

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра комп'ютеризованих систем управління
(повна назва кафедри)

«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри

«__» _____ 2022 р.

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр»
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: **«Система автоматичного керування гумозмішувачем»**

Виконав студент 2 курсу, 2347 ст групи
напряму підготовки

6.050201 Системна інженерія
(шифр і назва напряму підготовки)

Алфімов В. К.
(прізвище та ініціали)

Керівник **Топалов А. М.**
(прізвище та ініціали)

Рецензент **Гаврилов С.О**
(прізвище та ініціали)

м. Миколаїв — 2022 року

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ННІ автоматики і електротехніки

Кафедра комп'ютеризованих систем управління

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Напрямок підготовки 6.050201 Системна інженерія

(шифр і назва)

Спеціальність Комп'ютеризовані системи управління та автоматика

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КСУ

 **Черно О.О.**

« 14 » лютого 2022р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

А л ф і м о в у В і к т о р у К о н с т а н т и н о в и ч у

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Система автоматичного керування гумозмішувачем

керівник роботи Топалов Андрій Михайлович, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "30" червня 2022 р. № 410-уч

2. Строк подання студентом роботи 12 червня 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи Потужність асинхронного двигуна 22 кВт, частота мережі 50 Гц, частота обертання 1456 об/хв, ККД 91 %, макс. частота енкодера 300 кГц, аперіодичний перехідний процес.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз технічних рішень при побудові систем автоматичного керування гумозмішувачем;
2. Математичне моделювання системи автоматичного керування гумозмішувачем;
3. Синтез системи автоматичного керування швидкістю обертання роторів гумозмішувача;
4. Охорона праці.

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

1. Актуальність і мета роботи;
2. Принципова схема гумозмішувача РС-45;
3. Функціональна схема САК гумозмішувачем зі зворотним зв'язком за швидкістю;
4. Структурна схема системи ПЧ-АД гумозмішувача з оберненим зв'язком за швидкістю;
5. Результати математичного моделювання перехідних процесів САК гумозмішувачем;
6. Порівняльний аналіз показників якості САК гумозмішувачем;
7. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

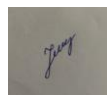
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Топалов А.Н., доц каф. КСУ	14.02.2022	10.06.2022

7. Дата видачі завдання: «26» жовтня 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проектування	Строк виконання	Примітка
1	Аналіз технічних рішень при побудові системи автоматичного керування гумозмішувачем.	13.04.22	виконано
2	Математичне моделювання системи автоматичного керування гумозмішувачем.	28.04.22	виконано
3	Синтез системи автоматичного керування швидкістю обертання роторів гумозмішувача.	12.05.22	виконано
4	Охорона праці.	29.05.22	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу.	12.06.22	виконано

Студент



(підпис)

Алфімов В. К.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



Топалов А. М.

АНОТАЦІЯ

Метою даної дипломної роботи є розробка системи автоматичного керування гумозмішувачем.

У дипломній роботі розглянутий технологічний процес виготовлення гуми, існуючі електроприводи гумозмішувачів та їх властивості. Наведено функціональну схему системи ПЧ-АД гумозмішувача зі зворотним зв'язком за швидкістю та структурна схема системи ПЧ-АД. Здійснено вибір та розрахунок параметрів основних елементів даної системи керування, зокрема, асинхронного електродвигуна, частотного перетворювача та датчика кутової швидкості. Здійснений розрахунок регуляторів швидкості обертання роторів гумозмішувача на основі методу компенсації. Проведено математичне моделювання та побудовані графіки перехідних характеристик у програмі Simulink з пакета програм *MATLAB*. На основі отриманих графіків перехідних процесів здійснений аналіз показників якості САК гумозмішувачем з розробленим регулятором.

В роботі також розглянуті питання охорони праці.

Ключеві слова: частота, система, керування, гумозмішувач, регулювання, двигун, ротори.

Abstract

The purpose of this thesis is to develop an automatic control system for a rubber mixer.

