підстановки даних отримуємо

$$X_{TP} = \frac{0{,}095 \cdot 261{,}32}{16{,}63} = 1{,}49 \text{ Ом.}$$

Індуктивність вторинної обмотки двигуна становить:

$$L_{ТР} = \frac{1{,}49}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 4{,}7 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

Сумарна індуктивність ланцюга якоря рівна:

$$L_0 = L_{тр} + L_{я}, \tag{3.20}$$

де $L_{я}$ – індуктивність обмотки якоря двигуна.

$$L_0 = 0{,}0047 + 0{,}014 = 18{,}7 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Електромагнітна постійна часу якірного кола:

$$T_{Я} = \frac{L_0}{R_0} \quad , \tag{3.21}$$

$$T_{Я} = \frac{18{,}7 \cdot 10^{-3}}{2{,}231} = 8{,}38 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

Електромеханічна стала часу для заданого значення J_{Σ} становить:

$$T_{М} = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_0 \cdot \omega_{Н}^2}{(U_{Н} - I_{ЯН} \cdot R_{Я})^2}, \tag{3.22}$$

де J_{Σ} - сумарний приведений момент інерції ВМ і двигуна, $J_{\Sigma} = J_{ДВ} + J_{МХ}$,

$$J_{\Sigma} = 1{,}2 \cdot 0{,}062 + 0{,}000483 = 0{,}0749 \text{ кг·м}^2, \tag{3.23}$$

$$T_{М} = \frac{0{,}0749 \cdot 2{,}231 \cdot 78{,}54^2}{(220 - 26{,}15 \cdot 0{,}516)^2} = 0{,}024 \text{ с.}$$

Опір обмотки якоря двигуна становить:

$$R_{ЯД} = 1{,}2 \cdot (R_{Я} + R_{ДП}); \tag{3.24}$$

$$R_{ЯД} = 1{,}2 \cdot (0{,}516 + 0{,}407) = 1{,}11 \text{ Ом.}$$

Передавальний коефіцієнт двигуна:

$$k_{Д} = \frac{\omega_{Н}}{E_{Д.Н}} = \frac{\omega_{Н}}{U_{Н} - I_{Я.Н} \cdot R_{Я.Д}}; \tag{3.25}$$

$$k_{Д} = \frac{78{,}54}{220 - 26{,}15 \cdot 1{,}11} = 0{,}41.$$

Передавальний коефіцієнт тахогенератора згідно технічних характеристик:

$$k_{ТГ} = \frac{U_{Н.ТГ}}{\omega_{Н.ТГ}}; \tag{3.26}$$

$$k_{TГ} = \frac{110}{261{,}8} = 0{,}42 .$$

Приймаємо максимальну напругу керування $U_{K.MAX} = 10\,В$.

Для знаходження передавального коефіцієнту широтно-імпульсного перетворювача використаємо його регулювальну характеристику:

$$E_{d0} = \sqrt{2} \cdot U_2 \cdot \frac{m}{\pi} \cdot \sin 60^o , \qquad (3.27)$$

де m – кількість фаз живленої мережі

$$E_{d0} = \sqrt{2} \cdot 261{,}32 \cdot \frac{3}{\pi} \cdot \sin 60^o = 305{,}63 \text{ В} .$$

Для мінімальної швидкості при роботі з номінальним навантаженням величина α становить:

$$\alpha_{\omega \min} = \arccos\left(\frac{\omega_{\min} \cdot C + I_Я \cdot R_0}{E_{d0}} \right), \qquad (3.28)$$

де $\omega_{\min} = \frac{\pi \cdot n_{MIN}}{30} = \frac{3{,}14 \cdot 302{,}4}{30} = 31{,}65$, рад/с – мінімальна кутова швидкість привідного двигуна з розрахунку, що згідно завдання нам необхідно забезпечити мінімальну частоту обертання на рівні 302,4 об/хв;

$C = \frac{1}{k_Д} = \frac{1}{0{,}41} = 2{,}44$, В×с/рад – конструктивний коефіцієнт ДПС. (3.29)

$$\alpha_{\omega \min} = \arccos\left(\frac{31{,}65 \cdot 2{,}44 + 26{,}15 \cdot 2{,}231}{305{,}63} \right) = 69^o 79' .$$

Це відповідає ЕРС широтно-імпульсного перетворювача:

$$E_d = E_{ШІП} = E_{d0} \cdot \cos \alpha_{\omega \min} \qquad (3.30)$$

$$E_d = E_{ШІП} = 305{,}63 \cdot \cos 69^0 79' = 105{,}58$$

Коефіцієнт підсилення перетворювача:

$$k_{ШІП} = \frac{E_{ШІП}}{U_k} , \qquad (3.31)$$

де $U_k = 10$ В – напруга керування згідно технічних вимог.

$$k_{ШІП} = \frac{105{,}58}{10} = 10{,}56 .$$

Аналізуючи роботу широтно-імпульсного перетворювача, врахуємо його інерційність та подамо його аперіодичною ланкою першого порядку з постійною часу рівною 0,007с.

$$W_{ШІП}(p) = \frac{k_{ШІП}}{1 + T_{ШІП} \cdot p}, \qquad (3.32)$$

$$W_{ШІП}(p) = \frac{10{,}56}{1 + 0{,}007 \cdot p} .$$

Напруга від'ємного зворотного зв'язку за струмом подається на датчик струму US якірного кола двигуна.

Передавальний коефіцієнт шунта знаходимо із технічних даних:

$$k_{шунт} = 1{,}5 .$$

Для обмеження величини струму граничним значенням $I_Я$ достатньо обмежити $U_{Р.Ш\ MAX}$ – сигнал на виході регулятора швидкості, тобто задаючий сигнал для контуру струму.

Коли розузгодження на виході регулятора швидкості досягає величини напруги насичення, то на виході регулятора швидкості напруга є постійною. При цьому система підтримує постійний струм якоря двигуна. Обмеження рівня вихідного сигналу регулятора швидкості здійснюється шунтуванням ланцюга зворотного зв'язку регулятора швидкості зустрічно ввімкненими стабілітронами.

При цьому:

$$U_{р.ш\,max} = k_C \cdot I_{СТ} = 10 \text{ В} . \qquad (3.32)$$

Застосовуємо стабілітрони типу Д814Г із напругою пробою $U_{ПР}$=10…12 В.

Передавальний коефіцієнт ланцюга зворотного зв'язку за струмом:

$$k_C = \frac{U_{р.ш\max}}{I_{СТ}}, \qquad (3.33)$$

де $I_{СТ}$ приймаємо рівним 2,35 $I_{Я.Н.}$

$$k_C = \frac{10}{2{,}35 \cdot 26{,}15} = 0{,}163 .$$

Двигун подаємо (при $M_C = 0$) у вигляді двох послідовно з'єднаних ланок із сталими часу $T_Я$ та $T_М$. Якірне коло представимо як аперіодичну ланку першого порядку $\frac{1/R_0}{1+T_Я \cdot p}$, а електромеханічну частину представимо інтегрувальною ланкою $\frac{k_Д \cdot R_0}{T_М \cdot p}$. Тоді передавальна функція двигуна становить:

$$W_{ДВ}(p) = \frac{k_Д \cdot R_0}{T_М \cdot p} \cdot \frac{1/R_0}{1+T_Я \cdot p}, \qquad (3.34)$$

$$W_{ДВ}(p) = \frac{0{,}91}{0{,}024 \cdot p} \cdot \frac{0{,}45}{1+0{,}0084 \cdot p} .$$

3.3.2 Розрахунок параметрів контуру регулювання струму

Оптимізуємо внутрішній контур струму за технічним (модульним) оптимумом. У якості малої сталої часу, що не компенсується, приймаємо постійну часу широтно-імпульсного перетворювача $T_М$=0,007 с.

Внутрішній контур утворений регулятором струму РС, датчиком струму ДС, широтно-імпульсним перетворювачем ШІП і якірним колом, що замикається зворотнім зв'язком по струму з коефіцієнтом передачі $К_С$. У випадку не врахування впливу ЕРС двигуна на роботу контуру, контур струму оптимізується пропорційно-інтегральним регулятором (ПІ – регулятором).

