

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

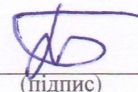
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри


(підпис)

І. С. Білюк

« 15 » 06 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код та назва спеціальності)

освітня програма Електротехніка та електротехнології

(назва освітньої програми)

на тему: «Вдосконалення системи керування електропривода подачі пилорами»

Виконав: студент IV курсу, групи 4311

Ломажук Владислав Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник ст. викл. каф. автоматики, доц. НУК Фоменко А.М.

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

Нормоконтроль викладач каф. автоматики, Савченко О.В.

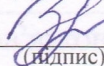
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Рецензент доц. каф. СЕЕС, к.т.н., доц. Новогорецький С.М.

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

Засвідчую, що у цій кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент


(підпис)

м. Миколаїв – 2026 року

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Інститут, факультет Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
Кафедра автоматики
Освітній ступінь бакалавр
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
(шифр і назва)
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва)
Освітня програма «Електротехніка та електротехнології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

О.Г. Васильєв

«18» 06 2026 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ

Ломажук Владислав Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Вдосконалення системи керування електропривода подачі пилорами»

керівник роботи Фоменко Андрій Миколайович, старший викладач, доцент НУК,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «22» квітня 2026 року
№ 286-УЧ.

2. Строк подання студентом роботи 10.06.2026р.

3. Вихідні дані до роботи Автоматизований електропривод змінного струму. Напруга живлення автоматизованого електропривода 380В. Максимальне перерегулювання не повинне перевищувати 27%, а час перехідного процесу системи керування приводом не вище 0,3 с. Максимальне перерегулювання складає 25,9%, а час перехідного процесу дорівнює 0,222 с.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Опис електромеханічної системи привода подачі пилорами 2. Розробка функціональної схеми електропривода подачі пилорами та вибір обладнання 3. Математичний опис автоматизованого електропривода подачі пилорами 4. Математичний опис та розрахунок елементів системи керування 5.

Охорона праці

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

1. Загальний вигляд лісопильної рами Р63-4Б 2. Принципова схема діючої системи керування 3. Функціональна і структурна схеми системи скалярного частотно-струмового керування асинхронним двигуном з КЗ ротором 4. Результати дослідження динаміки системи керування

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання ви- дав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 02.02. 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

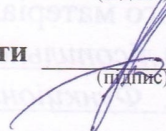
№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Опис електромеханічної системи привода подачі тилорами</i>	07.02.26	
2	<i>Розробка функціональної схеми електропривода подачі тилорами та вибір обладнання</i>	21.02.26	
3	<i>Математичний опис автоматизованого електропривода подачі тилорами</i>	14.03.26	
4	<i>Математичний опис та розрахунок елементів системи керування</i>	11.04.26	
5	<i>Графічна частина</i>	16.05.26	
6	<i>Підготовка до захисту</i>	06.06.26	

Студент


(підпис)

Ломажук В.М.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Фоменко А.М.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 60 с., 5 р., 16 рис., 1 табл., 1 дод., 9 джерел.

Ключові слова: асинхронний електропривод, привода подачі, перехідна характеристика, пилорама, частотно-струмовим керуванням.

Мета роботи – автоматизація та підвищення ефективності і безпеки роботи лісопильної рами. В частоті розглядаються питання дослідження привода подачі існуючої системи керування та пошук шляхів покращення показників якості всієї системи в цілому

У першому розділі наведено загальні відомості та технічні характеристики лісопильної рами та конструкція та принцип дії лісопильної рами. Проведено аналіз діючої системи керування та виконана постановка задачі. У розділі 2 наведено опис та обґрунтування вибору електротехнічного обладнання автоматизованого привода подач пилорами. Виконано Розробка функціональної схеми електропривода подачі пилорами та розробка принципової схеми автоматизованого електропривода подачі пилорами. Розділ 3 містить розробку структурної схеми системи керування та Математичний опис та розрахунок елементів системи керування. Розділ 4 містить розрахунок та побудова частотних характеристик електропривода подачі пилорами. Виконано побудову перехідного процесу системи керування приводом подач пилорами. За результатами дослідження виконаний аналіз перехідного процесу системи керування приводом подач пилорами. В розділі 5 розглянуті питання з охорони праці. Додатки містять слайди мультимедійної презентації (додаток А).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ОПИС ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ПРИВОДА ПОДАЧІ ПИЛОРАМИ.....	9
1.1 Загальні відомості та технічні характеристики лісопильної рами.....	9
1.2 Конструкція та принцип дії лісопильної рами.....	10
1.3 Постановка задачі на автоматизацію.....	15
2 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОДАЧІ ПИЛОРАМИ ТА ВІБІР ОБЛАДНАННЯ.....	18
2.1 Розробка функціональної схеми електропривода подачі пилорами.....	18
2.2 Опис та обґрунтування вибору електротехнічного обладнання автоматизованого приводу подач пилорами.....	23
2.3 Розробка принципової схеми автоматизованого електропривода подачі пилорами.....	27
3 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОДАЧІ ПИЛОРАМИ.....	29
3.1 Розробка структурної схеми системи керування.....	29
3.2 Математичний опис та розрахунок елементів системи керування.....	33
4 РОЗРАХУНОК ТА ПОБУДОВА ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОДАЧІ ПИЛОРАМИ.....	40
4.1 Побудова перехідного процесу системи керування приводом подач пилорами.....	40
4.2 Аналіз перехідного процесу системи керування приводом подач пилорами.....	41
5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	44
5.1 Загальні положення.....	44
5.2 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів, що впливають на людину при експлуатації лісопильної рами.....	45

5.3 Розрахунок освітленості виробничого цеху.....	48
5.4 Розробка заходів щодо техніки безпеки.....	50
ВИСНОВКИ.....	53
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	54
ДОДАТОК А.	55

ВСТУП

Лісова і деревообробна промисловість - важлива складова економіки України.

Лісопромисловий комплекс України інтенсивно формується в умовах малої кількості лісів і недостатніх запасів лісової сировини. Проте, ні площі, ні запаси лісу не відповідають природним потенційним можливостям території і різноманітним потребам господарства і населення в деревині та інших лісових насадженнях і продуктах.

На підприємствах почали впроваджуватися механізовані і автоматизовані лінії, новітнє обладнання з програмним управлінням, сучасні технології і матеріали, особливо в меблевому виробництві.

Фахівці, що працюють в області автоматизованого електроприводу, в останні роки все більший інтерес проявляють до питань частотного керування асинхронними двигунами. Цей інтерес зумовлений тим, що в наш час не виникає сумнівів у можливості і доцільності створення і серійного виготовлення перетворювачів частоти, що відрізняються високими енергетичними показниками, підвищеною надійністю, високою швидкістю, безшумністю і забезпечують на свій вихід необхідне співвідношення між частотою і амплітудою напруги як в статичних, так і в динамічних режимах.

Дотримання необхідного і автоматично встановлюваного співвідношення між частотою і амплітудою напруги, що підводиться до статора асинхронного двигуна забезпечується в замкнутих системах частотного керування. Тільки в таких, автоматично діючих, системах можливо оптимальне керування асинхронними двигунами, причому електропривод змінного струму, будучи безконтактним, може забезпечити кращі характеристики в порівнянні з автоматично керованим приводом постійного струму. Асинхронний двигун в цьому випадку в перехідному режимі може розвивати істотно більші моменти, ніж двигун постійного струму, що забезпечує високу швидкість електроприводу з відносно малими втратами.

ми енергії, а в сталому режимі - плавне, широке і економічне регулювання швидкості.

1 ОПИС ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ПРИВОДА ПОДАЧІ ПИЛОРАМИ

1.1 Загальні відомості та технічні характеристики лісопильної рами

Рама лісопильна вертикальна одноповерхова моделі Р63-4Б призначена для поздовжнього розпилу необрізного пиломатеріалу. Подача матеріалу здійснюється рифленими роликами, які забезпечують швидкість автоматичної подачі близько 6,5 метра за хвилину. Завдяки такій високій швидкості подачі обладнання відрізняється високою продуктивністю, може використовуватися як в умовах невеликих підприємств, так і у великих деревообробних підприємствах.

Агрегат пристосований до обробки різних порід деревини, у тому числі - твердих. Розпилювання забезпечується поступально-зворотними рухами станини, на котрій зафіксовані пили.

Установка рамної пилорами може здійснюватися як тимчасово, так і стаціонарно, але агрегат вимагає міцного і рівного фундаменту для отримання якісного пиломатеріалу.

Відмінними якостями рамної пилорами Р63-4Б є її висока продуктивність, яка складає близько 6 кубометрів деревини на годину та безвідмовна робота навіть в екстремальних умовах низьких температур. Використовувати дане устаткування досить просто і надійно. Рама лесопильна застосовується в тимчасових і стаціонарних лісопильних цехах сільськогосподарських, промислових і будівельних організацій.

Вид кліматичного виконання - УХЛЗ згідно з ГОСТ 15150-69.

Технічні характеристики лісопильної рами наведені в таблиці 1.1, основні параметри і розміри наведені згідно з ГОСТ 10295-90.

Установка рамної пилорами може здійснюватися як тимчасово, так і стаціонарно, але агрегат вимагає міцного і рівного фундаменту для отримання якісного пиломатеріалу.

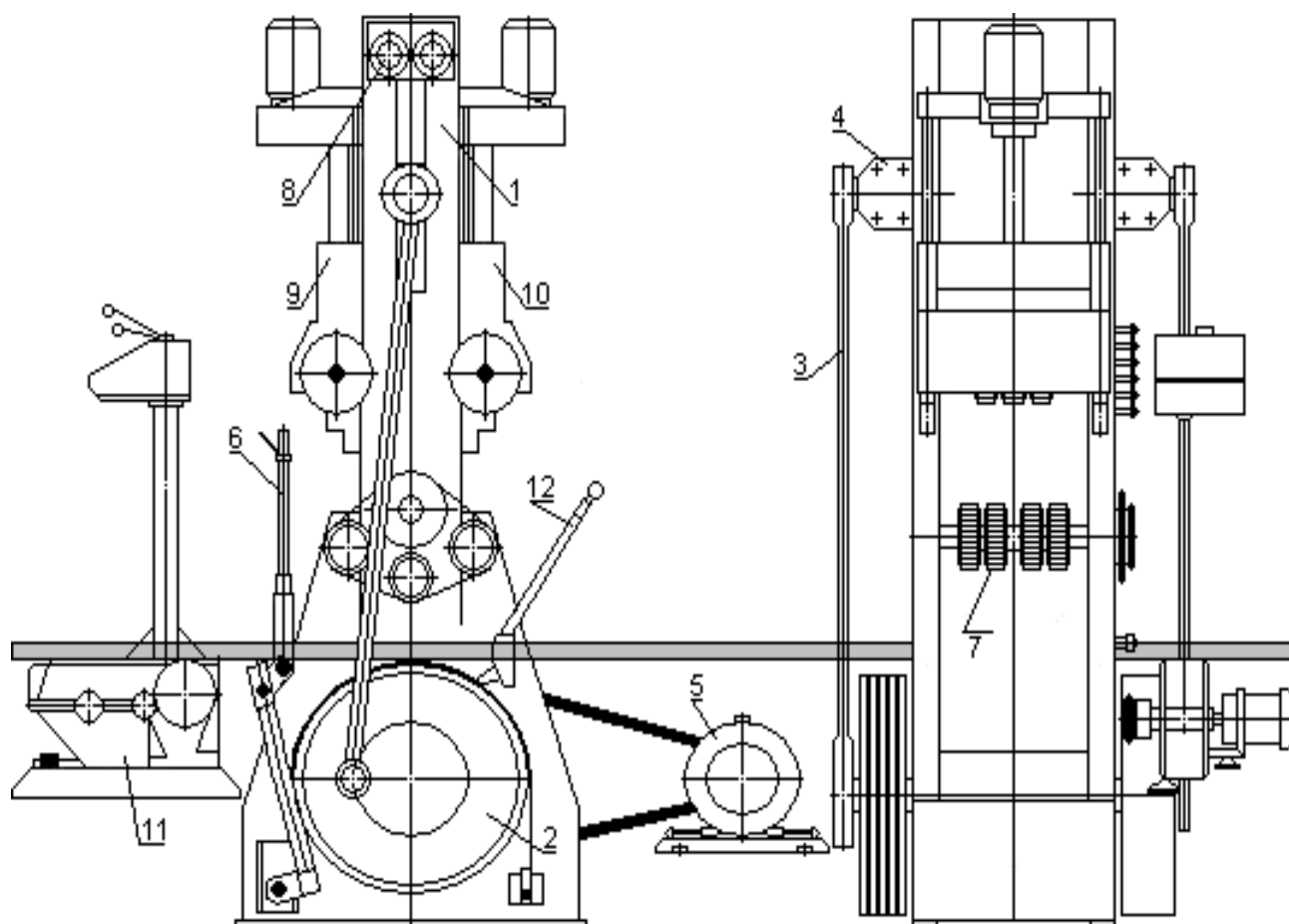
Таблиця 1.1 – Технічні характеристики вертикальної одноповерхової лісопильної рами моделі Р63-4Б

№ п/п	Найменування параметра	Дані
1	Ширина просвіту пильної рамки, мм	630
2	Хід пильної рамки, мм	400
3	Найбільший діаметр колод, що розпилюються, мм	530
4	Довжина колод і брусів, що розпилюються, мм - найменша; - найбільша;	3000 7500
5	Кількість подвійних ходів пильної рамки, ходів/хв.	285
6	Подача колоди або бруса на один подвійний хід пильної рамки, мм	3-22
7	Кількість пил у складі, шт. - найбільша; - найменша;	12 3
8	Габарити лісопильної рами, мм - довжина; - ширина; - висота;	4232 2615 3000
9	Маса лісопильної рами, кг	5850
10	Загальна встановлена потужність, кВт	44,4

1.2 Конструкція та принцип дії лісопильної рами

Головний рух в лісопильній рамі - зворотньо-поступальне переміщення пильної рамки з пилками, яке вона отримує через шатуни від кривошипних пальців маховиків корінного вала. Один з маховиків корінного вала є приводним шківом, котрий приводить корінний вал в обертання за допомогою пасової передачі від електродвигуна.