In the thesis the technological process of rubber production, existing electric drives of rubber mixers and their properties are considered. The functional diagram of the IF-AD system of the rubber mixer with speed feedback and the structural diagram of the IF-AD system. Selection and calculation of parameters of the main elements of this control system, in particular, asynchronous electric motor, frequency converter and angular speed sensor. Calculation of rubber mixer rotor speed controllers based on the compensation method has been performed. Mathematical modeling was carried out and the graphs of the transient characteristics of the Simulink program from the MATLAB software package were plotted. On the basis of the received graphs of the transients the analysis of the quality indicators of SAC by a rubber mixer with the developed regulator has been carried out.

The work also considers the issues of occupational safety.

Key words: frequency, system, control, rubber mixer, regulation, motor, rotors.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПРИ ПОБУДОВІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГУМОЗМІШУВАЧЕМ.....	9
1.1. Аналіз технологічного процесу виготовлення гуми.....	9
1.2. Аналіз технічних властивостей електроприводів гумозмішувачів.....	12
1.3. Аналіз технічних характеристик гумозмішувача PC-45.....	15
1.4. Аналіз властивостей електроприводу гумозмішувача PC-45.	18
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГУМОЗМІШУВАЧЕМ.....	23
2.1. Вплив частоти на електромагнітні процеси в асинхронному двигуні гумозмішувача.....	24
2.2. Розімкнені системи частотного керування гумозмішувачем.	30
2.3. Замкнені системи частотного керування гумозмішувачем...	39
2.4. Система ПЧ-АД зі зворотним зв'язком по швидкості.....	46
РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ РОТОРІВ ГУМОЗМІШУВАЧА.....	50
3.1. Вибір та розрахунок двигуна гумозмішувача.....	50
3.2. Вибір перетворювача частоти САК швидкістю обертання роторів гумозмішувача.....	52
3.3. Вибір датчику швидкості САК швидкістю обертання роторів гумозмішувача.....	58
3.4. Розрахунок регуляторів САК швидкістю обертання роторів гумозмішувача.....	59
3.5. Математичне моделювання САК швидкістю обертання роторів гумозмішувача.....	62
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	70
4.1. Техніка безпеки при обслуговуванні електродвигунів.....	71
4.2. Електронебезпека.....	72
4.3. Виробниче освітлення.....	73
4.4. Заходи безпеки при роботі з гумозмішувачем.....	74
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	79

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ДН – датчик напруги;

ЗГ - задаючий генератор;

КР – кільцевий розподільник;

ФІ – формувач імпульсів;

СУІ – система перетворень інвертором;

СУВ – система керування випрямлячем;

РЧ – регулятор частоти;

АД – асинхронний двигун;

ДПС – двигун постійного струму;

ФП – функціональний перетворювач;

ЗІ – задатчик інтенсивності;

ПЧ – перетворювач частоти;

ЗП – задавальний пристрій;

РШ – регулятор швидкості;

Р - редуктор;

РГ – ротори гумозмішувача;

САК – система автоматичного керування;

ДС – датчик струму;

ДСЗ – датчик струму збудження;

РСЗ – регулятор струму збудження.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Вдосконалення технології виробництва гуми тісно пов'язане з вдосконаленням систем керування електроприводами. Сучасні вимоги до електроприводів передбачають забезпечення високих показників якості керування.

Дуже важливим етапом у процесі виробництва гуми є процес змішування каучуку та хімічних складових, необхідних для виробництва гуми. Покращення якості виготовленої гуми можна досягнути за рахунок підвищення технічного рівня технологічного процесу гумозмішування.