Передавальна функція об'єкту регулювання контуру струму:

$$W_{о.р.с}(p) = \frac{1}{R_0(T_Я p+1)} \cdot \frac{k_{ШІП}}{T_{ШІП} p+1}, \qquad (3.35)$$

$$W_{o.p.c}(p) = \frac{1}{2{,}231 \cdot (0{,}0084p + 1)} \cdot \frac{10{,}56}{0{,}007p + 1}.$$

Стала інтегрування контуру струму може бути визначена з умови налаштування на модульний оптимум таким чином:

$$T_{кс} = aT_M = aT_{ШПТ} = 2T_M = 2 \cdot 0{,}007 = 0{,}014 \text{ с}. \quad (3.36)$$

Передавальна функція розімкненого оптимізованого контуру струму:

$$W_{O.K.C}(p) = \frac{1/k_C}{a \cdot T_\mu p \cdot (T_\mu p + 1)} = \frac{1/k_C}{a \cdot T_{ШПТ} p \cdot (0{,}5 \cdot T_{ШПТ} p + 1)}, \quad (3.37)$$

$$W_{O.K.C}(p) = \frac{6{,}13}{0{,}000049p^2 + 0{,}014p}.$$

Передавальна функція ПІ-регулятора струму:

$$W_{p.c}(p) = \frac{W_{O.K.C}}{W_{o.p.c}} = \frac{R_0 \cdot (T_Я p + 1)}{k_{ШПТ} \cdot k_C \cdot 2 \cdot T_\mu p} = \\ = \frac{R_0 \cdot T_Я}{2 \cdot T_\mu \cdot k_{ШПТ} \cdot k_C} + \frac{R_0}{2 \cdot T_\mu \cdot k_{ШПТ} \cdot k_C p} = k_{p.c} + \frac{1}{T_{p.c} p}, \quad (3.38)$$

де $К_{Р.С}$, $Т_{Р.С}$ – відповідно коефіцієнт підсилення і стала часу регулятора струму.

Визначаємо величини коефіцієнту підсилення і сталої часу регулятора струму:

$$k_{P.C} = \frac{R_0 \cdot T_Я}{2T_\mu \cdot k_{ШПТ} \cdot k_C}, \quad (3.39)$$

$$T_{p.c} = \frac{2T_\mu \cdot k_{ШПТ} \cdot k_C}{R_0}; \quad (3.40)$$

$$k_{Р.С} = \frac{2{,}231 \cdot 0{,}0084}{2 \cdot 0{,}007 \cdot 10{,}56 \cdot 0{,}163} = 0{,}78,$$

$$Т_{Р.С} = \frac{2 \cdot 0{,}007 \cdot 10{,}56 \cdot 0{,}163}{2{,}231} = 0{,}011 \text{ с}.$$

Прийнявши постійну часу зворотного зв'язку рівною $T_{ЗЗС} = T_Я$ і ємність $C_{ЗЗС} = 10^{-6}$Ф, отримуємо значення активного опору в ланцюзі зворотного зв'язку $R_{ЗЗС}$:

$$R_{ЗЗС} = \frac{T_Я}{C_{ЗЗС}} \quad , \tag{3.41}$$

$$R_{ЗЗС} = \frac{0{,}0084}{10^{-6}} = 8400 \text{ Ом} .$$

Аналогічно, прийнявши що $R_{ЗС} = R_{1С}$, маємо:

$$R_{ЗС} = R_{1С} = \frac{T_{рс}}{C_{ЗЗС}}, \tag{3.42}$$

$$R_{ЗС} = R_{1С} = \frac{0{,}011}{10^{-6}} = 11000 \text{ Ом} .$$

Коефіцієнт підсилення датчика струму:

$$k_{ДС} = \frac{k_С}{k_{шунт}}, \tag{3.43}$$

$$k_{ДС} = \frac{0{,}163}{1{,}5} = 0{,}109 .$$

Передавальна функція замкненого оптимізованого контуру струму:

$$W_{ЗКС}(p) = \frac{1/k_С}{2T_\mu p(T_\mu p + 1) + 1}, \tag{3.44}$$

$$W_{ЗКС}(p) = \frac{6{,}13}{98 \cdot 10^{-6} p^2 + 0{,}014 p + 1} .$$

Спростимо знаменник і запишемо спрощену передавальну функцію:

$$W_{ЗКС}(p) = \frac{1/k_С}{2T\mu p + 1} = \frac{1/k_С}{T_{КС} p + 1}, \tag{3.45}$$

$$W_{ЗКС}(p) = \frac{6{,}13}{0{,}014 p + 1} .$$

Передавальна функція ПІ-регулятора матиме наступний вигляд:

$$W_{P.C}(p) = 0{,}18 + \frac{1}{0{,}014p} \quad .$$

Оцінку перехідних процесів системи автоматичного керування проведемо по характеру перехідного процесу. Для дослідження структурної схеми контуру струму використовувалось інтегроване середовище MATLAB з його розширенням Simulink, яке є основою автоматичного складання і розв'язання рівнянь стану динамічних об'єктів і систем [10].

При обчисленні за допомогою Simulink в структурі самої системи використано додаткові пристрої: вимірювачі сигналів, осцилографи, оптимізатори, які необхідні для контролю параметрів схеми та її налагодження на необхідний оптимум. Отримана структурна схема контуру струму зображена на рисунку 3.3.

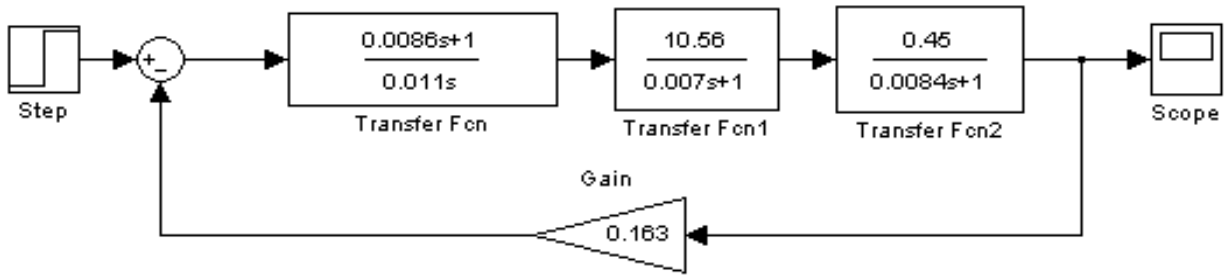


Рисунок 3.3 - Структурна схема контуру струму

Графік перехідного процесу зображений на рис. 3.4.

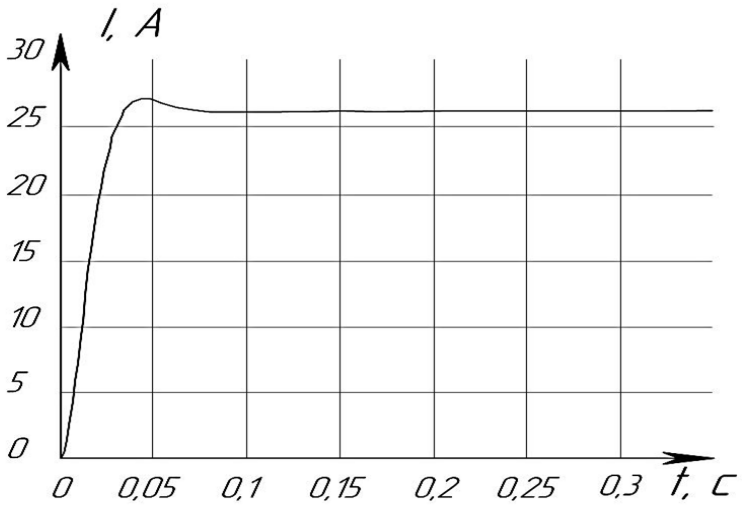


Рисунок 3.4 - Графік перехідного процесу контуру струму

Перехідний процес має лише одне перерегулювання під час пуску. Перерегулювання під час перехідного процесу оцінюється за максимальним відхиленням регульованої координати:

$$\sigma_C = \frac{I_{MAX} - I_{УСТ}}{I_{УСТ}} \cdot 100\%, \qquad (3.46)$$

де I_{MAX} – максимальний стрибок струму;

$I_{УСТ}$ – установлене значення струму.

$$\sigma_C = \frac{27{,}2 - 26{,}2}{26{,}2} \cdot 100\% = 3{,}8\%.$$

Для більшості систем перерегулювання не повинне перевищувати 5...10%. Стосовно перерегулювання по струму, воно не повинно перевищувати 10%. В нашому випадку пере регулювання складає 3,8%. Час регулювання t_p = 0,085 с.

Як видно з вищенаведених результатів даний регулятор відповідає необхідним вимогам.