Загальний вигляд лісопильної рами з позначенням складових частин наведено на рисунку 1.1.



1 – станина; 2 – вал корінний; 3 – шатун; 4 – рамка пильна; 5 – привод головний; 6 – гальмо; 7 – вальці нижні; 8 – привод верхніх вальців; 9 – ворота передні; 10 – ворота задні; 11 – механізм подачі; 12 – буксовка.

Рисунок 1.1 – Загальний вигляд лісопильної рами Р63-4Б

Для зменшення зсуву пил в підвісках (при установці ухилу пил) в конструкції лісопильної рами передбачене відхилення пильної рамки, що забезпечується конструкцією станини. Безперервна подача колоди або бруса здійснюється двома парами валів. Обертальний рух нижні вали отримують від мотор-редуктора, коробки швидкостей і ланцюгової передачі. За допомогою ланцюгової передачі обертання з нижніх валів передається на верхні. Верхні вали змонтовані у воротах і разом з ними можуть підніматися і опускатися.

Привод переміщення воріт знаходиться в їх верхній траверсі. Він складається з фланцевого електродвигуна, шестеренчатої пари та передачі гвинт-гайка.

Станина – суцільнозварна конструкція, що складається з швелерів і листової сталі. На станині монтуються механізми лісопильної рами.

Для зменшення зсуву пил в підвісках (при установці ухилу пил) в конструкції лісопильної рами передбачене відхилення пильної рамки, що забезпечується конструкцією станини. Безперервна подача колоди або бруса здійснюється двома парами валів. Обертальний рух нижні вали отримують від мотор-редуктора, коробки швидкостей і ланцюгової передачі. За допомогою ланцюгової передачі обертання з нижніх валів передається на верхні. Верхні вали змонтовані у воротах і разом з ними можуть підніматися і опускатися.

Привод переміщення воріт знаходиться в їх верхній траверсі. Він складається з фланцевого електродвигуна, шестеренчатої пари та передачі гвинт-гайка.

Станина – суцільнозварна конструкція, що складається з швелерів і листової сталі. На станині монтуються механізми лісопильної рами.

Корінний вал призначений для перетворення обертального руху в зворотньо-поступальний рух пильної рамки з поставом пил. Корінний вал встановлений на підшипниках кочення в станині рами. Він складається з валу і маховиків. Маховики посаджені на конусні поверхні валу. Один з маховиків одночасно є приводним шківом під клино-ременну передачу, а другий - гальмівним.

Шатуни призначені для з'єднання корінного вала з верхньої траверсою пильної рамки. Вони монтуються на підшипниках кочення на кривошипних пальцях корінного вала і цапфах верхньої траверси пильної рамки. Пильна рамка складається з верхньої та нижньої траверс, вертикальних стійок, повзунів і струбцин. У пильній рамці встановлюється за допомогою захоплень комплект рамних пил.

Головний привод, призначений для приведення в обертання корінного вала, складається з електродвигуна зі шківом, елатичної муфти, санчат і клино-пасової передачі. Гальмо служить для швидкої зупинки корінного вала лісопильної рами. Воно складається з рукоятки, системи важелів і сталевий стрічки з наклепанної на неї фрікційної стрічки, яка охоплює маховик корінного вала.

Буксовка, призначена для ручного провертання корінного вала, складається з важеля і собачок, зчеплених із зубами гальмівного шківа (маховика) корінного вала.

Нижні вали призначені для подачі колоди, що розпилюється, в пилораму. Вони складаються з переднього і заднього валів і ланцюгових передач між ними з натяжним роликом. Кожен з валів складається з валу та насаджених на нього секцій і змонтований в станині пилорами на підшипниках кочення.

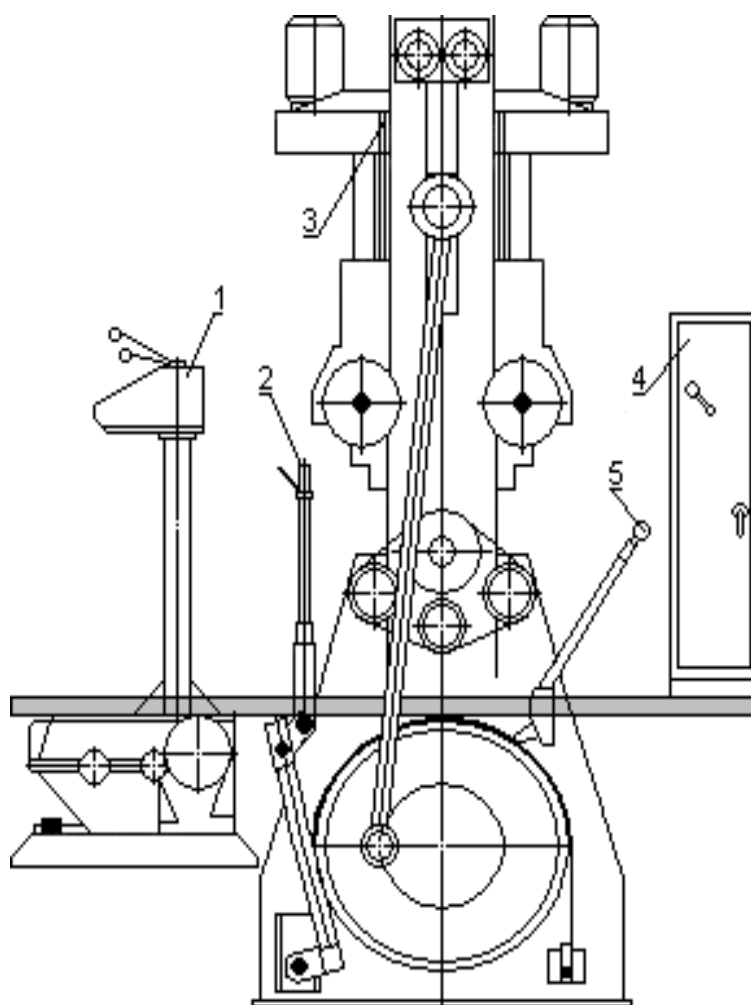
Огородження служать для закриття всіх рухомих частин лісопильної рами і забезпечують безпеку роботи на ній.

Привод верхніх валів призначений для передачі обертання з нижніх валів на верхні. Він складається з ланцюгової передачі, зірочок, регульованих напрямних і натяжних роликів.

Ворота (передні і задні) призначені для притиску колоди до нижніх валів і подачі його на лісопильну раму. Для зручності установки комплекту пил в пильну рамку ворота відкриваються. Вони складаються з ворітниць з валом, напрямних штанг і верхньої траверси, в якій змонтований привод підйому воріт. Ворітниця з валом підпружинена відносно гвинта приводу підйому воріт.

Привод підйому воріт служить для підйому і опускання ворітниць з валом по напрямних штангах, закріплених на станині лісопильної рами. Він складається з фланцевого електродвигуна, шестеренчатої пари та передачі гвинт-гайка. Гайка знаходиться всередині траверси, а гвинт нижнім кінцем закріплений на ворітниці. Привод подачі служить для приведення в обертання валів. Він складається з електродвигуна, редуктора, двох муфт, коробки швидкостей і ланцюгової передачі. Привод подачі суміщений з пультом керування лісопильною рамою. Перемикання подач виконується рукоятками.

Розташування органів керування лісопильної рами моделі Р63-4Б наведено на рисунку 1.2.

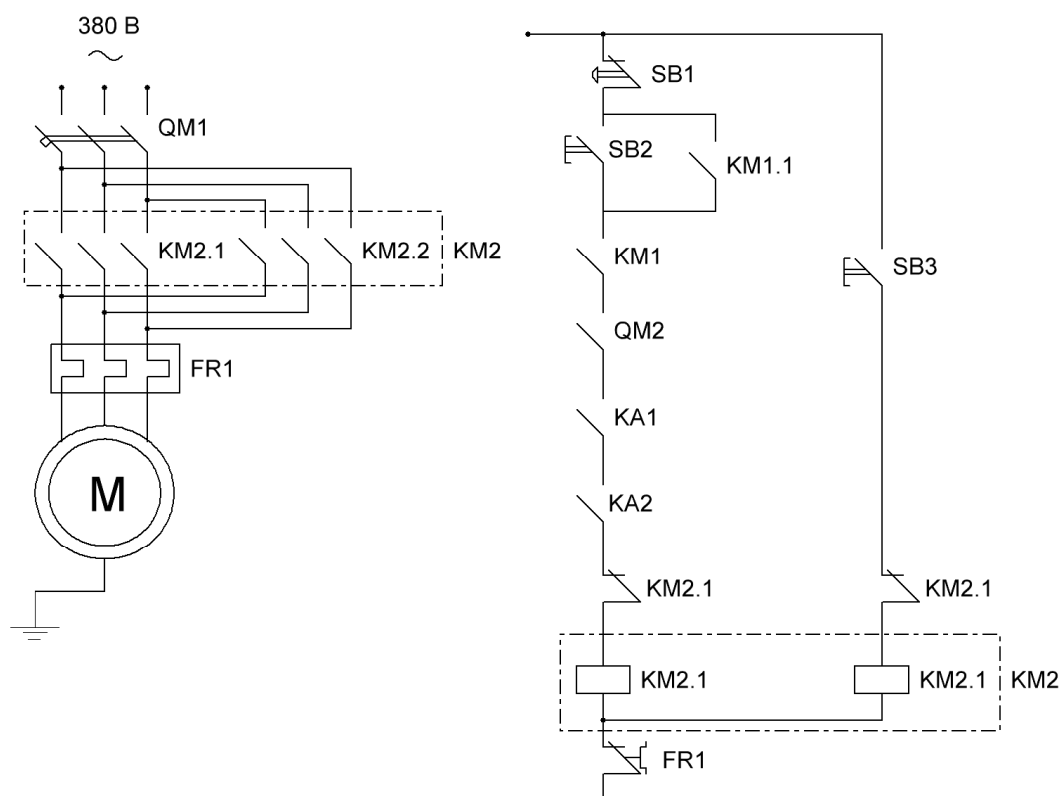


1 – пульт керування; 2 – рукоятка гальма; 3 – рукоятка запору воріт; 4 – ввідний вимикач; 5 – рукоятка буксовки.

Рисунок 1.2 – Розташування органів лісопилної рами моделі Р63-4Б

Діюча принципова схема електропривода подач пилорами Р63-4Б наведена на рисунку 1.3.

Натисканням кнопки SB2 оператор включає пускач КМ 2.1, який підключає електродвигун механізму подачі М4 до мережі. Здійснюється подача колоди вперед. При необхідності повернення колоди оператор натискає кнопку SB1 і зупиняє подачу, а потім натискає кнопку SB3, яка включає пускач КМ2.2, і механізм подачі повертає колоду.



М – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором 4АМС101.6; QM1 – автоматичний вимикач АЕ2043-200; QM2 – автоматичний вимикач АЕ2023-100; KM1 – магнітний пускач ПМА-5200; KM2 – магнітний пускач ПМЛ-150104; FR1 – реле електротеплове РТЛ-101204; SB1, SB2, SB3 – кнопочний пост ПКЕ-122-3; KA1, KA2 – проміжне реле РПЛ-12204

Рисунок 1.3 – Принципова електрична схема діючої системи керування приводом подачі лісопильної рами Р63-4Б

1.3 Постановка задачі на автоматизацію

Метою автоматизації є підвищення ефективності та безпеки роботи лісопильної рами. В наш час широко впроваджується спосіб регулювання частоти обертання вала двигуна, шляхом зміни частоти живлячої напруги на обмотках статора машини (система електроприводу ПЧ-АД). Дана система електроприводу дозволяє виконати всі вимоги пред'являються до електроприводу. Частотне регулювання асинхронного двигуна з допомогою перетворювача частоти (ПЧ) забез-

печує плавне регулювання частоти в необхідному діапазоні. Основні недоліки ПЧ – це складність у керуванні та дороговизна.

Найбільш поширеними з частотних методів регулювання швидкості асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором є скалярний і векторний метод керування.

При скалярному керуванні за певним законом змінюють амплітуду і частоту прикладеної до двигуна напруги. Зміна частоти живлячої напруги призводить до відхилення від розрахункових значень максимального і пускового моментів двигуна. Тому для підтримки необхідних робочих характеристик двигуна необхідно зі зміною частоти одночасно відповідно змінювати і амплітуду напруги.

Векторне керування дозволяє істотно збільшити діапазон керування, точність регулювання, підвищити швидкодію електроприводу. Цей метод забезпечує безпосереднє керування двигуном.

У зв'язку з тим, що немає необхідності підтримувати швидкість на валу двигуна з великою точністю, можливе застосування ПЧ зі скалярним законом управління.

Принцип скалярного керування частотно - регульованого асинхронного електроприводу базується на зміні частоти та поточних значенні модулів змінних асинхронного двигуна (напруг, магнітних потоків, потокозчеплень і струмів гілок двигуна). Керованість АД при цьому може забезпечуватись суспільним регулюванням або частоти f_1 та напруги U_1 , або частоти f_1 та струму I_1 обмотки статора. Перший спосіб керування прийнято трактувати як частотний, другий – як частотно - струмове керування.