Для цього процесу використовуються спеціальні промислові машини – гумозмішувачі. Гумозмішувач має спеціальну закриту камеру, в якій за допомогою робочих органів і відбувається процес змішування каучуку з наповнювачами, сіркою та іншими компонентами. Електроприводи роторів гумозмішувачів виконуються як нерегульованими, так і регульованими. Нерегульовані електроприводи гумозмішувачів виконуються асинхронними та синхронними, останні використовуються в гумозмішувачах досить великої потужності. Регульовані електроприводи виконуються по системі тиристорний електропривод постійного струму або асинхронний вентильний каскад.

На багатьох вітчизняних підприємствах по виробництву гуми й досі використовуються гумозмішувачі з нерегульованими електроприводами, це обумовлено високою вартістю нових гумозмішувачів, особливо великих об'ємів робочої камери. Більш дешевим і доцільним варіантом є заміна лише системи керування електропривода гумозмішувача. Пропонується замінити розімкнену систему керування нерегульованого електроприводу з релейно-контактним способом керування на замкнену систему з частотним способом керування і зворотнім зв'язком за швидкістю.

Дана система керування забезпечить достатньо плавне регулювання швидкості обертання роторів гумозмішувача і достатній для даного типу навантаження діапазон регулювання.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					6.050201.2341ст.ДР.ПЗ.Р1						
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата							
Студент		Алфімов В.К.			АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПРИ ПОБУДОВІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГУМОЗМІШУВАЧЕМ			Літ	Аркуш	Аркушів	
Керівник		Топалов А.М.									
Н. контр.		Вінниченко І.Л.									
Зав. Каф.		Черно О.О.									
					НУК ім. адм. Макарова						

1.1. Аналіз технологічного процесу виготовлення гуми

Каучук широко використовуються в промисловості. Сучасна гумова промисловість виробляє з гуми близько 40 тис. найменувань. Найпоширенішою галуззю виробництва гуми є виробництво шин. 2/3 гуми йде на виготовлення шин. Від якості шин значною мірою залежить розвиток таких важливих галузей, як тракторна промисловість, автотранспорт, авіація, сільське господарство, будівництво. Шинний завод — це велике промислове підприємство з високим ступенем механізації та автоматизації [1]. В Україні є два шинних заводи — Дніпропетровський та Вілазерківський. Крім гумових шин, також виготовляє конвеєрні стрічки, приводні ремені, муфти, паливні баки, труби, шланги та ущільнювачі. Також - гумові вироби, труби, штучна шкіра, деякі будматеріали, тротуари, облицювання меблів, матраци, сидіння, кабелі, взуття, робочий одяг, папір, клей, фарби тощо. Каучук буває натуральний і синтетичний.

Гумові різновиди.

За загальноприйнятими класифікаціями гумова промисловість випускає такі види гуми:

- Універсальний (температура роботи $-50...+150^{\circ}\text{C}$ - автомобільні шини, взуття, ремені, амортизатори);
- термостійкі (робочі температури понад 150°C - авіаційні шини, деталі ракет, електродвигуни); (компоненти, які безперервно працюють при мінусових температурах);
- маслостійкість (для деталей, що контактують з бензином, гасом, нафтою та нафтопродуктами);
- хімічна стійкість (для деталей, що контактують з лугами, кислотами, солями);
- Надутий (для теплоізоляційних деталей);
- Радіаційна стійкість (рентгенівська гума);
- Діелектрики (ізоляція кабелю, захисні прокладки, рукавички, чоботи).

Отримання того чи іншого типу гуми в основному обумовлено належним складом, а також технічними характеристиками.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Гумові вироби виготовляють з гумових сумішей. Гумові суміші отримують шляхом змішування каучуку з інгредієнтами. Виготовляється з різних наповнювачів, пластифікаторів, вулканізаторів, вулканізаторів, барвників. Зокрема, це сірка, сажа, мазут, дьоготь, мастило, каніфоль, смола та інші матеріали. Крім гуми, для переробки використовується також сировина - продукт переробки старих гумотехнічних виробів (переважно шин) і відходів вулканізованої гуми. У пластиковому стані перероблений матеріал можна змішати з гумою та компаундом і повторно вулканізувати. Регенерат використовується для повної або часткової заміни гуми у виробництві багатьох гумових виробів[2].