3.3.3 Розрахунок параметрів контуру регулювання швидкості

В якості регулятора швидкості спочатку було вирішено використати П-регулятор, але проведені попередні розрахунки показали недостатню жорсткість механічної характеристики (статичне падіння швидкості у розрахованій системі керування при номінальному навантаженні складало 27,9 рад/с при номінальній швидкості 78,54 рад/с), тому замість П-регулятора було вирішено використати ПІ-регулятор зі стандартною функціональною схемою контуру регулювання швидкості.

Передавальна функція замкнутого контуру, з урахуванням вищерозрахованих параметрів, визначається так:

$$W_{ЗАМ.С} = \frac{1/K_C}{a \cdot T_\mu \cdot p \cdot (T_\mu p + 1) + 1} = \frac{6{,}13}{0{,}014 \cdot (0{,}007 p + 1) + 1}. \qquad (3.47)$$

Передавальна функція регулятора швидкості має вигляд:

$$W_{Р.Ш} = \kappa_{р.ш} \cdot \frac{1 + T_{р.ш}}{T_{р.ш} p} . \quad (3.48)$$

При стандартному налаштуванні на симетричний оптимум регулятора швидкості маємо значення $T_{р.ш}$ та $к_{р.ш}$:

$$T_{р.ш} = 8 \times T_{\mu} = 8 \times 0{,}007 = 0{,}056 \text{ с}. \quad (3.49)$$

$$\kappa_{р.ш} = \frac{c \cdot \kappa_c \cdot T_M}{4 \cdot T_{\mu} \cdot \kappa_ш \cdot R_Я}, \quad (3.50)$$

де $k_Ш = \frac{U_{ЗШ}}{\omega_Н} = \frac{10}{78{,}54} = 0{,}127$ (приймаємо напругу задавача швидкості 10 В).

$$\kappa_{р.ш} = \frac{2{,}44 \cdot 0{,}163 \cdot 0{,}024}{4 \cdot 0{,}007 \cdot 0{,}127 \cdot 1{,}11} = 2{,}42 .$$

$$W_{Р.Ш} = 2{,}42 \cdot \frac{1 + 0{,}056p}{0{,}056p} = \frac{1 + 0{,}056p}{0{,}023p} .$$

Визначимо параметри регулятора швидкості.

Прийнявши $R_{ЗШ}$ =$20 \cdot 10^3$ Ом, опір у ланцюзі зворотного зв'язку за швидкістю:

$$R_{ОШ} = \frac{k_{ТГ}}{k_Ш} \cdot R_{ЗШ} = \frac{0{,}42}{0{,}127} \cdot 20000 = 66{,}141 \text{ кОм}. \quad (3.51)$$

Значення пасивних елементів зворотного зв'язку регулятора швидкості визначимо наступним чином:

$$C_{ЗЗШ} = \frac{T_{ЗШ}}{R_{ЗШ}} = \frac{0{,}056}{20000} = 2{,}8 \text{ мкФ}, \quad (3.52)$$

$$R_{ЗЗШ} = \frac{T_M}{C_{ЗЗШ}} = \frac{0{,}024}{2{,}8 \cdot 10^{-6}} = 8571{,}4 \text{ Ом}. \quad (3.53)$$

Через мале перерегулювання (3,8%) перехідний процес контуру струму близький до аперіодичного, і тому передавальна функція має вигляд більш простої передавальної функції аперіодичної ланки:

$$W_{ЗАМ.С}(p) = \frac{1 \diagup \kappa_C}{1 + 2 \cdot T_{\mu} p} = \frac{6{,}13}{1 + 0{,}014p} . \quad (3.54)$$

У цьому випадку передавальна функція розімкненого контуру швидкості має вигляд:

$$W_{РОЗ.Ш}(p) = \frac{1}{\kappa_{Ш}} \cdot \frac{1+8T_{\mu}p}{32T_{\mu}^2 p^2 (1+2T_{\mu}p)} = \frac{1+0{,}056p}{2{,}78\cdot 10^{-4} p^3 + 1{,}91\cdot 10^{-4} p^2}. \quad (3.55)$$

Регулятор швидкості компенсував велику сталу часу $T_М$, і динамічні властивості контуру швидкості визначаються лише меншою сталою часу $T_μ$.

Передавальна функція замкненого контуру швидкості має вигляд:

$$W_{ЗАМ,Ш}(p) = \frac{1}{\kappa_{ОШ}} \cdot \frac{1+8T_{\mu}p}{64T_{\mu}^3 p^3 + 32T_{\mu}^2 p^2 + 8T_{\mu}p + 1}; \quad (3.56)$$

$$W_{ЗАМ,Ш}(p) = \frac{1+0{,}056p}{2{,}78\cdot 10^{-4} p^3 + 1{,}91\cdot 10^{-4} p^2 + 0{,}007p + 0{,}127}.$$

При попередньому моделюванні даного контуру в програмі MATLAB було виявлено занадто велике перерегулювання (45%), тому на вхід контуру швидкості було вирішено додати фільтр зі сталою часу $T_Ф = 8T_μ$. Структурна схема контуру швидкості зображена на рисунку 3.5.

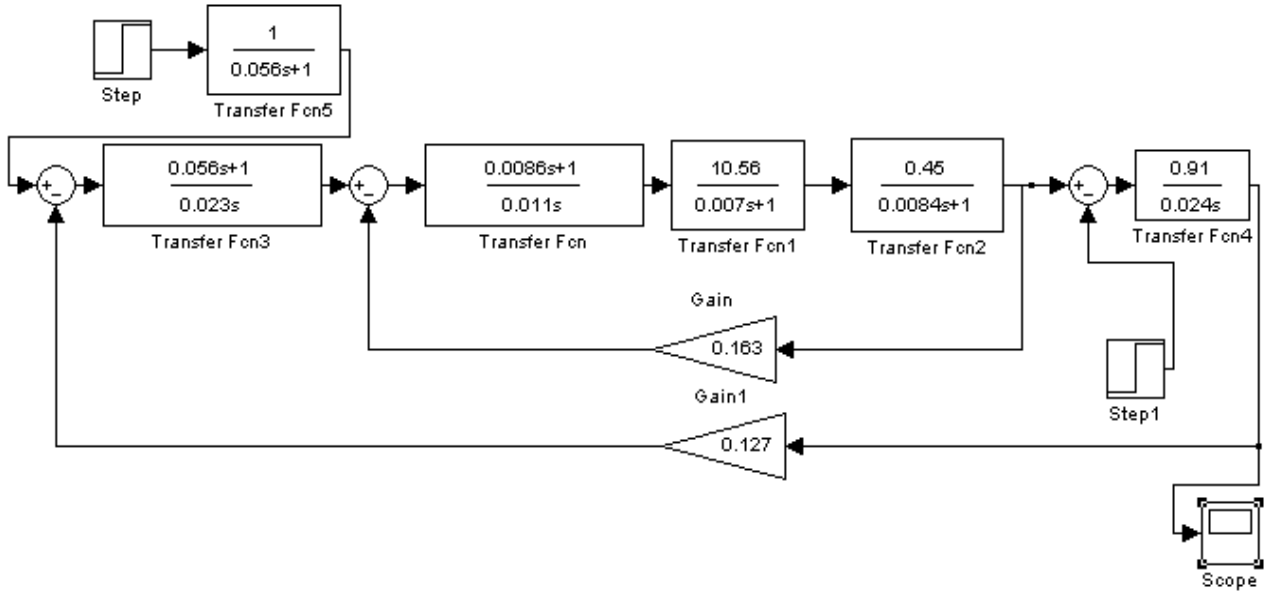


Рисунок 3.5 - Структурна схема контуру швидкості

Момент навантаження та задаючий сигнал модулюються блоками Step, які відповідно налаштовані на рівень задаючого сигналу (він коливається в межах від 0,5 до 10 В) та обрахованого моменту навантаження. Сам момент

навантаження подається із деякою затримкою відносно задаючого впливу з метою уникнення від'ємної ділянки моменту двигуна. Всі передаточні функції об'єктів регулювання виконанні на основі блоку Transfer Fcn. У параметрах обчислення (Simulation parametrs) обчислення виконуються з фіксованим кроком з дискретністю отримання точок 0,0001. Отримані характеристики виводяться на екран через Scope.

Графік перехідного процесу зображений на рис. 3.6.