Вибір способу та принципу керування визначається сукупністю статичних, динамічних і енергетичних вимог до асинхронного електроприводу.

Скалярний принцип частотного керування є найбільш поширеним в асинхронному електроприводі. Йому властиві технічна простота вимірювання і регулювання змінних АД, а також можливість побудови розімкнутих систем керування швидкістю.

Основним недоліком частотного керування за скалярним законом є складність реалізації бажаних законів регулювання швидкості і момента двигуна в динамічних режимах. Це пов'язано з достатньо складними електромагнітними процесами в АД.

Скалярне керування за частотою і струмом АД характеризується малим критичним ковзанням і постійністю критичного момента при постійності струму живлення АД і вимірюванні його частоти. Але в розімкнутих системах таке керування практично виключене, оскільки зі зростанням навантаження (ковзання) різко спадає магнітний потік АД і для забезпечення бажаних перевантажувальних властивостей АД за моментом необхідне помітне перевищення номінальних значень напруги живлення і струму статора. Тому для покращення експлуатаційних показників електромеханічної системи привода подачі пилорами використаємо замкнену систему керування за частотою і струмом.

2 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОДАЧІ ПИЛОРАМИ ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ

2.1 Розробка функціональної схеми електропривода подачі пилорами

Система керування електроприводом подач лісопильної рами забезпечує обертання виконавчого органа з заданою швидкістю шляхом керування швидкістю обертання асинхронного двигуна (АД).

При частотно-струмовому керуванні АД живиться від перетворювача частоти (ПЧ), що працює в режимі джерела струму. Функціональна схема системи ПЧ-АД при живленні від джерела струму на основі автономного інвертора наведена на рисунку 2.1. Подібний перетворювач реалізований на основі автономного інвертора струму, до складу якого входять керований випрямляч КВ, що забезпечує за рахунок від'ємного зворотного зв'язку за струмом навантаження (датчик струму ДС і регулятор струму РС) спільної з фільтрувальним дроселем Др режим керованого джерела постійного струму, і інвертора струму ІС, що виконує функцію формування необхідної частоти вихідного струму. Контур регулювання струму ПЧ, як правило, астатичний, і параметри його ПІ-регулятора визначають так само, як і для ПІ-регулятора струму в електроприводах постійного струму.

Відмітною особливістю ПЧ є можливість двостороннього обміну енергією між живлячею мережею і двигуном з нереверсивним КВ за рахунок зміни напрямку проти-ЕРС інвертора і збереження напрямку в ньому випрямленого струму.

Керування двигуном проводиться за допомогою сигналів завдання вихідного струму $U_{зс}$ і частоти $U_{зф}$ перетворювача ПЧ. Обидва сигнали, у свою чергу, залежать від загального сигналу керування U_K .

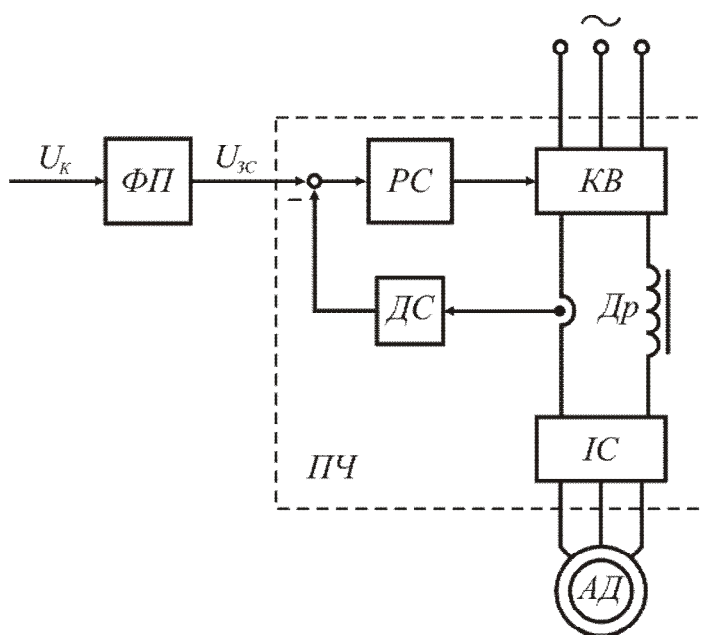


Рисунок 2.1 – Функціональна схема системи ПЧ – АД при живленні від джерела струму на основі автономного інвертора

При живленні АД від джерела струму внаслідок розмагнічуючої дії струму ротора магнітний потік АД помітно змінюється при зміні абсолютного ковзання. Тому для стабілізації магнітного потоку АД при зміні його навантаження в канал завдання струму ПЧ вводиться функціональний перетворювач ФП, що визначає завдання струму статора I_1 у функції абсолютного ковзання S_a . Залежність $I_1 = F(S_a)$ і пропорційна їй залежність $U_{3c} = \Phi(U_K)$ є нелінійними функціями (рисунок 2.2), які на робочих ділянках механічних характеристик АД відповідають умові $I_1^2 \cong S_a$. Криві цих залежностей симетричні щодо осі завдання струму, що визначається симетрією механічних характеристик АД у руховому і генераторному режимах його роботи. Часто при технічній реалізації ФП користуються лінійною апроксимацією залежності $I_1 = f(S_a)$ (штрихова лінія на рисунку 2.2). Тут значення $I_{1\max}$ і $U_{3c\max}$ визначають максимально допустимий струм статора і сигнал його завдання, а $I_{1\min}$ і $U_{3c\min}$ – струм холостого ходу АД і сигнал його завдання.

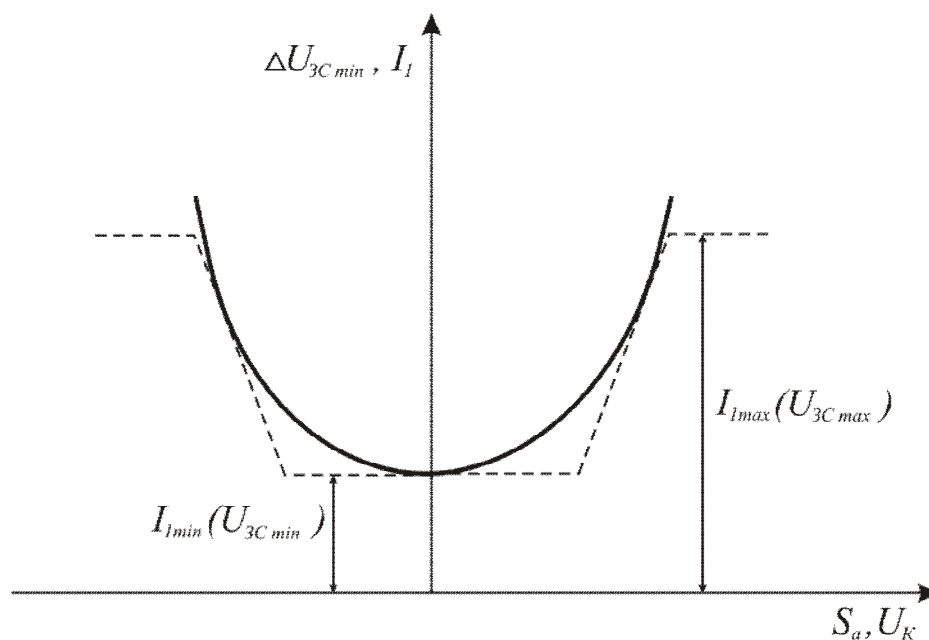


Рисунок 2.2 – Залежність струму статора від абсолютного ковзання АД

Скалярне керування за частотою і струмом АД характеризується малим критичним ковзанням і постійністю критичного моменту при постійності струму живлення АД і вимірюванні його частоти. Але в розімкнених системах таке керування практично виключене, оскільки зі зростанням навантаження (ковзання) різко спадає магнітний потік АД і для забезпечення бажаних перевантажувальних властивостей АД за моментом необхідне помітне перевищення номінальних значень напруги живлення і струму статора.

Відомі позитивні властивості АД при його живленні від джерела струму, такі як незалежність електромагнітного моменту АД від частоти і можливість при заданому струмі статора і абсолютному ковзанні, рівному критичному, забезпечити більший момент, ніж при живленні від джерела напруги, можуть бути реалізовані лише в замкнутій системі, що контролює абсолютне ковзання і струм двигуна в функції навантаження. Функціональна схема замкненої системи ПЧ-АД з частотно-струмовим керуванням представлена на рисунку 2.3. Джерело струму реалізоване на основі керуваного випрямляча (КВ), струм навантаження I_n якого задається вихідною напругою U_{PC} регулятора струму (РС), пропорційним різниці напруг U_{3C} на виході функціонального перетворювача (ФП) та U_{3ZC} датчика струму (ДС). Стабілізація швидкості АД забезпечується за рахунок регулятора швидкості (РШ), на

суматора Σ_2 пристрою завдання частоти ЗЧ інвертора струму ІС перетворювача частоти ПЧ буде сформований сигнал $U_c = U_{\phi_{чк}} + U_{III} \cong (\omega_{03} - \omega) + \omega = \omega_{03}$.

У результаті на виході ЗЧ буде сигнал завдання частоти вихідного струму ПЧ $U_{3f} \cong U_{3III} \cong \omega_{03}$, що визначає завдання синхронній швидкості АД.

Оскільки електромагнітний момент двигуна пропорційний квадрату струму обмотки статора ($M \cong I_1^2$), який, у свою чергу, пропорційний абсолютному ковзанню ($I_1^2 \cong S_a$), вихідний сигнал РШ пропорційний S_a і є сигналом завдання електромагнітного моменту АД. Тому вихідною напругою U_{BO} блоку обмеження БО на виході РШ можна впливати і на обмеження максимального моменту АД.

Перед пуском двигуна ($U_{3III} = 0, U_{PШ} = 0$) сигнал завдання частоти перетворювача $U_{3f} = 0$ і за рахунок характеристики ФП ($U_{3C\min} \neq 0$) в АД задається постійний струм, що забезпечує потік намагнічення і режим динамічного гальмування АД. Із збільшенням U_{3III} зростає сигнал завдання частоти, струм статора стає змінним із заданою частотою і двигун починає обертання під дією максимального моменту, встановленого сигналом U_{3III} . Збільшення швидкості відбуватиметься до тих пір, поки не порівнюються сигнали завдання і зворотного зв'язку за швидкістю двигуна. Після цього вихідний сигнал РШ за відсутності статичного навантаження на валу АД знов встановиться рівним нулю, але за рахунок позитивного зворотного зв'язку за швидкістю вже при $U_{3f} \neq 0$ потік холостого ходу АД буде при цьому створюватися змінним струмом $I_{1\min}$, що зображено на рисунку 2.2.

2.2 Опис та обґрунтування вибору електротехнічного обладнання автоматизованого приводу подач пилорами

У зв'язку із необхідністю покращення електромеханічних показників привода подач пилорами, окрім заміни релейно-контакторної системи керування на систему ПЧ-АД, необхідна заміна діючого асинхронного електродвигуна на асинхронний двигун загального призначення моделі АИР100L6. Заміна двигуна зумовлена не лише бажаним оновленням застарілого електротехнічного обладнання. Вона передбачає покращення електромеханічних показників привода подач за рахунок покращення показників роботи не лише системи керування електроприводом, а й покращення показників роботи безпосередньо двигуна. До того ж, заміна двигуна надає можливість економити на його обслуговуванні.

Конструктивне виконання двигуна за способом монтажу – IM1081 (на лапах з одним циліндровим кінцем валу), ступінь захисту – IP54. Технічні дані обраного двигуна наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні дані двигуна АИР100L6

Тип виконання двигуна	Номінальна потужність, кВт	Синхронна частота обертання, об/хв	Номінальне ковзання, %	ККД, %	cosφ	$\frac{I_{\text{печ.пуск}}}{I_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{печ.пуск}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{мин}}}{M_{\text{ном}}}$	Момент інерції, кг·м ²
АВР280М6	2,2	1000	5,5	81,5	0,74	6	1,9	2,2	1,6	0,02

Технічний ресурс двигуна – 40 000 годин, строк служби – 15 років.

Для модернізації електромеханічної системи привода подач лісопильної рами обираємо перетворювач частоти серії Altivar 71, призначений для керування асинхронними електродвигунами потужністю 0,37 – 500 кВт в різноманітних виробничих механізмах. Комплект обладнання для керування асинхронним короткозамкненим двигуном АИР100L6 потужністю 2,2 кВт включає в себе:

- перетворювач частоти ATV 71 WU22N4 з вбудованим фільтром електромагнітної сумісності;

- автоматичний вимикач GV2 L14;
- мережевий контактор LC1 D18.

Перетворювач частоти Altivar 71 (1) постачається з виносним терміналом (2) та програмним забезпеченням Power Suite (3), за допомогою якого можливо змінювати конфігурацію, проводити налагодження та налаштування параметрів роботи перетворювача (рисунок 2.4).

Беручи до уваги той факт, що модернізується електромеханічна система приводу подач окремої пилорами, а не цілої виробничої ділянки з лінійки верстатів, даний комплект обладнання доцільно установити в електричну шафу на місце демонтованої релейно - контакторної системи керування. Додаткове придбання окремої шафи є недоцільним, так як передбачає зайві матеріальні затрати.