Тому в різних видах гуми вміст каучуку коливається від 10 до 98%. Решта складається з складових, перероблених і зміцнюючих елементів - натуральних або хімічних волокон у вигляді тканин, ниток, мотузок. Технологія виробництва гуми складається з чотирьох основних етапів:

- Нарізати гуму на невеликі шматочки і підготувати інгредієнти (подрібнення, просіювання, сортування, зважування);
- приготування гумових сумішей на закритих гумомішалках і каландрах (валках);
- формування (на рулоні гумових листів, або у формах для штучних виробів);
- Вулканізація - кінцева і дуже відповідальна операція, може відбуватися в пресах, котлах і автоклавах при температурах 130-160°C і тиску 18-20 МПа, але може відбуватися і при тиску 3-6 МПа вниз. Під час вулканізації сірка з'єднується з молекулами каучуку, утворюючи тривимірну структуру, яка називається гумою. Саме в процесі вулканізації каучук набуває своєї основної якості – здатності до подовження [3].

Більш детальна технологія виробництва гуми показана на малюнку 1. 1.1. Як видно з малюнка, процес змішування гуми та інших хімічних матеріалів є невід'ємною частиною технології виробництва.

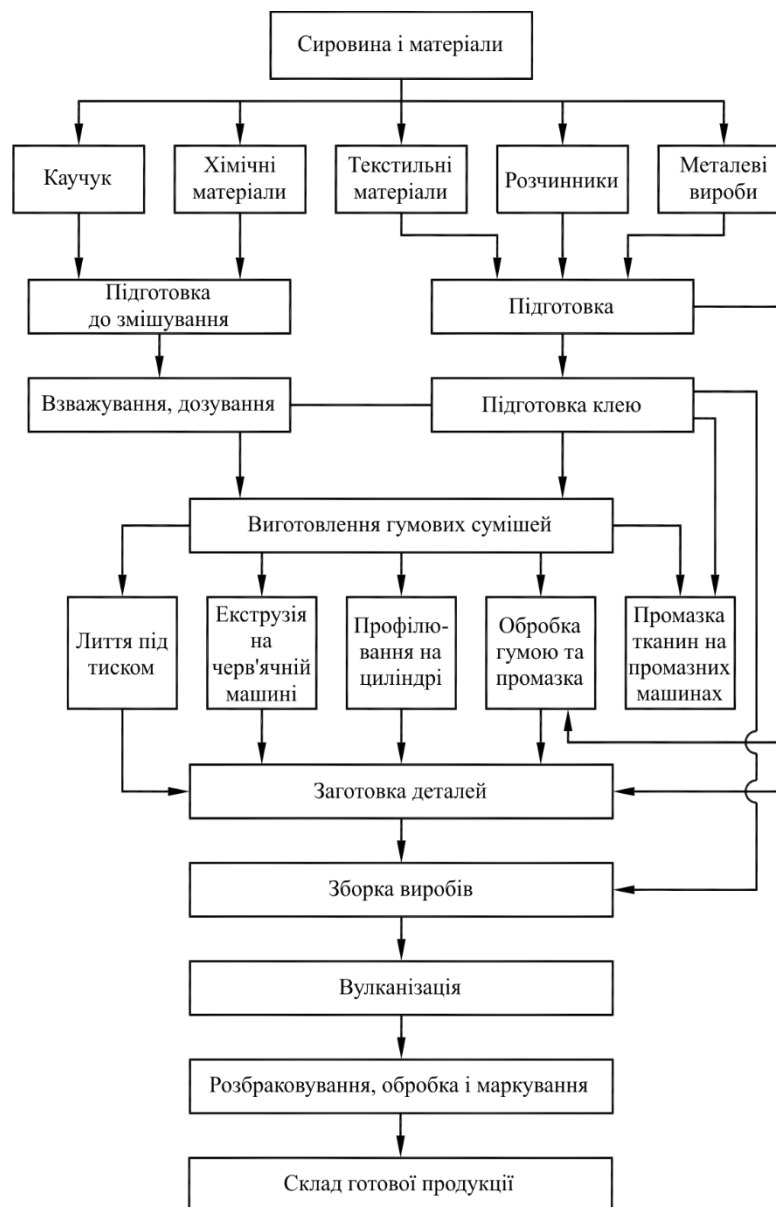


Рис. 1.1. Технологія виробництва гуми

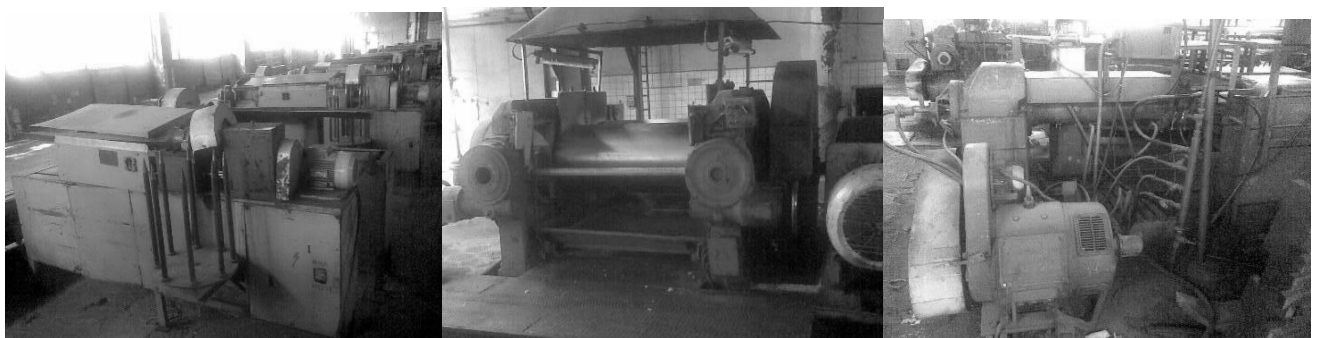


Рис. 1.2. Промислові гумозмішувачі

В дан ий час для реалізації змішування каучуків та хімічних складових використовуються спеціальні промислові машини – гумозмішувачі рис. 1.2. Приводом таких машин є електродвигуни як постійного, так і змінного струмів.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Аналіз технічних властивостей електроприводів гумозмішувачів