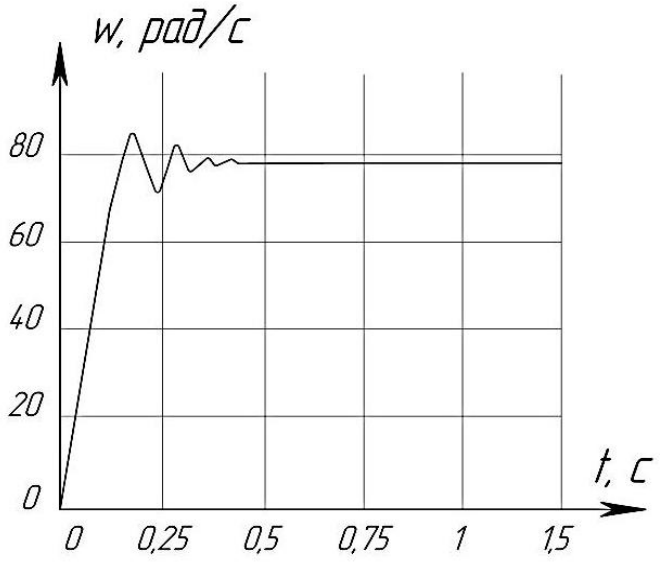


Рисунок 3.6 - Графік перехідного процесу контуру швидкості

$$\sigma_{ш} = \frac{82{,}1 - 78{,}6}{78{,}6} \cdot 100\% = 4{,}4\%$$

Розрахунок показав, що величина перерегулювання для даного перехідного процесу складає $\delta_{ш}$ = 4,4 %, а час регулювання t_p = 0,42 с.

Таким чином отриманий графік перехідного процесу контуру швидкості задовольняє необхідним вимогам якості.

3.4. Оцінка стійкості розробленої САК

Питання оцінки стійкості системи вирішимо за допомогою критерію Найквіста [17]. Маємо передавальну функцію:

$$W_3(S)=\frac{760\cdot10^6\cdot(0{,}0086S+1)}{59\cdot10^{-6}S^5+15{,}4\cdot10^{-3}S+44{,}8\cdot10^3S+5{,}9\cdot10^3S^2+98{,}2\cdot10^3S+1{,}06}. \qquad (3.57)$$

Відомо, що згідно критерію Найквіста замкнена система є стійкою, якщо розімкнена система стійка і її АФХ не охоплює критичну точку, тобто точку з координатами (–1; j0). Годограф Найквіста побудуємо за допомогою програми MATLAB.

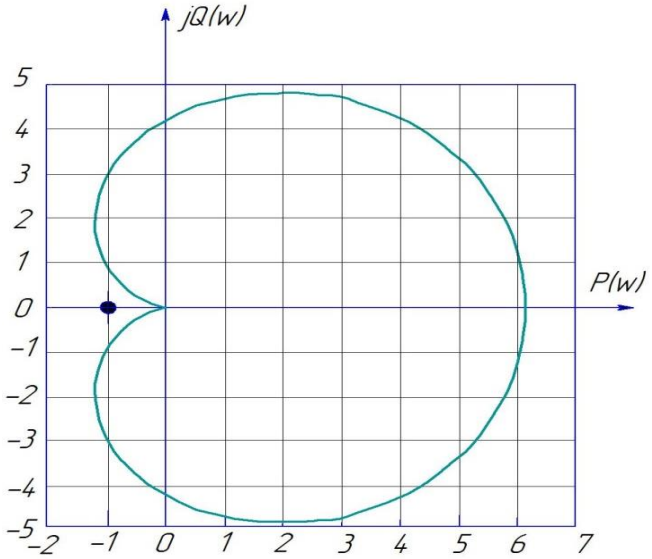


Рисунок 3.7 – Годограф Найквіста

Як видно з рис. 3.7, годограф не охоплює точку з координатами (-1; j0), тобто система є стійкою.

3.5 Висновки по розділу

1. Розроблений цифровий регулятор швидкості, який відповідає вимогам до точності та швидкодії функціонування системи автоматичного управління електроприводом формуючої машини.

2. В результаті використання передової методики розрахунків розроблений ШІМ, який відповідає всім вимогам сучасного рівня розвитку промислової електроніки.

3. Застосування фотоелектричного датчику швидкості значно полегшило задачу досягнення потрібних параметрів регулятора.

4. Розроблена система відповідає вимогам якості та стійкості.

ВИСНОВКИ

Актуальність поставленої цілі обумовлена широким використанням виробів з медичного скла в медичній та мікробіологічній промисловості та відсутністю вітчизняної промислової реалізації як систем автоматичного управління процесом витяжки склодроту, так і самого технологічного обладнання.

Переведення системи автоматичного управління на вітчизняному елементну базу дозволяє отримати незалежність від фірми-виробника при експлуатації та обслуговуванні формуючої машини. Використання в схемі управління уніфікованих та широко застосованих пристроїв значно полегшує задачу ремонту та накладки обладнання, скорочує тривалість вимушених простоїв при виникненні несправності, а отже підвищує гнучкість та надійність виробничого процесу.

Розроблена в даній бакалаврській роботі система автоматичного управління електроприводом формуючої машини дозволяє не тільки забезпечити потрібні параметри технології виробництва склотрубки та точність регулювання параметрів, а також якісно змінити надійність функціонування як окремих елементів системи управління, так і електроприводу в цілому. Застосування фотоелектричного датчику швидкості значно полегшило задачу досягнення потрібних параметрів регулятора. Дослідження показали, що розроблена система відповідає вимогам якості та стійкості.

Робота має практичну цінність і її результати після більш детальної доробки можуть бути розглянуті для використання на даному підприємстві.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Рубан О.А. Практикум з промислової технології лікарських засобів для студентів спеціальності «Фармація» / За ред. О.А. Рубан. − Х.: НФаУ, 2015. − 374 с.

2. Державна Фармакопея України / Держ. п-во «Науковоекспертний фармакопейний центр». – 1-е вид., допов. 3. – Х. : РІРЕГ, 2009. – 280 с.

3. Шефер О.В., Онушко В.В. Електричні машини: навчальний посібник / В.В. Онушко, О.В. Шефер. – Полтава, ПолтНТУ, 2015. – 536 с.

4. Чорний. О.П. Моделювання електромеханічних систем: підручник для ВНЗ/ О.П. Чорний, А.В. Луговий, Д.Й. Родькін, Г.Ю. Сисюк, О.В. Садовий. — Кременчуг, 2001. – 376 с.

5. Онушко, В.В. Моделювання електромеханічних систем: навчальний посібник / В.В. Онушко, Д.В. Стрижеус. – Полтава, ПолтНТУ, 2010. – 81с.

6. Моделювання систем: Підручник для ВУЗів / В.М. Томашевський. – К.: ВНV, 2005. – 352 с.

7. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання: Навчальний посібник / С. М. Довгань. - Дніпропетровськ: НГА України, 2001. – 137 с.

8. Основи комп’ютерного моделювання: навч. посібник / М.С. Барабаш, П.М. Кір’язєв, О.І. Лапенко, М.А. Ромашкіна. 2-е вид. стер. – К.: НАУ, 2019. – 492 с.

9. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.

10. Голодний І.М., Червінський Л.С., Жильцов А.В., Санченко О.В. Романенко О.І. Моделювання регульованого електропривода: Підручник. – К.: Аграр Медіа Груп, 2019. – 266 с.: іл.

11. Куцик А.С. Автоматизовані системи керування на програмованих логічних контролерах: Навч. посіб. - Нац. ун-т «Львівська політехніка»/ А.С. Куцик, В.О. Місюренко.– Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2011.– 199 с.

12. Колб Ант. А, Колб А. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – 2-е вид. перероб. і доп. –Д., Національний гірничий університет, 2011. – 540 с.

13. Донець О. В. Теорія електропривода/ В. І. Колотіло, О. В. Донець; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 148 с.

14. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посібник для вищ. навч. закл., за ред. Поповича М.Г., Лозинського О.Ю. – К.:Либідь, 2005. – 678 с.

15. Зеленов А.Б. Теорія електропривода: Методика проектування електроприводів: Підручник. – Луганськ: Вид-во "Ноулідж", 2010. – 670 с.

16. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / За ред. М.Г. Поповича. – К.: Либідь, 2005. – 672 с.

17. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування. Підручник. – К: Либідь, 2007, – 656с.

18. Галай В.М. Теорія цифрових систем автоматичного керування: навчальний посібник. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. –131 с.

Додаток А

1

Мета даної роботи полягає в рішенні комплексу питань по модернізації та дослідженню системи автоматичного регулювання процесом витяжки склодроту.