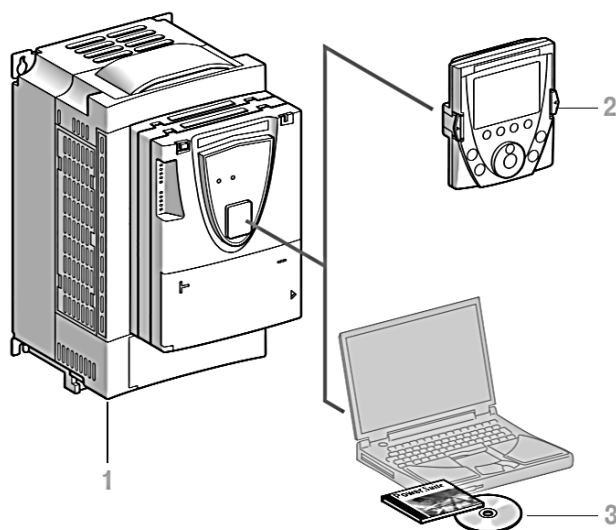


Рисунок 2.4 – Комплект поставки перетворювача частоти серії Altivar 71

Багатофункціональність перетворювача частоти серії Altivar 71 здатна підвищити продуктивність і гнучкість використання електричного двигуна. Даний перетворювач частоти здатний забезпечити наступні можливості при керуванні асинхронним двигуном приводу подач пилорами:

- отримання вихідної частоти до 1600 Гц;
- швидка керована зупинка при обриві мережі;
- захист двигуна від перенапруги;

- обмеження струмів;
- автоматичний повторний пуск з пошуком швидкості (підхват на ходу);
- керування при недостатньому рівні напруги мережі;
- екстрена зупинка.

Виносний графічний термінал, який кріпиться на передній панелі перетворювача частоти, встановлюється поверх термінала з 7-сегментними індикаторами, вбудованого в перетворювачі, що постачаються без виносного графічного терміналу. Складові частини та органи керування виносним графічним терміналом зображено на рисунку 2.5.



1 – графічний дисплей (8 строк, 240 x 160 пікселів); 2 – функціональні клавіші F1, F2, F3, F4, для виконання діалогових (прямий доступ, довідкова система, навігація) та прикладних (локальне/дистанційне керування, завдання швидкості); 3 – клавіша «STOP/RESET» для локального керування зупинкою двигуна, скидання несправностей; 4 – клавіша «RUN» локальне керування пуском двигуна; 5 – ручка навігатора (при натисканні – запис поточного значення, при обертанні – збільшення або зменшення значення, перехід на іншу строку); 6 – клавіша «FWD/REV» для зміни напрямку обертання двигуна; 7 – клавіша «ESC» для відмови від поточної уставки, параметра або меню для повернення до попереднього вибору.

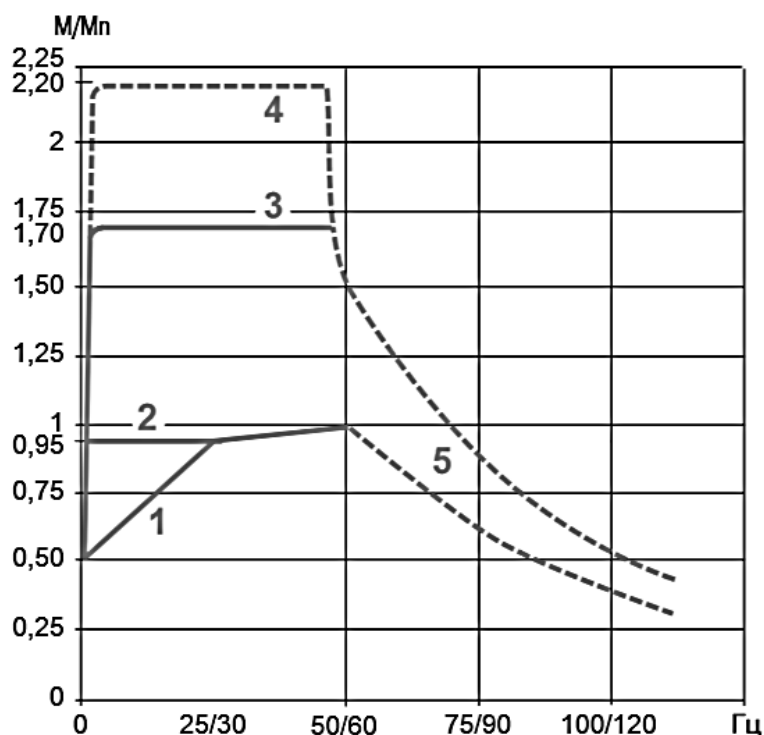
Рисунок 2.5 – Органи керування виносним графічним терміналом VW3 A1

Клавіші 3, 4 та 6 забезпечують локальне керування перетворювачем.

Типові характеристики моменту, наведені на рисунках 2.6 – 2.7, відповідають усталеному і перехідному перевантажувальним моментам для двигуна з природною та примусовою вентиляцією.

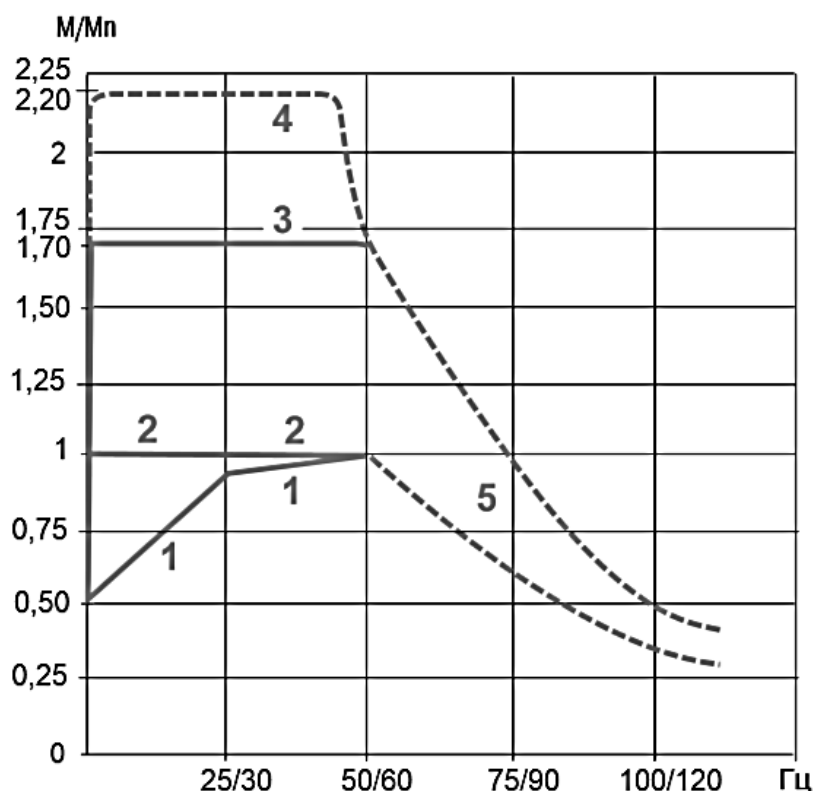
Перетворювач частоти Altivar 71 забезпечує тепловий захист двигуна, призначену для роботи двигунів із змінною швидкістю, з природною та примусовою вентиляцією. Перетворювач частоти розраховує тепловий стан двигуна навіть у випадку, коли двигун знаходиться під напругою.

Цей тепловий захист передбачений для максимальної температури навколишнього середовища поблизу двигуна 40°C . У випадку, якщо температура поблизу двигуна більше 40°C , необхідна безпосередній захист за допомогою терморезисторів, вбудованих в обмотки двигуна. Сигнали датчиків обробляються безпосередньо перетворювачем.



1 – корисний усталений момент двигуна з природною вентиляцією; 2 – корисний усталений момент двигуна з примусовою вентиляцією; 3 – перевантажувальний момент впродовж ≤ 60 с; 4 – перевантажувальний перехідний момент впродовж ≤ 2 с; 5 – момент на швидкості вище номінальної при постійній потужності.

Рисунок 2.6 – Характеристики моменту для електроприводу з розімкнутою системою



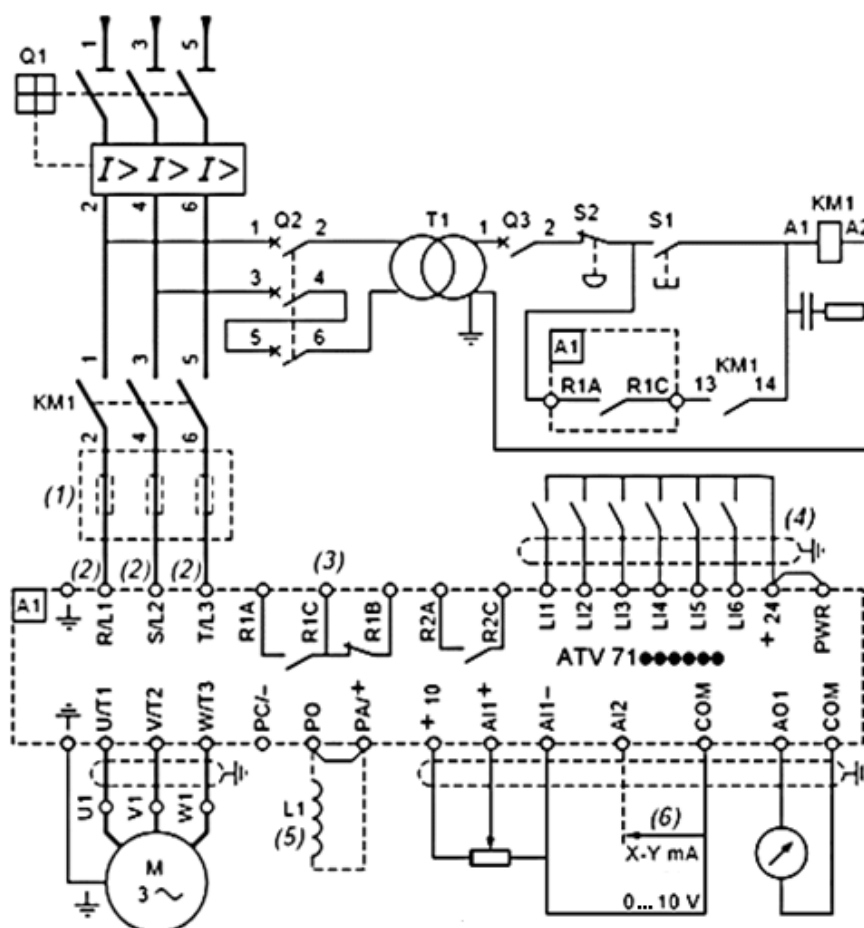
1 – корисний усталений момент двигуна з природною вентиляцією; 2 – корисний усталений момент двигуна з примусовою вентиляцією; 3 – перевантажувальний момент впродовж ≤ 60 с; 4 – перевантажувальний перехідний момент впродовж ≤ 2 с; 5 – момент на швидкості вище номінальної при постійній потужності.

Рисунок 2.7 – Характеристики моменту для електроприводу з замкненою системою

2.3 Розробка принципової схеми автоматизованого електропривода подачі пилорами

Принципова схема підключення перетворювача частоти ATV 71 WU22N4 за допомогою мережевого контактора наведена на рисунку 2.8.

Перетворювач частоти живиться від трьохфазної мережі напругою 380 В. Напруга на силові вводи подається через трьохфазний мережевий дросель.



A1 – перетворювач частоти ATV 71 WU22N4; KM1 – контактор LC1 D18; L1 – дросель постійного струму; Q1 – ввідний автоматичний вимикач; Q2 – автоматичний вимикач GV2 L14 зі струмом у 2 рази більшим від номінального струму первинної обмотки T1; Q3 – автоматичний вимикач GV2 CB05; S1, S2 – кнопки XB4 B або XB5 A; T1 – трансформатор 100ВА із вторинною обмоткою на напругу 220 В; (1) – трьохфазний мережевий дросель; (2) – силові вводи перетворювача частоти; (3) – контакти реле несправності; (4) – підключення загального виводу дискретних входів; (5) – додатковий дросель постійного струму; (6) – аналоговий вхід

Рисунок 2.8 – Принципова схема підключення ПЧ ATV 71 WU22N4 за допомогою мережевого контактора LC1 D18

Перетворювач частоти ATV 71 WU22N4 оснащений реле несправності для дистанційного контролю стану перетворювача. Замість перемички між входами РО та РА/+ включається додатковий дросель постійного струму L1. Аналоговий вхід конфігурується за допомогою програмного забезпечення за струмом (0 – 20 мА), або за напругою (0 – 10 В).

3 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОДАЧІ ПИЛОРАМИ

3.1 Розробка структурної схеми системи керування

Для побудови структурної схеми електроприводу, зображеного на рисунку 2.3, визначимо передаточні функції його окремих ланок і умови, при яких момент АД однозначно залежить від абсолютного ковзання.

Передаточна функція між заданою швидкістю ідеального холостого ходу АД ω_{03} і сигналом завдання частоти на вході ПЧ U_{zf} , $W_f(p)$, c^{-1} ,

$$W_f(p) = \Delta\omega_{03} / U_{zf} = 2\pi k_f / \Delta U_{zf} = 2\pi k_f / p_{\Pi}, \quad (3.1)$$

де k_f – передаточний коефіцієнт ПЧ,

$$k_f = \Delta f_z / \Delta U_{zf} = f_{ном} / \Delta U_{zfном}.$$

Відповідно до рис. 2.3, сигнал завдання частоти на вході ПЧ, ΔU_{zf} , В,

$$\Delta U_{zf} = k_{3ч} (k_{ФЧК} \cdot \Delta U_{рш} + k_{ПП} \cdot k_{33} \cdot \Delta\omega), \quad (3.2)$$

де $k_{3ч}, k_{ФЧК}, k_{ПП}, k_{33}$ – передаточні коефіцієнти пристроїв ЗЧ, ФЧК, ПП і ланцюга зворотного зв'язку за швидкістю АД.