Предметом дослідження кваліфікаційної роботи є електропривод формуючої машини. **Об'єктом дослідження** є розроблення системи автоматичного керування електроприводом.

Актуальність поставленої цілі обумовлена:

а) широким використанням виробів з медичного скла в медичній та мікробіологічній промисловості;

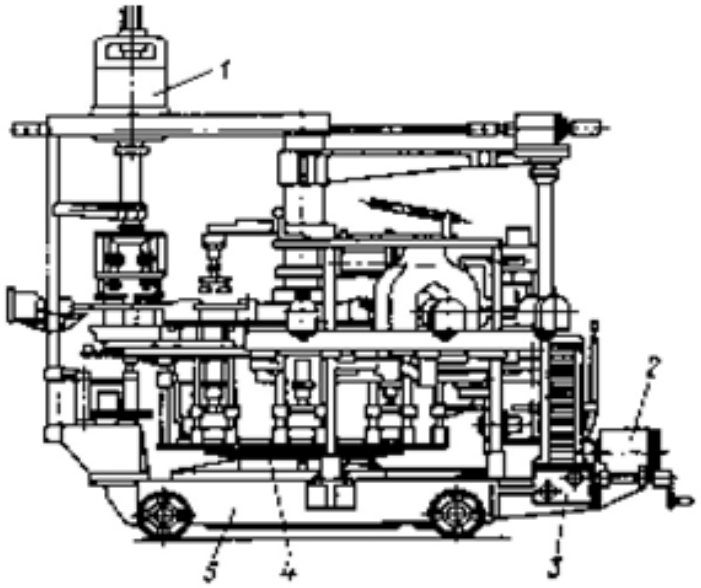
б) відсутністю вітчизняної промислової реалізації як систем автоматичного управління процесом витяжки склодроту, так і самого технологічного обладнання.

В ході бакалаврської роботи вирішені **наступні задачі:**

- розрахунок та вибір приводного електродвигуна формуючої машини;
- розробка системи автоматичного управління електроприводом формуючої машини, що забезпечить якість регулювання, аналогічну системі управління імпортного виробника;
- розробка системи плавного регулювання швидкості обертання мундштука.

2

Загальний вигляд формуючої машини



1 – пристрій подачі скломаси;

2 – плунжер для видавлення скломаси;

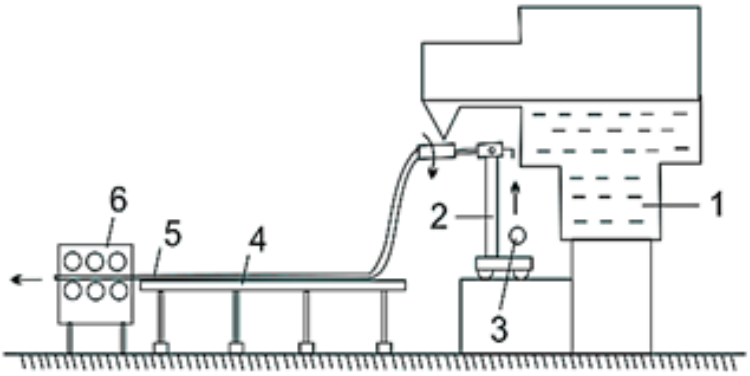
3 - плунжер для витяжки скломаси;

4 – ножиці;

5 - станина

3

Технологічний процес витяжки склодроту



1 –скловарна піч;

2 – формуюча машина;

3 – пристрій роздуву склотрубки;

4 – лінія підтримки склодроту на час затвердіння;

5 – склодріт;

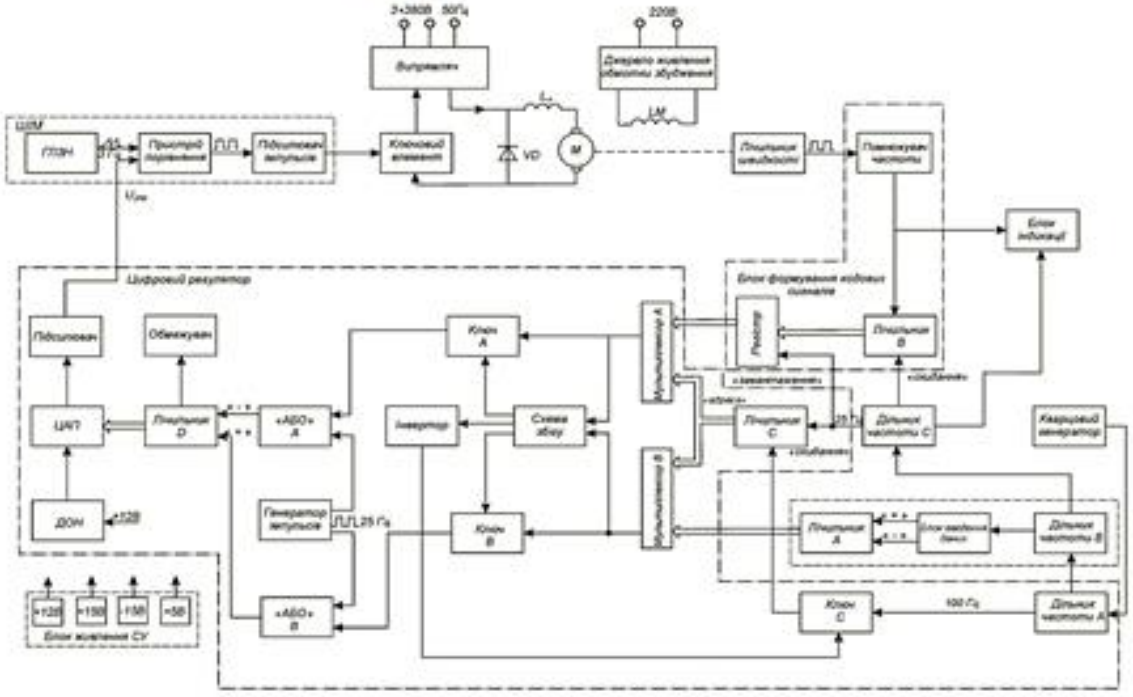
6 – тянульна машина

Електропривод формуючої машини повинен забезпечити:

- Плавне регулювання швидкості обертання мундштука в діапазоні 2,5÷25 об/хв;
- Підтримку заданої швидкості обертання мундштука з точністю ± 0,1 об/хв, що відповідає похибці не більше 0,4%.

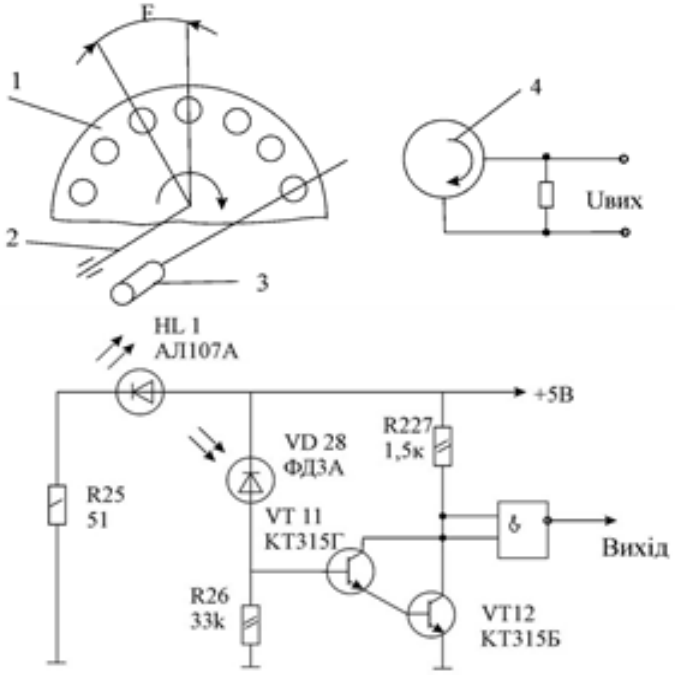
4

Функціональна схема електроприводу формуючої машини



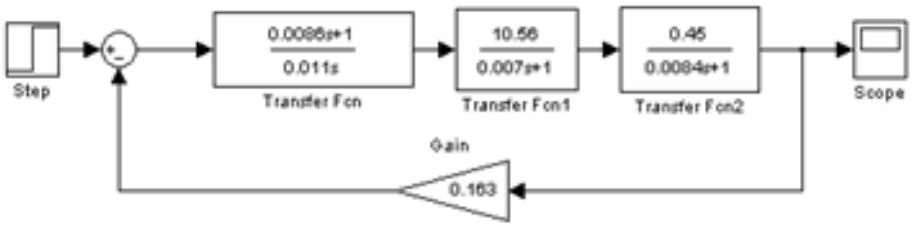
5

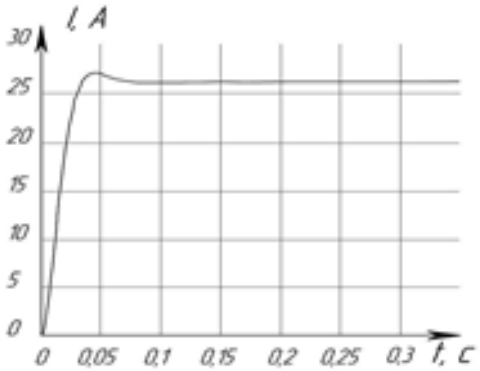
Фотоелектричний датчик швидкості



6

Структурна схема та графік перехідного процесу контуру регулювання струму





Перегулювання по струму

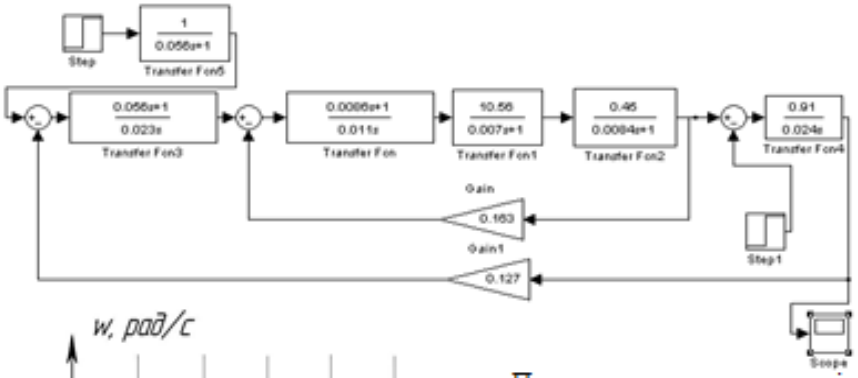
$$\sigma_c = \frac{27{,}2 - 26{,}2}{26{,}2} \cdot 100\% = 3{,}8\%$$

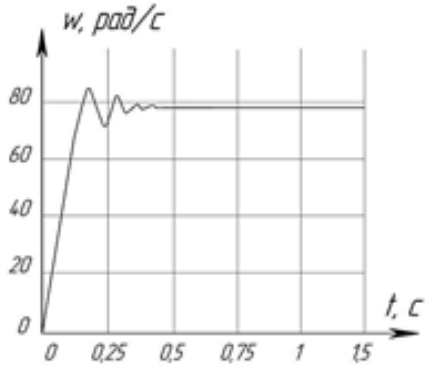
Час регулювання $t_p = 0{,}085$ с.

6

7

Структурна схема та графік перехідного процесу контуру регулювання швидкості





Перегулювання по швидкості

$$\sigma_{\omega} = \frac{82,1 - 78,6}{78,6} \cdot 100\% = 4,4\%$$

Час регулювання $t_p = 0,42$ с.

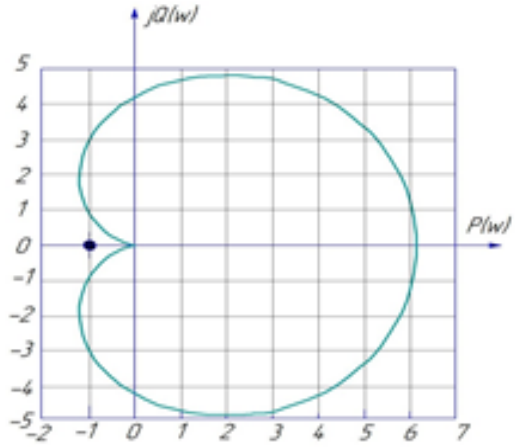
7

8

Дослідження системи на стійкість

Передаточна функція замкненої системи

$$W_3(S) = \frac{760 \cdot 10^6 \cdot (0,0086S + 1)}{59 \cdot 10^{-6} S^5 + 15,4 \cdot 10^{-3} S + 44,8 \cdot 10^{-2} S + 5,9 \cdot 10^{-2} S^2 + 98,2 \cdot 10^{-2} S + 1,06}.$$



Висновок: годограф Найквіста не охоплює точку з координатами (-1; j0), тобто система є стійкою.

Додаток Б

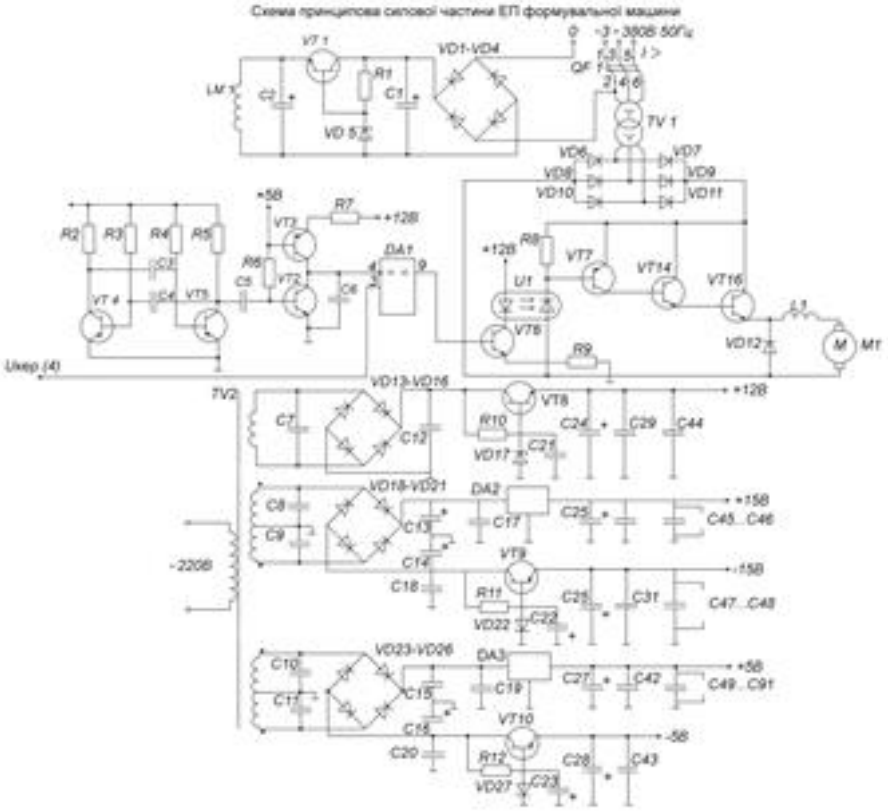


Схема принципова силової частини ЕП формувальної машини
VT 1
VD1-VD4
QF
-3 - 380В 50Гц
7V 1
VD6
VD7
VD8
VD9
VD10
VD11
+5В
R7
+12В
VT3
R2
R3
R4
R5
R6
VT2
VT 4
VT5
C5
C6
DA1
+12В
R8
VT7
VT14
VT16
U1
VT8
R9
VD12
M
M1
Uкер (4)
7V2
VD13-VD16
+12В
VT8
C7
C12
R10
C24
C29
C44
VD17
C21
C8
C9
VD18-VD21
DA2
+15В
C45...C46
C13
C17
C25
-220В
C14
VT9
+15В
C18
R11
C26
C31
C47...C48
VD22
C22
C10
C11
VD23-VD26
DA3
C15
C19
C27
C42
+5В
C49...C91
VT10
C55
-5В
C20
R12
C28
C43
VD27
C23
Схема керування ЕП формувальної машини
Сигнал 03 (3)
+5В
R16
DD3.1
C36
R20
R22
DD4.1
C38
R23
DD8
DD11
DD14
HG1
DD3.2
C37
R21
DD4.2
C39
R24
DD9
DD12
DD15
HG2
R13
DD1.1
C32
R14
R17
DD2.1
C34
DD8.1
DD8.2
DD1.2
C33
R15
R18
DD2.2
C35
DD10
DD13
DD16
HG3
X1
1 Самовибит
2 Вимкнення
HL1
R25
X2
1 Вимкнення
2 Вимкнення
VD28
R27
DD8.1
VT11
VT12
R26
VT13
R28
DD7
ZQ1
R30
R31
DD17.1
DD17.2
DD17.3
DD17.4
R29
C40
R32
Тактовий сигнал
Сигнал 03 (3)
Сигнал
7800 кГц(4)