Коефіцієнт пристрою завдання частоти, $k_{3ч}$,

$$k_{3ч} = \Delta U_{zf} / \Delta U_{зш}.$$

Коефіцієнт формувача частоти ковзання, $k_{\phi\text{чК}}$,

$$k_{\phi\text{чК}} = \Delta U_{\phi\text{чК}} / \Delta U_{\text{зш}} .$$

Коефіцієнт погоджувального пристрою, $k_{\text{ПП}}$,

$$k_{\text{ПП}} = \Delta U_{\text{ПП}} / \Delta U_{\text{зш}} .$$

Коефіцієнт зворотнього зв'язку, $k_{\text{зз}}$,

$$k_{\text{зз}} = \Delta U_{\text{зз}} / \Delta \omega .$$

При живленні АД від джерела струму його передаточна функція відносно змін електромагнітного моменту і різниці змін заданій швидкості ідеального холостого ходу і поточного значення швидкості, $W_M(p)$, с^{-1} ,

$$W_M(p) = \Delta M / (\Delta \omega_{0\text{з}} - \Delta \omega) = \beta_{\text{ж}} / (T_{\text{EC}} p + 1),$$

де $\beta_{\text{ж}}$ – жорсткість механічної характеристики;

T_{EC} – еквівалентна електромагнітна постійна часу, с.

Жорсткість механічної характеристики, $\beta_{\text{ж}}$,

$$\beta_{\text{ж}} = 2M_{\text{KC}} / (\omega_{0\text{ном}} \cdot S_{\text{KC}}),$$

Еквівалентна електромагнітна постійна часу, T_{EC} , с,

$$T_{\text{EC}} = 1 / \omega_{0\text{ел.ном}} \cdot S_{\text{KC}} ,$$

де M_{KC} – критичний момент АД при живленні його від джерела струму, Н·м;

S_{KC} – критичне ковзання АД при живленні його від джерела струму.

Критичне ковзання АД при живленні його від джерела струму, S_{KC} ,

$$S_{KC} = R'_2 / x_{\mu H} + x'_{2H} ,$$

де $x_{\mu H}$ – індуктивний опір ланцюгу намагнічення, Ом;

x'_{2H} – індуктивний опір обмотки ротора, приведений до ланцюга статора АД

при $\omega_{ном}$, Ом;

R'_2 – активний опір обмотки ротора, приведений до ланцюга статора АД при

$\omega_{ном}$, Ом.

З урахуванням виразів 3.1 та 3.2 можна записати:

$$\begin{aligned} (\Delta\omega_{03} - \Delta\omega) &= (2\pi k_f / p_\Pi) \cdot k_{3\chi} (k_{\Phi\chi K} \cdot \Delta U_{P\Pi\Pi} + k_{\Pi\Pi} \cdot k_{33} \cdot \Delta\omega) - \Delta\omega = \\ &= (2\pi k_f / p_\Pi) \cdot k_{3\chi} \cdot k_{\Phi\chi K} \cdot \Delta U_{P\Pi\Pi} + (2\pi k_f / p_\Pi) \cdot k_{\Pi\Pi} \cdot k_{33} \cdot \Delta\omega - \Delta\omega . \end{aligned}$$

Тоді при виборі передавальних коефіцієнтів функціональних пристроїв електроприводу, з умови $(2\pi k_f / p_\Pi) \cdot k_{\Pi\Pi} \cdot k_{33} = 1$, отримаємо рівняння:

$$(\Delta\omega_{03} - \Delta\omega) = k_M \cdot \Delta U_{P\Pi\Pi} ,$$

де k_M – коефіцієнт моменту двигуна.

Коефіцієнт моменту двигуна, k_M ,

$$k_M = (2\pi k_f / p_\Pi) \cdot k_{3\chi} \cdot k_{\Phi\chi K} .$$

Звідси передаточна функція АД між зміною електромагнітного моменту АД і зміною сигналу на виході регулятора швидкості, $W_M(p)$, s^{-1} ,

$$W_M(p) = \Delta M / \Delta U_{PШ} = k_M \cdot \beta_{Ж} / (T_E p + 1) \quad (3.3)$$

Відповідна виразу 3.3 структурна схема лінеаризованої системи з частотно-струмовим керуванням представлена на рис. 3.1. Тут T_{MC} – електромеханічна постійна часу АД при живленні від джерела струму.

Електромеханічна постійна часу АД при живленні від джерела струму, T_{MC} , с,

$$T_{MC} = J / \beta_{Ж}.$$

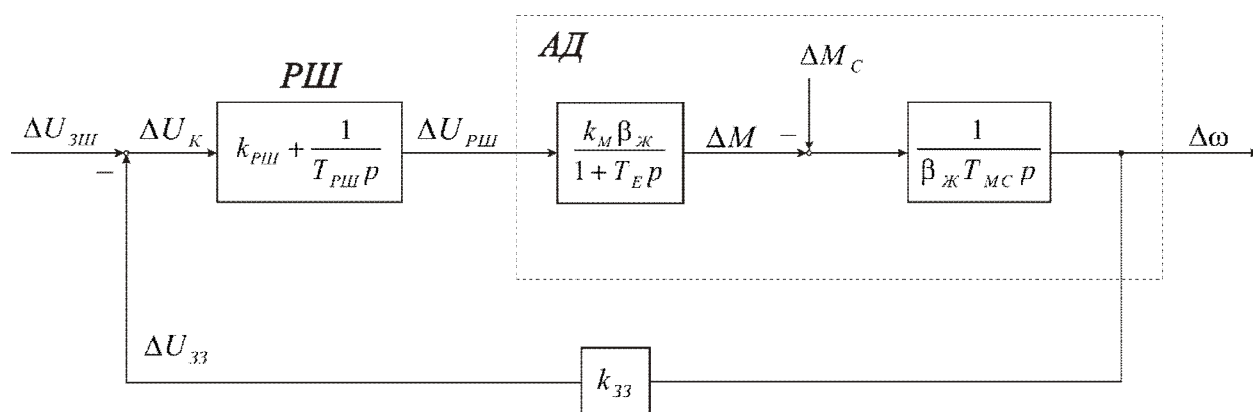


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи ПЧ-АД з частотно-струмовим керуванням

Передаточна функція регулятора швидкості, $W_{PШ}(p)$, с⁻¹,

$$W_{PШ}(p) = \Delta U_{PШ} / \Delta U_{к}.$$

Результуюча передаточна функція об'єкту регулювання, який містить ПЧ і АД, $W_o(p)$, с⁻¹,

$$W_o(p) = \Delta \omega / \Delta U_{PШ} = k_M / [(T_{EC} p + 1) T_{MC} p].$$

Якщо віднести постійну T_{EC} до малої некомпенсуючої постійної часу, тобто $T_{\mu} = T_{EC}$, то при налагодженні електроприводу на модульний оптимум передаточна функція регулятора швидкості, $W_{PII}(p)$, s^{-1} ,

$$W_{PII}(p) = T_{MC} / (a_{\mu} T_{\mu} k_{33} k_M) = k_{PII}.$$

При подібному налаштуванні з пропорційним РШ для приводу, а також у зв'язку з тим, що електромеханічна постійна часу АД при живленні від джерела струму менше, ніж при живленні від джерела напруги, значення k_{PII} виходить невеликим. У результаті результуюча жорсткість механічної характеристики приводу в замкнутій системі невисока. Реалізувати вищу точність можливо при настроюванні приводу на симетричний оптимум з ПІ-регулятором швидкості.

Постійна часу інтеграції пропорційної частини РШ, T_{PII} , с,

$$T_{PII} = 2 a_{\mu} T_{\mu} / k_{PII},$$

де k_{PII} - коефіцієнт передачі пропорційної частини РШ, k_{PII} ,

$$k_{PII} = T_{MC} / (a_{\mu} T_{\mu} k_{33} k_M).$$

3.2 Математичний опис та розрахунок елементів системи керування

Структурна схема системи керування електроприводом подач лісопильної рами Р63-4Б наведено на рисунку 3.2.

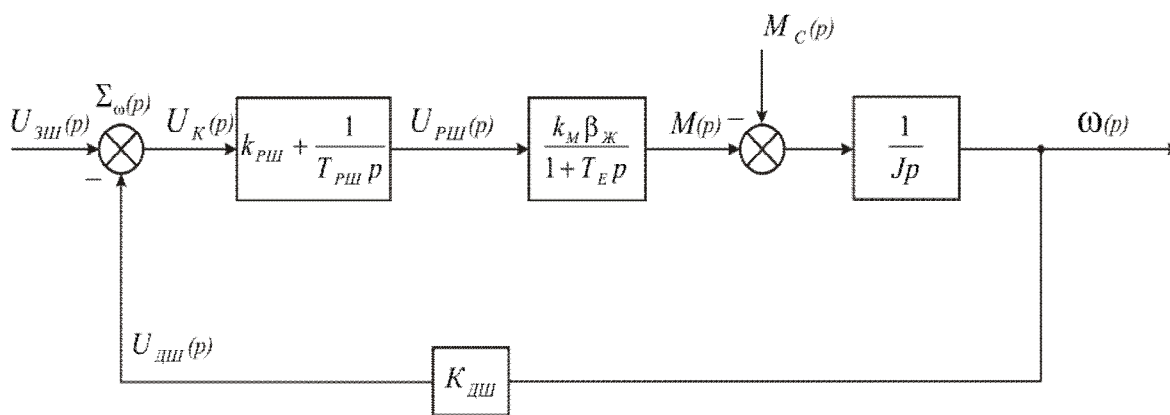


Рисунок 3.2 – Структурна схема системи керування електроприводом подач лісопильної рами Р63-4Б

Передаточна функція АД між зміною електромагнітного моменту АД і зміною сигналу на виході РШ має вигляд, $W_M(p)$,

$$W_M(p) = \Delta M / \Delta U_{PШ} = k_M \cdot \beta_J / (T_E p + 1),$$

де β_J – жорсткість механічної характеристики двигуна;

$\omega_{0н}$ – номінальна кутова частота обертання двигуна, рад/с;

k_M – коефіцієнт моменту двигуна;

M_n – номінальний момент двигуна, Н·м;

T_E – еквівалентна електромагнітна постійна часу, с;

$\omega_{0ел.н}$ – кутова швидкість електромагнітного поля двигуна, рад/с.

Для розрахунку перехідних характеристик системи використаємо початкові дані двигуна, що наведені у таблиці 2.1.

Критичне ковзання, S_κ ,

$$S_\kappa = S_n \cdot \frac{\left[k_{\max} + \sqrt{(k_{\max})^2 - [1 - 2 \cdot S_n \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)]} \right]}{[1 - 2 \cdot S_n \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)]},$$

де $k_{\max}$ – кратність максимального моменту, $k_{\max} = 2,1$;

β – модуль жорсткості в межах від 0,6 до 2,5, $\beta = 1,3$,

$$S_{\kappa} = 0,055 \cdot \frac{\left| 2,2 + \sqrt{(2,2)^2 - [1 - 2 \cdot 0,055 \cdot 1,3 \cdot (2,2 - 1)]} \right|}{[1 - 2 \cdot 0,055 \cdot 1,3 \cdot (2,5 - 1)]} = 0,279.$$

Синхронна кутова швидкість, ω_0 , рад/с,

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60},$$

де n_0 – синхронна частота обертання, об/хв.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1000}{60} = 104,72 \text{ рад/с.}$$

Номінальна кутова швидкість, ω_n , рад/с,

$$\omega_n = (1 - S_n) \cdot \omega_0,$$

$$\omega_n = (1 - 0,055) \cdot 104,72 = 98,96 \text{ рад/с.}$$

Номінальний момент, M_n , Нм,

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n},$$

$$M_n = \frac{2200}{98,96} = 22,231 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Знайдемо максимальний момент двигуна, $M_{\max}$, Н·м,

$$M_{\max} = k_{\max} \cdot M_n,$$

$$M_{\max} = 2,2 \cdot 22,231 = 48,909 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальний сигнал керування електроприводом, $u_{3.c.ном}$, В,

$$u_{3.c.ном} = 24 \text{ В}.$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку, $k_{3.3}$, В·с/рад,

$$k_{3.3} = \frac{u_{3.c.ном}}{\omega_n},$$

$$k_{3.3} = \frac{24}{98,96} = 0,243 \text{ В} \cdot \text{с/рад}.$$

Сигнал керування регулятором швидкості, $u_{p.ш.}$, В,

$$u_{p.ш.} = 24 \text{ В}.$$

Коефіцієнт моменту двигуна, k_M ,

$$k_M = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p_1 \cdot u_{p.ш.}},$$

де f – частота живлячої мережі, Гц, $f = 50 \text{ Гц}$;

p_1 – кількість пар полюсів, $p_1 = 6$,

$$k_M = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 24}{6 \cdot 24} = 2,182.$$

Кутова швидкість обертання магнітного поля при номінальній частоті живлення, $\omega_{0.эл}$, рад/с,

$$\omega_{0.эл} = 2 \cdot \pi \cdot f,$$

$$\omega_{0.эл} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314,159 \text{ рад/с.}$$

Еквівалентна електромагнітна постійна часу, T_E , с,

$$T_E = \frac{1}{\omega_{0.эл} \cdot S_\kappa},$$

$$T_E = \frac{1}{314,159 \cdot 0,279} = 0,011 \text{ с.}$$

Знайдемо жорсткість механічної характеристики, $\beta_{ж}$, Н·м/с⁻¹,

$$\beta_{ж} = \frac{2M_{\max}}{(\omega_n \cdot S_\kappa)},$$

$$\beta_{ж} = \frac{2 \cdot 48,909}{98,96 \cdot 0,279} = 3,542 \text{ Н·м/с}^{-1}.$$

Тоді передаточна функція двигуна, $W_M(p)$, с⁻¹,

$$W_M(p) = \frac{2,182 \cdot 3,542}{0,011p + 1},$$

Електромеханічна постійна часу двигуна, T_M , с,

$$T_M = \frac{J}{\beta_{ж}} \text{ с},$$

де J кг·м² – момент інерції двигуна, кг·м².

$$T_M = \frac{0,02}{3,542} = 5,646 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Некомпенсуєма постійна часу, T_μ , с,

$$T_\mu = T_E,$$

$$T_\mu = 0,011 \text{ с}.$$

Коефіцієнт регулятора швидкості при налагодженні на модульний оптимум, k_{PII} ,

$$k_{PII} = \frac{T_M}{(a_\mu T_\mu k_{33} k_M)},$$

де a_μ – коефіцієнт для модульного оптимуму, $a_\mu = 2$;

k_{PII} – коефіцієнт передачі пропорційної частини регулятора швидкості,

$$k_{PII} = \frac{5.646 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,011 \cdot 0,243 \cdot 2,182} = 0,468.$$

Знайдемо постійну часу інтеграції регулятора швидкості, T_{PII} , с,

$$T_{PII} = \frac{2 \cdot a_{\mu} \cdot T_{\mu}}{k_{PII}},$$

$$T_{PII} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,011}{0,468} = 0,098 \text{ с.}$$

Тоді передаточна функція регулятора швидкості, $W_{PII}(p)$, с⁻¹,

$$W_{PII}(p) = 0,468 + \frac{1}{0,098p} \text{ с}^{-1}$$

Момент статичного навантаження M_c при сталому режимі відповідає номінальному моменту двигуна $M_{ном}$, тобто $M_c = M_{ном} = 22,231 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

4 РОЗРАХУНОК ТА ПОБУДОВА ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОДАЧІ ПИЛОРАМИ

4.1 Побудова перехідного процесу системи керування приводом подач пилорами

На підставі структурної схеми системи, яку зображено на рисунку 4.1, для дослідження динамічних характеристик системи керування електроприводом (СКЕП) подачі пилорами, та відповідно до математичного опису будуюмо математичну модель СКЕП з використанням пакету програм Simulink MATLAB. Структурна схема замкненої системи з частотно-струмовим керуванням в середовищі MATLAB зображена на рисунку 4.1.

Регулятор швидкості має розраховані параметри, k_{PII} , T_{PII} , с,

$$k_{PII} = 0,468 ,$$

$$T_{PII} = 0,098 \text{ с.}$$

Щоб забезпечити плавність пуску проведемо налагодження регулятора швидкості. Для цього змінимо значення T_{PII} .

$$T_{PII} = 0,196 \text{ с.}$$

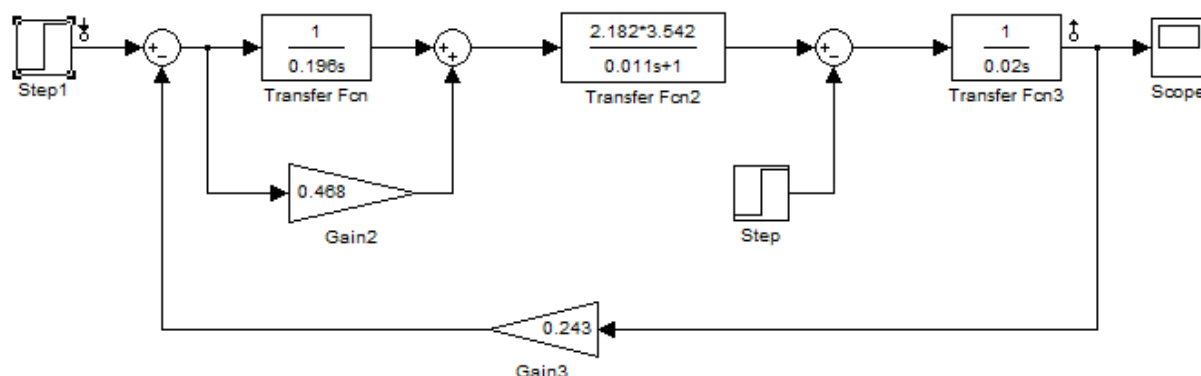


Рисунок 4.1 – Структурна схема системи у середовищі MATLAB

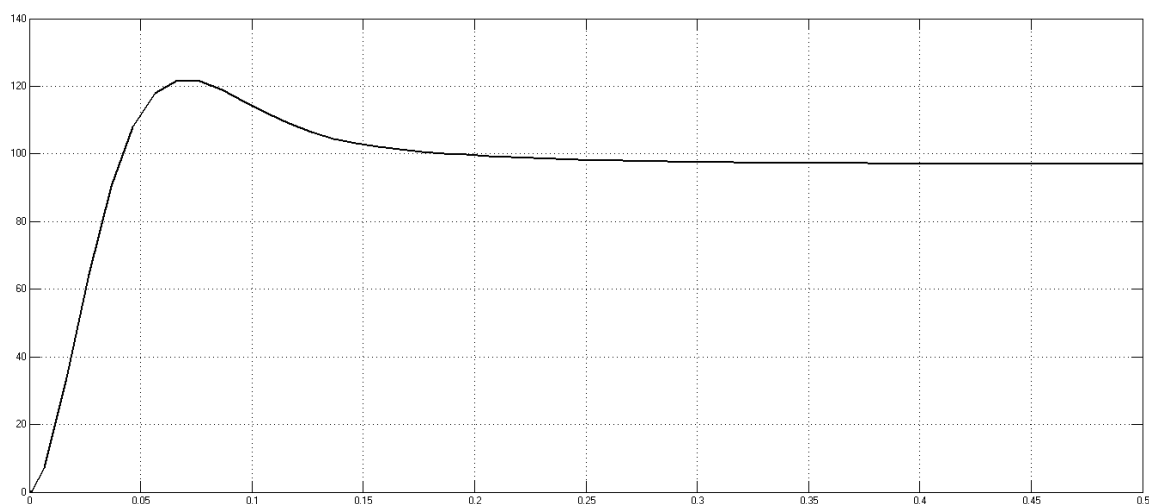


Рисунок 4.2 – Графік перехідного процесу системи

4.2 Аналіз перехідного процесу системи керування приводом подач пило-рами

Для оцінки якісних показників роботи САК в динамічних режимах аналізується її реакція на ступінчасту одиничну дію (рисунок 4.3). При цьому перехідна характеристика повинна знаходитися в межах заданої області, параметри якої визначають вимоги технологічного агрегату. Виходячи з параметрів перехідної характеристики, можна визначити реальні запаси стійкості САК по модулю і фазі.

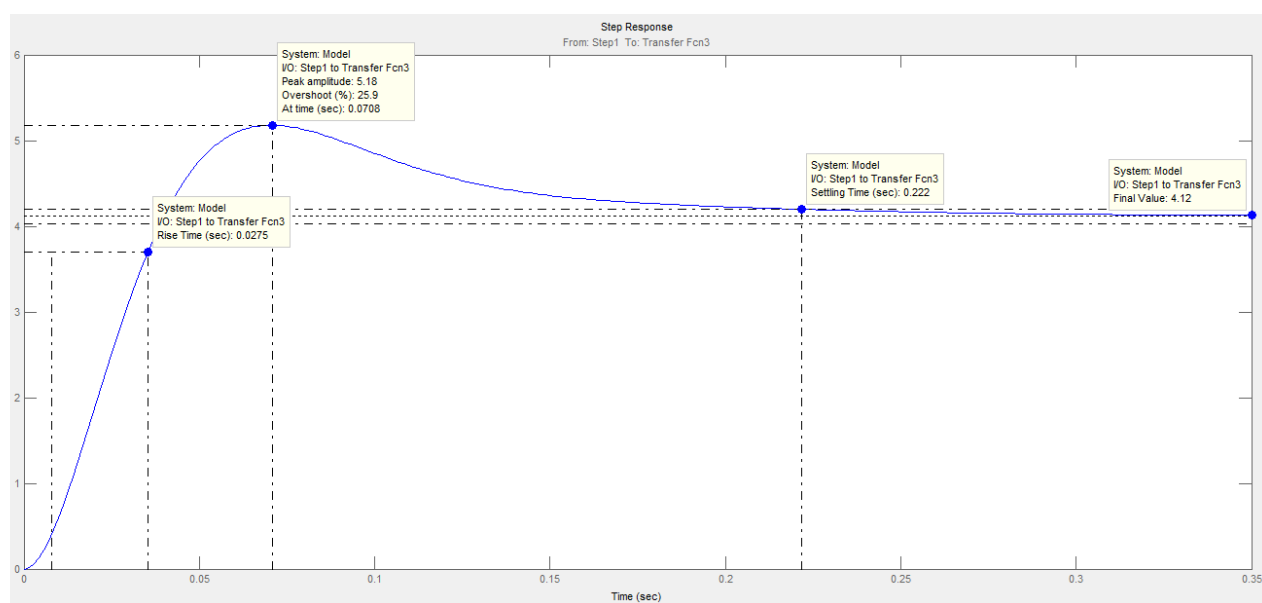


Рисунок 4.3 – Перехідна характеристика САК при заданих параметрах

Перехідна характеристика оцінюється сукупністю параметрів, які називаються показниками якості. До них відносяться:

- перерегулювання σ – відношення максимального відхилення керованої змінної щодо її сталого значення в напрямі, протилежному початковому відхиленню;
- коливальність μ – число максимумів або мінімумів перехідної характеристики за час регулювання;
- тривалість перехідного процесу t_n – це час, після закінчення якого відхилення керованої змінної щодо сталого значення стає і залишається по абсолютній величині менше заданого значення Δ , визначуваного вимогами, що пред'являються до САК;
- час досягнення першого максимуму $t_{\max}$ – момент часу, в який керована змінна досягає свого максимального значення;
- час встановлення $t_{\text{пmax}}$ – проміжок часу після закінчення якого керована змінна вперше досягає свого сталого значення;
- частота власних коливань САК.

Запас стійкості САК оцінюють по величині перерегулювання, σ , %,

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y_{\infty}}{y_{\infty}} 100\% .$$

Швидкодію САК оцінюють за часом закінчення перехідного процесу t_n при заданій допустимій помилці (трубці), Δ , %,

$$\Delta \in 5; 2,5; 1,5; 0,5; \dots [\%] \text{ від } y_{\infty} .$$

Частоту одиничного посилення розімкненої системи $\omega_{\text{ср}}$ можна оцінити по частоті коливань перехідної функції.

При синтезі САК використовують область допустимих відхилень регульованої величини.

Час наростання вихідної координати САК обмежений допустимим прискоренням координат і граничними коливальними режимами ($t_{\min}$) та необхідною швидкістю ($t_{\max}$).

Аналізуючи отриманий перехідний процес, отримуємо наступні значення показників якості:

- перерегулювання $\sigma = 25,9\%$;
- час перехідного процесу $t_{\Pi} = 0,222$ с.

У результаті поведеного дослідження динаміки системи керування електроприводом подач лісопильної рами Р63-4Б визначили такі параметри на налаштування регулятора швидкості, при яких система має необхідні показники якості керування.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Загальні положення

Термін «охорона праці» вживається в двох значеннях: в широкому його розумінні спеціальному. При вживанні терміну «охорона праці» в широкому розумінні, до його поняття відносять ті гарантії для працівників, що передбачають усі норми трудового законодавства, наприклад, норми, що забороняють власнику звільняти працівників з роботи тоді, коли немає підстав, передбачених статтями 40 та 41 Кодексу Законів про Працю України. Ці норми становлять надзвичайно важливу гарантію, спрямовану на охорону трудових прав працюючих.

Проте термін «охорона праці» в чинному трудовому законодавстві вживається не в такому широкому, значенні цих слів, а в більш вузькому. У вузькому значенні під охороною праці розуміється сукупність заходів щодо створення безпосередньо в процесі роботи нормальних та безпечних технічних і санітарно-гігієнічних умов для працівників.

Базовими нормативними актами в галузі охорони праці є Кодекс законів про працю України (КЗпП), Закон України «Про Охорону Праці» та Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності».

Визначення поняття охорони праці дається в статті 1 Закону України "Про Охорону Праці". Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці. В поняття охорони праці входять і всі ті заходи, що спеціально призначені для створення

особливих полегшених умов праці для жінок і неповнолітніх, а також працівників зі зниженою працездатністю.

З охороною праці тісно пов'язана також низка правових норм, що відносяться до інших галузей права України. Це норми цивільного права, що встановлюють майнову відповідальність при ушкодженні здоров'я або смерті громадянина, норми адміністративного права, що визначають адміністративну відповідальність і порядок притягнення до неї громадян органами охорони праці, норми кримінального права, що встановлюють відповідальність при вчиненні злочину у галузі охорони праці і техніки безпеки.

Ці правові норми хоча формально й виходять за межі трудового права, за своїм призначенням безпосередньо спрямовані на забезпечення безпечних і здорових умов праці.

Тому правове регулювання охорони праці охоплює розробку і прийняття загальних норм охорони праці, правил техніки безпеки і виробничої санітарії, проведення профілактичних заходів, спрямованих на створення сприятливих умов праці, що попереджують виробничий травматизм та професійні захворювання, створення сприятливих умов праці і забезпечення її охорони на діючих підприємствах в процесі виконання працівниками своїх трудових обов'язків, систематичне поліпшення і оздоровлення умов праці безпосередньо з участю самих трудових колективів, розробку додаткових заходів щодо охорони праці окремих категорій працюючих - жінок, неповнолітніх та осіб зі зниженою працездатністю.