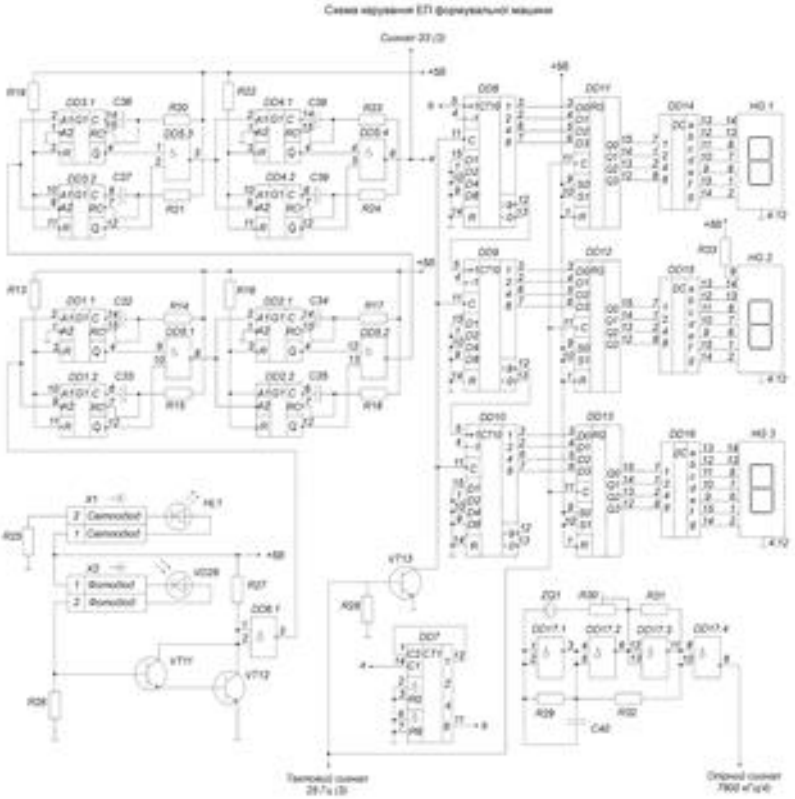


Схема керування ЕП формувальної машини
Сигнал ЗУ (3)
+5В
DD3.1
DD3.2
DD4.1
DD4.2
DD5.1
DD5.2
DD5.3
DD5.4
DD6
DD9
DD10
DD11
DD12
DD13
DD14
DD15
DD16
HG1
HG2
HG3
R18
R13
R20
R21
R22
R23
R24
R14
R15
R16
R17
C32
C33
C34
C35
C36
C37
C38
C39
X1
Самохід
X2
Фотодіод
HL1
VD28
R25
R26
R27
VT11
VT12
VT13
R28
DD7
DD6.1
ZQ1
R30
R31
R32
R29
C40
DD17.1
DD17.2
DD17.3
DD17.4
Тактовий сигнал
Опорний сигнал

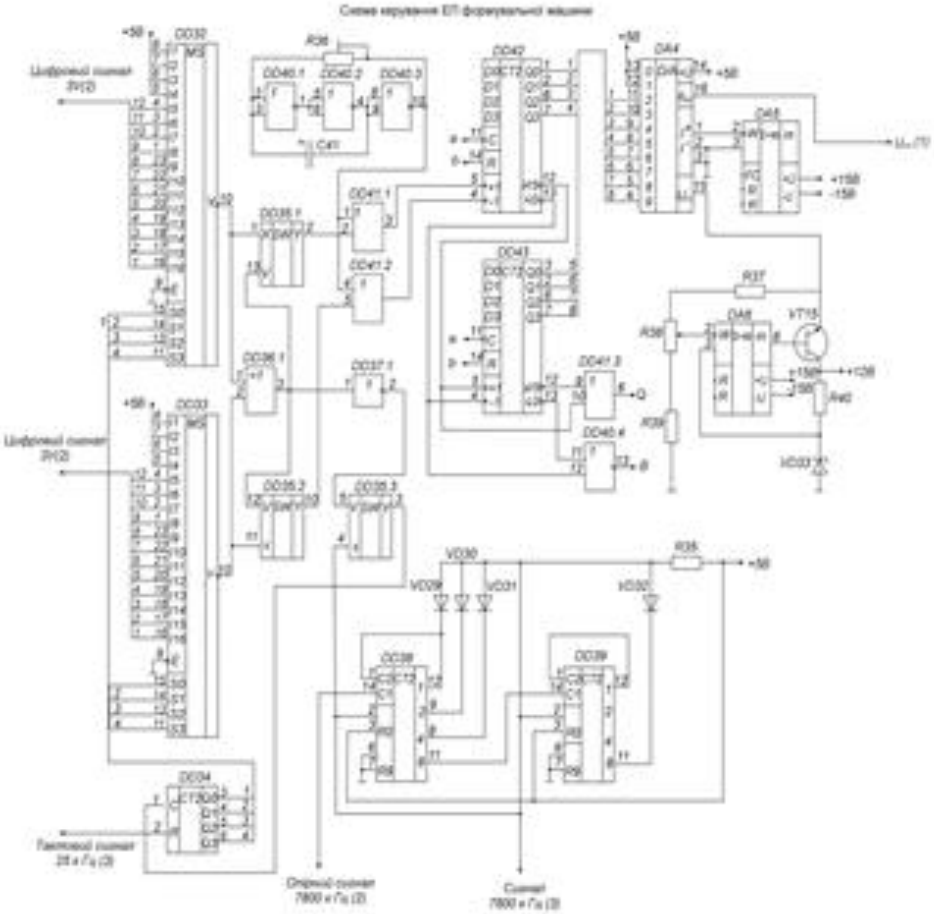


Схема керування ЕП формувальної машини
Цифровий сигнал ЗУ(2)
DD32
DD33
DD34
R36
DD40.1
DD40.2
DD40.3
C41
DD42
DD44
DD45
DD41.1
DD41.2
DD43
DD46
DD35.1
DD36.1
DD37.1
DD41.3
DD40.4
R37
VT15
R38
R39
HG3
DD35.2
DD35.3
VD30
VD29
VD31
VD32
R35
DD38
DD39
Тактовий сигнал
Опорний сигнал
Сигнал

Додаток В

1 TECHNOLOGICAL PART

1.1 General information about the technological process of drawing glass wire

Medical glass is one of the main materials for the manufacture of medical equipment and products of the pharmaceutical industry. The use of medical glass as a protective material for various types of pharmacological preparations is particularly effective. In this connection, there is a need to improve the technological processes of obtaining medical glass and products from it.

One of the main stages in the production of medical glass is drawing glass wire, which serves as a semi-finished product for the manufacture of medical ampoules. The main technological stages of the glass manufacturing process are presented in fig. 1.1.

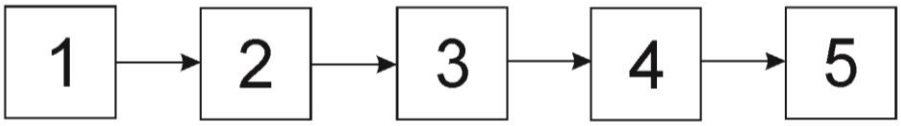


Figure 1.1 – The main technological stages of glass production: 1-dosing of components; 2- preparation of the charge; 3-cooking glass; 4-glass wire hood; 5-production of finished products

Glassware, along with medical ampoules, is the main product of the Poltava Medical Glass Plant. High requirements are placed on medical glass and products made from it both from the point of view of chemical composition and from the point of view of mechanical and geometrical parameters. Obtaining glass wire is a complex technological process that is impossible without automation and mechanization of both individual operations and the entire process as a whole.

The process of drawing glass wire can consist of two stages:

1) glass cooking process;

2) extraction from the obtained glass mass of glass wire of given geometric dimensions.