5.2 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів, що впливають на людину при експлуатації лісопильної рами

Найбільш популярні в будівництві пиломатеріали виробляються на пилорамах різної потужності. При високій продуктивності обладнання пилорами відно-

сяться до джерел підвищеної виробничого травматизму. Єдиний надійний спосіб зниження кількості травм і аварій при експлуатації такого обладнання - точне дотримання всіма співробітниками правил техніки безпеки на виробництві. Загальний перелік небезпечних і шкідливих факторів на такому виробництві досить великий. У нього включаються як небезпеки від травмування ріжучим інструментом, механічні травми від рухомих і обертових частин машин і механізмів, так і загальні для багатьох виробництв травми спини при високих фізичних навантаженнях, пошкодження органів зору та дихання від пилу і стружки, падіння з висоти різних вантажів і заготовок, травми при підйомі важких предметів.

Ще до початку робіт всі співробітники повинні вивчити принципи роботи та інструкції по експлуатації діючого устаткування, правила та порядок складування заготовок і готової продукції, принципи пошуку і технологію усунення неполадок, правила пожерти безпеки на виробництві, внутрішній трудовий розпорядок і систему організації робіт.

Потрібно відразу ж враховувати, що неполадки в електричних установках і устаткуванні працівники самостійно знаходити і усувати не повинні. Для забезпечення безпеки праці будь-яка пилорама повинна забезпечувати реверсивну подачу за рахунок своєї конструкції. Для пилорам з безперервною подачею матеріалу обладнуються дистанційним управлінням вмикання-вимикання подачі.

У процесах деревообробки можлива дія наступних небезпечних і шкідливих виробничих факторів:

- рух машин і механізмів, незахищених рухомих елементів обладнання, що пересуваються, виробів, заготовок, матеріалів;
- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищена або знижена температура повітря робочої зони;
- підвищена температура поверхні обладнання;
- підвищені рівні шуму і вібрації на робочому місці;

- підвищена вологість повітря робочої зони;
- небезпечний рівень напруги в електричному ланцюзі;
- підвищеного рівня статичної електрики;
- підвищений рівень електромагнітних випромінювань;
- недостатня освітленість робочої зони.

Рівні небезпечних і шкідливих виробничих факторів у виробничих приміщеннях і на робочих місцях деревообробних підприємств не повинні перевищувати гранично допустимих значень, передбачених діючими санітарними нормами проектування промислових підприємств, а також гігієнічними нормами.

Атмосферне повітря, потрапляючи в виробничі приміщення забруднюється домішками шкідливих речовин, що утворюються в процесі виробництва. Потрапляючи в організм людини при диханні, а також через шкіру або стравохід, такі речовини можуть зробити шкідливий вплив. Погіршення здоров'я людини, причиною якого є низька якість повітря приміщень, може проявитися появою великого набору гострих і хронічних симптомів і в формі множини специфічних захворювань.

Основною забруднюючою речовиною на деревообробних підприємствах є пил. Пил у повітрі утворює аерозолі, скупчення осілого пилу - аерогелі.

Шкідливий вплив пилу на організм людини залежить від кількості пилу, що потрапляє в організм людини через дихальні шляхи, ступеня її дисперсності, від форми частинок пилу, від хімічного складу і розчинності пилу.

Із зменшенням розмірів пилових частинок збільшується їх проникаюча здатність до органів дихання. При цьому знижується їх механічна подразнююча дія і головною стає хімічна активність. Дрібні пилові частки здатні хімічно впливати на біологічне середовище організму завдяки їх великій питомій поверхні.

Токсичні властивості деревини визначаються змістом так званих побічних речовин – дубильних смол, ефірних масел, мінеральних речовин, пектинів, жирів. Їх зміст залежить від виду, місця зростання пори року і віку дерева.

На деревообробних підприємствах утворюється пил, який не володіє здатністю добре розчинятися в рідких середовищах організму, але може впливати на організм, що викликає роздратування шкіри, очей, вух, ясен та алергічні реакції.

Вплив деревного пилу на працівника може призвести до різного роду захворювань органів дихання, шкірних покривів і очей. Тривала робота в повітряному середовищі, що містить деревний пил, може привести до розвитку у працюючого пневмоконіозу і пилового бронхіту, які пояснюються як результат механічного та хімічного впливу пилу на органи дихання.

Пневмоконіози є загальним хронічним захворюванням організму з переважним ураженням легень. Зміни в органах дихання починаються з верхніх дихальних шляхів. Пил, проникаючи в легені, викликає їх захисну реакцію: відбувається стиснення легенів, зменшується робочий об'єм, дихання стає частим і поверхневим. В результаті зменшується збагачення артеріальної крові киснем, розвивається киснева недостатність. Ранніми ознаками пневмокониоза є підвищена стомлюваність і загальна слабкість, які в міру розвитку хвороби прогресують і призводять до втрати працездатності.

5.3 Розрахунок освітленості виробничого цеху

У деревообробному (лісопильному) цеху необхідно організувати змішане освітлення, тобто сполучення природного і штучного освітлення. Природне освітлення створюється бічним освітленням через вікно. Штучне освітлення використовується при недостатньому природному освітленні. У даному приміщенні використовується загальне штучне освітлення.

Розрахунок його здійснюється по методу світлового потоку з урахуванням потоку, відбитого від стін і стелі.

Довжина $A = 51$ м, ширина $B = 22$ м, висота $H = 5$ м. Висота робочої поверхні $h_p = 1,2$ м. Для освітлення використовується світильник ЛСП-02. Мінімальна освітленість люмінесцентної лампи по нормах $E_{\min} = 200$ лк. Коефіцієнт відображення стелі $\rho_{\text{п}} = 70\%$, стін $\rho_{\text{с}} = 50\%$, робочої поверхні $\rho_p = 10\%$. Напруга мережі $U_{\text{м}} = 220$ В.

Відстань від стелі до робочої поверхні, H_0 , м,

$$H_0 = H - h_p = 5 - 1,2 = 3,8 \text{ м.}$$

Відстань від стелі до світильника, h_c , м,

$$h_c = 0,2 \cdot H_0 = 0,2 \cdot 3,8 = 0,76 \text{ м.}$$

Висота підвісу світильника над освітленою поверхнею, h , м,

$$h = H_0 - h_c = 3,8 - 0,76 = 3,04 \text{ м.}$$

Висота підвісу світильника над підлогою, $H_{\text{п}}$, м,

$$H_{\text{п}} = h + h_p = 3,04 + 1,2 = 4,24 \text{ м.}$$

Для досягнення найбільшої рівномірності освітлення приймаємо відношення $L/h = 1,5$.

Відстань між центрами світильників, L , м,

$$L = 1,5 \cdot h = 1,5 \cdot 3,04 = 4,56 \text{ м.}$$

Необхідна кількість світильників, N ,

$$N = S/L^2 = (51 \cdot 22)/(4,56)^2 = 54.$$

Приймаємо 54 світильники (6 рядів по 9 світильників).

Індекс приміщення, i ,

$$i = (A \cdot B)/(h \cdot (A + B)) = (51 \cdot 22)/(3,04 \cdot (51 + 22)) = 5,1.$$

При $i = 5,1$ для світильника типу ЛД коефіцієнт використання світлового потоку $\eta = 0,7$.

Світловий потік однієї лампи, Φ , лм,

$$\Phi = (E_{\min} S K_3 Z)/(N \eta) n,$$

де K_3 - коефіцієнт запасу, $K_3 = 1,5$;

Z - коефіцієнт мінімальної освітленості для люмінесцентних ламп, $Z = 1,1$;

n - кількість ламп, $n = 2$.

$$\Phi = (200 \cdot 1122 \cdot 1,5 \cdot 1,1)/(54 \cdot 0,7) \cdot 2 = 4245 \text{ лм.}$$

Обираємо лампу ЛД потужністю 80 Вт.

Фактична освітленість, E_{ϕ} , лк,

$$E_{\phi} = E_{\min} \cdot \Phi_{\text{л}} / \Phi_{\text{р}} = 200 \cdot 4300 / 4245 = 203 \text{ лк.}$$

Загальна потужність, $P_{\text{заг}}$, Вт,

$$P_{\text{заг}} = P_{\text{л}} \cdot N \cdot n = 80 \cdot 54 \cdot 2 = 8640 \text{ Вт.}$$

Отже для оптимальної роботи в приміщенні необхідно встановити 6 рядів по 9 світильників типу ЛСП-02 з двома люмінесцентними лампами ЛД-80. Загальна потужність усіх світильників складає 8,64 кВт.

5.4 Розробка заходів щодо техніки безпеки

На основі проведеного аналізу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, виникнення яких можливе на ділянці деревообробного цеху, розроблено заходи щодо зниження і ліквідації небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Для підтримки в приміщеннях оптимальної температури повітря застосовують в літній період - кондиціонери, а в зимовий період - систему водяного опалення, що є найбільш ефективною в санітарно-гігієнічному плані, та найбільш безпечною для деревообробного виробництва.

Для доброго самопочуття людини важливо певне поєднання температури, відносної вологості і швидкості руху повітря в робочій зоні. Вологість повітря дуже впливає на терморегуляції організму, а рух повітря в приміщеннях є важливим фактором, що впливає на теплове самопочуття людини. Швидкість повітря робить також вплив на розподіл шкідливих речовин у приміщенні.

Для забезпечення чистоти повітря і заданих метеорологічних умов у виробничому приміщенні передбачається приточно-витяжна вентиляція. Наявність у вентиляційній системі пристрою для підігріву, осушки або зволоження повітря обов'язково.

У виробничому цеху використовується природне і штучне освітлення, як доповнення при недоліку природного освітлення за нормами, в залежності від часу доби та пори року. В якості джерел штучного освітлення застосовуються люмінесцентні лампи.

Для зниження виробничого шуму використовують різні методи:

- усунення причин або ослаблення шуму в джерелі його виникнення;
- зниження шуму на шляху його розповсюдження;
- застосування індивідуальних засобів захисту робочих.

Ослаблення шуму в джерелі його виникнення є найбільш радикальним засобом боротьби з шумом виробничого обладнання.

Однак, досвід підприємств показав, що ефективність заходів щодо зниження шуму експлуатованих машин і механізмів невелика і тому зниження шуму слід домагатися насамперед у процесі проектування обладнання.

Зменшення шуму електродвигунів оброблювальних центрів досягається хорошим динамічним балансуванням ротора двигуна, підвищенням жорсткості корпусу двигуна, вала ротора, підшипників, укладенням електродвигуна в звукоізолюючий кожух.

Зниження шуму можна домогтися застосувавши менш інтенсивний режим різання або розмістивши центри в ізольованих приміщеннях із стелями, облицьованими звукоізолюючим матеріалом.

Проведення планового ремонту дозволить зменшити рівень шумів, пов'язаний із зносом деталей.

Щоб уникнути ураження електричним струмом робляться такі основні заходи захисту:

- забезпечення недоступності струмоведучих частин;
- заземлення лісопильної рами та іншого електрообладнання;
- в комплексі використовується захисне відключення.

Для усунення небезпеки ураження людей електричним струмом, при появі напруги на конструктивних частинах електрообладнання, тобто при замиканні на корпус, використовується захисне заземлення.

Для захисту струмоведучих кабелів від механічних пошкоджень (як силових, так і керуючих) їх укладають в захисні металеві кожухи або спеціальні пази. Регулярне технічне обслуговування повинно включати в себе огляд і чистку, при необхідності, електрообладнання лісопильної рами від пилу і бруду. Крім того, обов'язково має проводитись інструктаж з техніки безпеки при роботі з електричним обладнанням. Участь працівників неелектричних спеціальностей в ремонтних або налагоджувальних абсолютно неприпустимо.

Щоб уникнути виникнення пожеж строго виконуються заходи пожежної безпеки. На нашій виробничій ділянці це досягається шляхом:

- обмеження застосування горючих речовин;
- запобігання поширенню пожежі за межі вогнища, тобто застосування протипожежних перешкод (стіни, перегородки, двері, ворота);
- використання засобів пожежогасіння (вогнегасники).

Застосування автоматичних засобів виявлення пожеж є одним з основних умов забезпечення пожежної безпеки, так як дозволяє оповістити черговий персонал про пожежу і місце його виникнення. Для цієї задачі використаємо димові сповіщувачі.

До числа організаційних заходів щодо забезпечення пожежної безпеки відносяться навчання робітників і службовців пожежної безпеки, інструктаж про порядок роботи з пожежонебезпечними речовинами і матеріалами. При роботі дотримуються протипожежні вимоги і маються на робочому місці засоби для гасіння пожежі: пісок, воду, вогнегасники і т.д. Щоб уникнути небезпеки виникнення по-

жежі на робочому місці деревообробне обладнання (лісопильна рама) експлуатується відповідно до зазначених в його паспорті експлуатаційних параметрів.

ВИСНОВКИ

У відповідності до поставленої задачі був здійснений обґрунтований вибір системи керування електропривода подачі лісопильної рами моделі Р63-4Б, на підставі математичної моделі двигуна були сформовані функціональна та структурна схеми, проведено синтез системи.

При синтезі регулятора швидкості з'ясовано, що збільшення сталої часу $T_{рш}$ може зменшити максимальне перегулювання до допустимих значень. Тому при синтезі регулятора швидкості для того, щоб система задовольняла початковим вимогам, параметр $T_{рш}$ регулятора був збільшений і прийнятий $T_{рш} = 0,982$ с. У цьому випадку максимальне перерегулювання складає 25,9%, а час перехідного процесу дорівнює 0,222 с.

Окрім модернізації електропривода подач пилорами надано техніко-економічне обґрунтування необхідності проведення модернізації електроприводу подач лісопильної рами Р63-4Б. В ході дослідження з'ясовано, що модернізація електромеханічної системи привода подач є економічно доцільною.

На підставі умов роботи електроприводу подач пилорами проведено аналіз шкідливих факторів та представлені заходи, щодо техніки безпеки при експлуатації пилорами, розроблено заходи щодо охорони навколишнього середовища та проведено дослідження стійкості роботи системи в умовах надзвичайних ситуацій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Фоменко А.М., Шарейко Д.Ю. Комплектні електроприводи: У 3 ч. Ч. 1: Аналогові комплектні електроприводи: Навчальний посібник. – Миколаїв: НУК, 2010. – 144 с.
2. В.І. Теряєв. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського «Автоматизований електропривод»: Учебное пособие для ВУЗів. – К: КПІ, 2022, 216 с.
3. Андрейко І.І., Гайдук В.Г. и др. Электрические машины змінного струму: Учебник для электротехнических специализированных ВУЗов.– Л. : Львівська політехніка, 2018, 568с.
4. Міліх В.І. Електротехніка та електромеханіка. – К: «Каравела», 2006, 376 с.
5. В. С. Хмельовський, Є. І. Марчишина, Т. О. Білько, М. М. Мотрич, В. І. Скібчик Охорона праці. Навчальний посібник. – К: ЦНЛ, 2023, 594 с.
6. Казьмерковский М., Вуйцак А. Схемы управления и измерения в промышленной электронике. – К: Наукова думка, 1986.
7. Отто Дж. М. Смит. Автоматическое регулирование. – М.: Государственное издательство физико - математической литературы, 1962.
8. Микола Матвієнко «Промислова електроніка»: Підручник. – К: Ліра 2019, 423 с.
9. Автоматизований електропривод ч. 2 [Електронний ресурс]: навчальний посібник» / В.І. Теряєв. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022, 204 с.

ДОДАТОК А

Мультимедійна презентація

Загальний вигляд лісопильної рами Р63-4Б

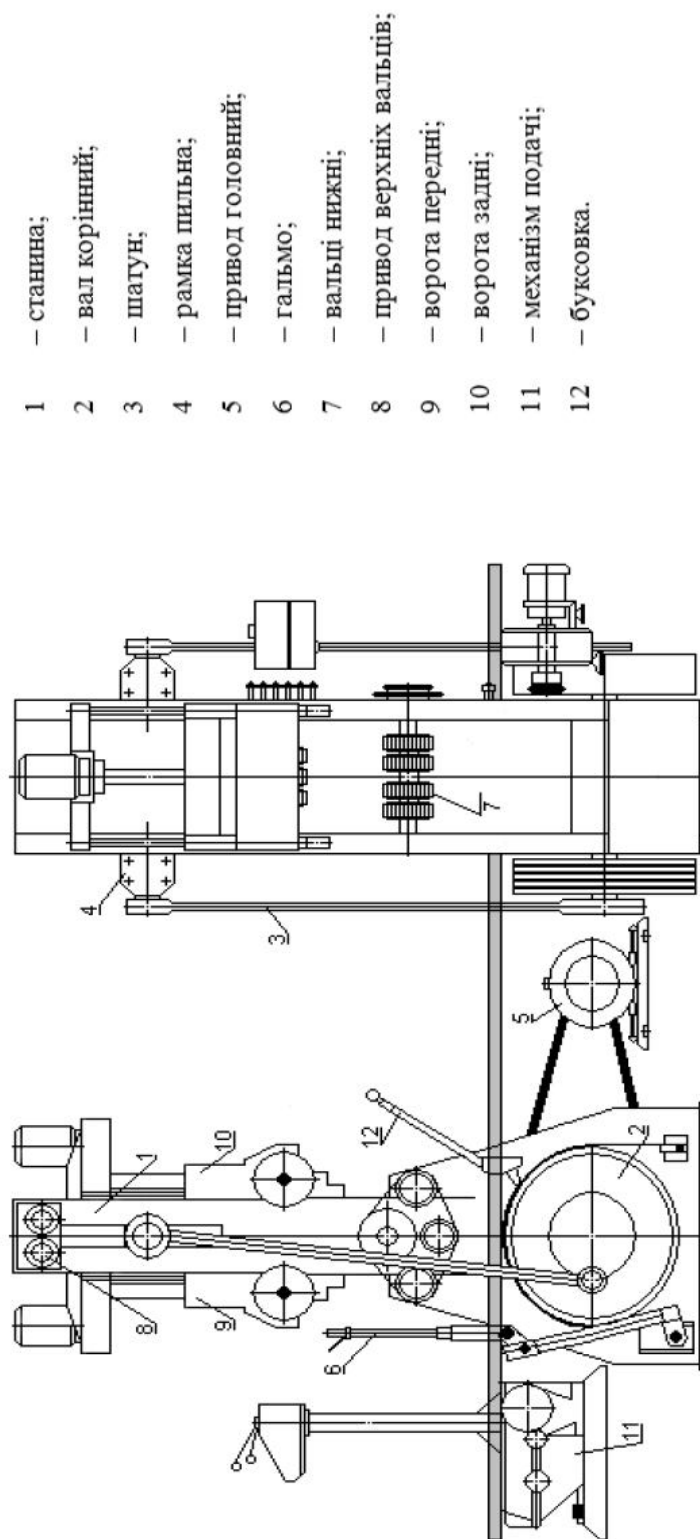
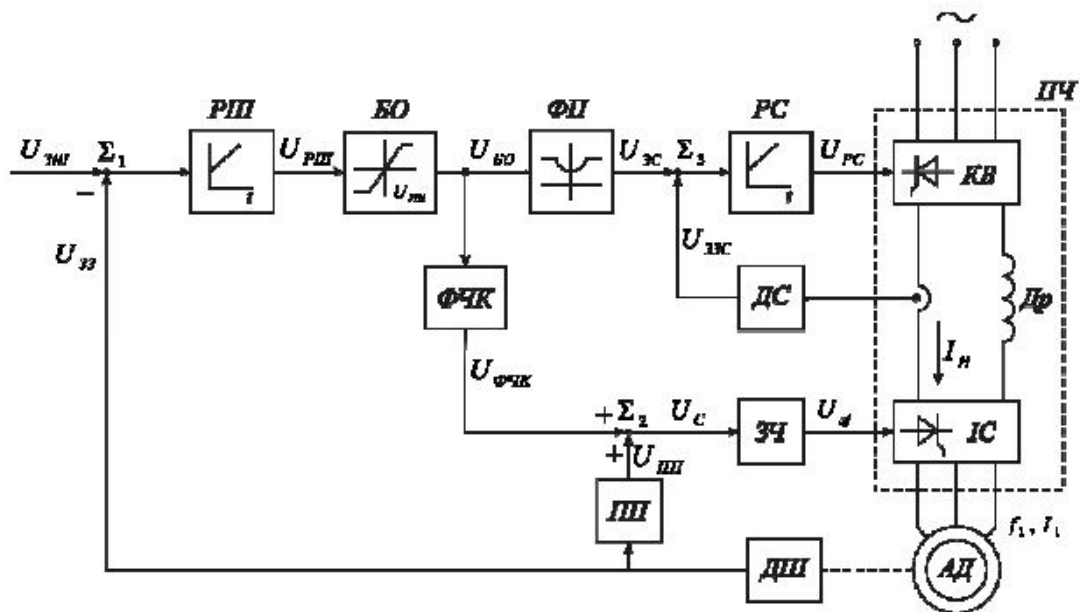


Рисунок А.1 – Слайд 1 мультимедійної презентації

Функціональна схема системи керування приводом подачі пилорами



Структурна схема системи керування приводом подачі пилорами

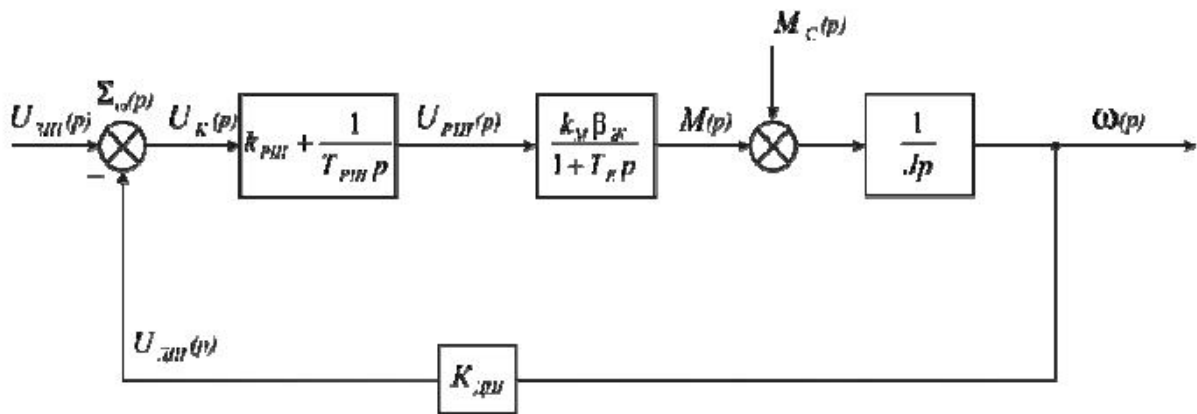
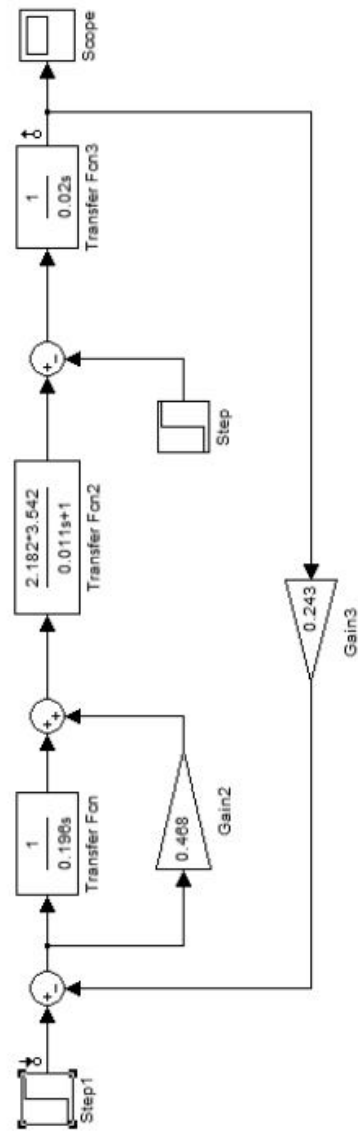


Рисунок А.3– Слайд 3 мультимедійної презен

Структурна схема системи у середовищі MATLAB



Перехідна характеристика САК при $k_{PII} = 0,468$, $T_{PII} = 0,196$ с

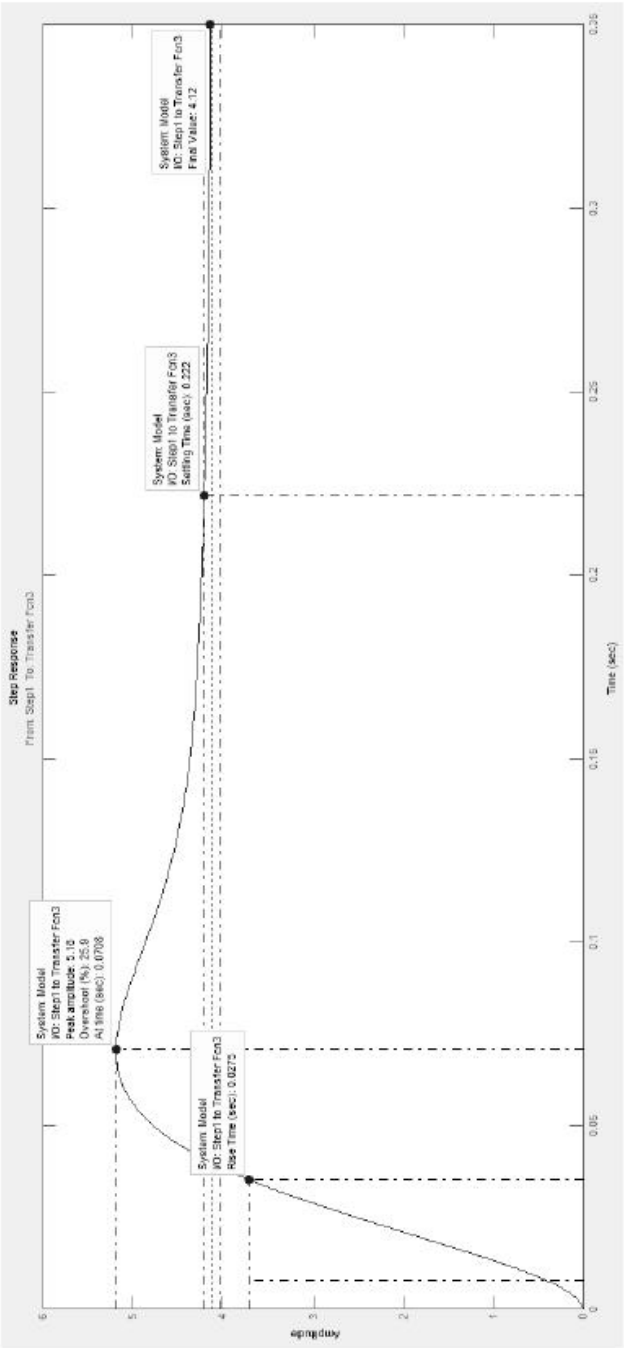


Рисунок А.4 – Слайд 4 мультимедійної презентації