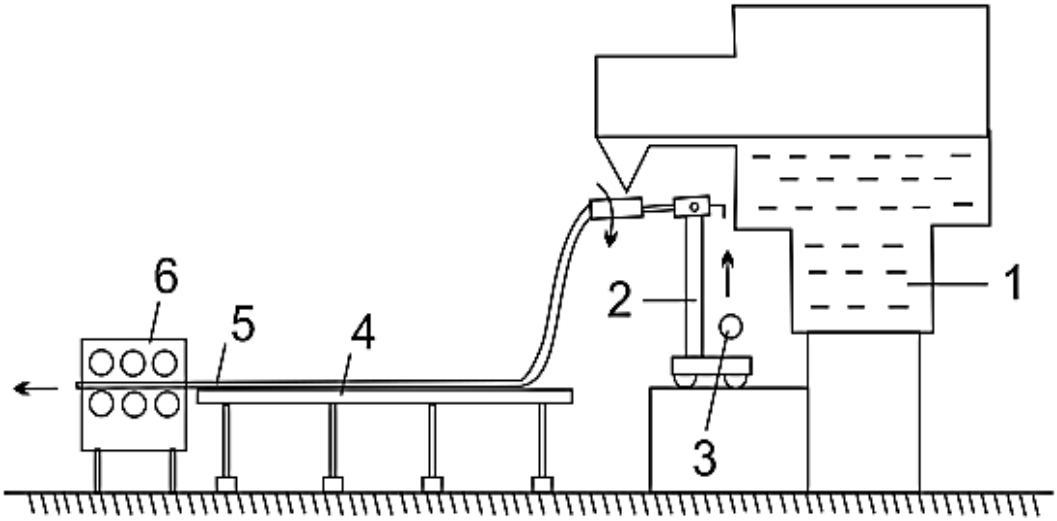


Figure 1.2 – Simplified technological diagram of the glass wire drawing line
glass furnace; 2- molding machine; 3- glass tube blowing device;
4- glass wire support line during hardening; 5- glass wire;
6- traction machine

Glass wire drawing is produced using technological equipment that is part of the glass wire drawing line. A simplified technological scheme of the glass wire line is presented in Fig. 1.2.

Boiling of glass is carried out in a glass furnace of the bath type, which is a bath made of fire-resistant material. The furnace is heated by rod electrodes installed in the working area of the furnace. In a cooled state, glass is a good dielectric, but in a liquid, heated state, glass conducts electric current well, and its electrical resistance is lower, the higher the temperature of the glass mass. The cooking process is carried out continuously by passing a high-voltage electric current between pairs of molybdenum electrodes.

Due to the convection movement, the hotter, welded glass rises to the upper layer of the molten glass mass, from where it flows through a special hole (tray) in the furnace body in a continuous flow on the glass extraction line.

Glass extraction is carried out using three technological units:

1) a forming machine that rotates the mouthpiece;
2) glass wire support lines during its hardening;
3) traction machine.

The forming machine, which is an object of modernization, has the following design. The support column of the mouthpiece is installed on the removable platform, at the top of which the electric drive for the mouthpiece rotation is arranged.The platform has 4 wheels that slide on rails, which allows it to be dismantled from the furnace muffle if it is necessary to replace the mouthpiece. When the platform is in working condition, one of the four wheels is locked with a hand brake. The shaft of the mouthpiece is rotated by an electric motor connected through a clutch to a worm gear unit with a helical wheel. A brake unit is used to keep the load of the electric motor stable, without changing the accuracy of the speed control.

The mouthpiece is a conical metal pipe 2 meters long with a taper of 3°, made of heat-resistant steel. In the part where the mouthpiece is in direct contact with the heated glass, it is covered with heat-resistant ceramics, since the temperature of the glass is, according to the cooking technology, 1200°. The mouthpiece shaft is partially cooled by a water jacket and is one piece. The mouthpiece is driven by a special drive and rotates at one speed. Maintaining a constant value of the speed of rotation of the mouthpiece, in combination with a number of other requirements, is a more important condition for obtaining the specified characteristics of the quality of the glass tube. The axis of rotation of the mouthpiece is inclined in relation to the horizontal axis at an angle of 12-18°. Glass mass, which is fed to the mouthpiece in a continuous flow, forms a spiral on its surface, which, due to the inclined position of the mouthpiece, flows to its lower, open end and forms a glass cylinder.

Due to the supply of compressed air into the inner cavity of the mouthpiece at its lower, open end, a continuous glass tube is formed from glass mass. This tube must be tightened all the time, since the glass has not yet lost its fluidity. Next, the glass tube enters the hardening line.

The solidification line is a metal horizontal tray. To keep the glass wire from deforming, nozzles are placed along the entire length of the tray, through which compressed air is supplied. Thus, two tasks are solved: cooling the glass wire and maintaining it on an air cushion, which prevents deformation.

At the end of the curing line is a drawing machine that pulls the glass wire from the mouthpiece at a constant speed. After the drawing machine, the glass wire enters the cutting machine, where it is divided into 1.5 m long segments.

1.2. Technical requirements for the glass wire drawing process

The main requirements for the technological process are obtaining and maintaining the specified geometric parameters of the glass wire. This task is solved by an automation system, which includes a forming machine. The forming machine is designed to obtain and maintain the specified speed of rotation of the mouthpiece, as well as to adjust it in the specified range: 2.5÷25 rpm.

This work considers the modernization of the automatic control system of the glass wire drawing process, one of the components of which is the electric drive of the forming machine.

The scheme of the glass extraction process, obtained on the basis of operational experience, is presented in fig. 1.3.

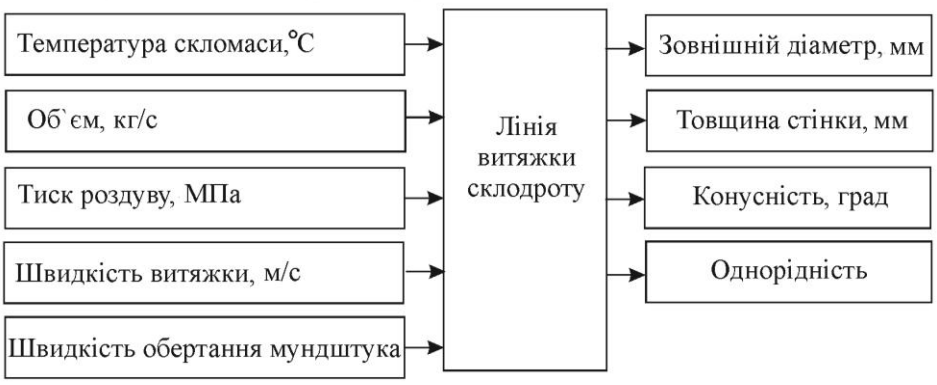


Figure 1.3 – Diagram of the glass wire drawing process.

From the point of view of work technology, the electric drive of the forming machine must provide:

1) Smooth adjustment of the mouthpiece rotation speed in the range of 2.5÷25 rpm;

2) Maintenance of the specified speed of rotation of the mouthpiece with an accuracy of ± 0.1 rpm, which corresponds to an error of no more than 0.4%.

1.3 Characteristics of the glass wire drawing process from the point of view of automation

The process of obtaining glass wire from molten glass mass is the final stage in the extraction of glass tube, which is used in the medical industry as a semi-finished product for the manufacture of various types of ampoules, corks, vials and other products. The main technical equipment used for glass wire is a drawing line, the principle of which is based on blowing air into a glass cylinder, which is constantly drawn out. Due to high manufacturability and, at the same time, simplicity and reliability in operation, the hood line has become widely used in enterprises that produce medical glass.

An Italian-made glass wire extraction line was installed at the Poltava Medical Glass Plant during the reconstruction of the glassmaking workshop. From the point of view of the technological process, the level of automation does not fully meet the quality requirements, therefore there are a number of points that require refinement.

Let's consider those of them that are directly related to the object of modernization of this work - the electric drive of the forming machine.

1) In accordance with the existing documentation, the speed of rotation of the mouthpiece is regulated within 0÷15 rpm, but the technology of production of glass tubes of various assortments, according to the technical documentation, requires adjustment in a wider range - 2.5÷25 rpm.

2) The glass furnace, due to the flow of high currents between pairs of electrodes, is a strong source of electromagnetic radiation, which is reflected in the operation of the speed feedback sensor (tachogenerator) in the control system of the electric drive of the forming machine.3) The very fact of using a potentiometer, which includes electric

contacts, as the main element of the device, which sets the speed of rotation of the mouthpiece, significantly reduces the quality and reliability of the control of the electric drive of the forming machine.

1.4 Conclusions on the section

The above analysis of the state of automation of the glass wire drawing process allows us to draw a number of general conclusions and establish directions for real development:

- the technological process of drawing glass wire has a number of the above-described features that must be taken into account in the process of modernizing its individual structural modules.
- the level of automation of the glass wire drawing process at the Poltava Medical Glass Plant does not fully meet the quality requirements and requires the introduction of a number of improvements.