Електроприводи гумозмішувачів виконуються як регульованими так і нерегульованими. Оскільки максимальні потужності електродвигунів сучасних гумозмішувачів досягають 2500 кВт, то нерегульовані електроприводи виконуються з синхронними електродвигунами. Регульовані електроприводи звичайно виконуються по системі асинхронний вентильний каскад або тиристорний електропривод постійного струму.

На рис. 1.3 наведені функціональна та структурна схеми тиристорного електропривода постійного струму.

Даний електропривод виконаний з двозонним регулюванням швидкості. В цій системі регулювання до основної швидкості здійснюється шляхом зміни ЕРС тиристорного перетворювача при номінальному магнітному потоці, а вище основної шляхом зміни струму в обмотці збудження електродвигуна при постійній напрузі якоря двигуна [4].

Система регулювання струму збудження виконана двох контурною; внутрішній контур струму збудження з датчиком струму збудження ДСЗ і зовнішній контур ЕРС з датчиком напруги ДН і струму ДС якоря двигуна. На вхід регулятора ЕРС РЕ вводиться завдання, яке відповідає номінальному значенню ЕРС двигуна E_z . Вихідна напруга регулятора ЕРС є завданням для регулятора РСЗ струму збудження. Поки напруга на якорі двигуна менше номінальної, значення дійсної ЕРС E_x , менше заданого значення E_z і РЕ знаходиться в насиченні, а його вихідна напруга відповідає завданню номінального струму збудження двигуна.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

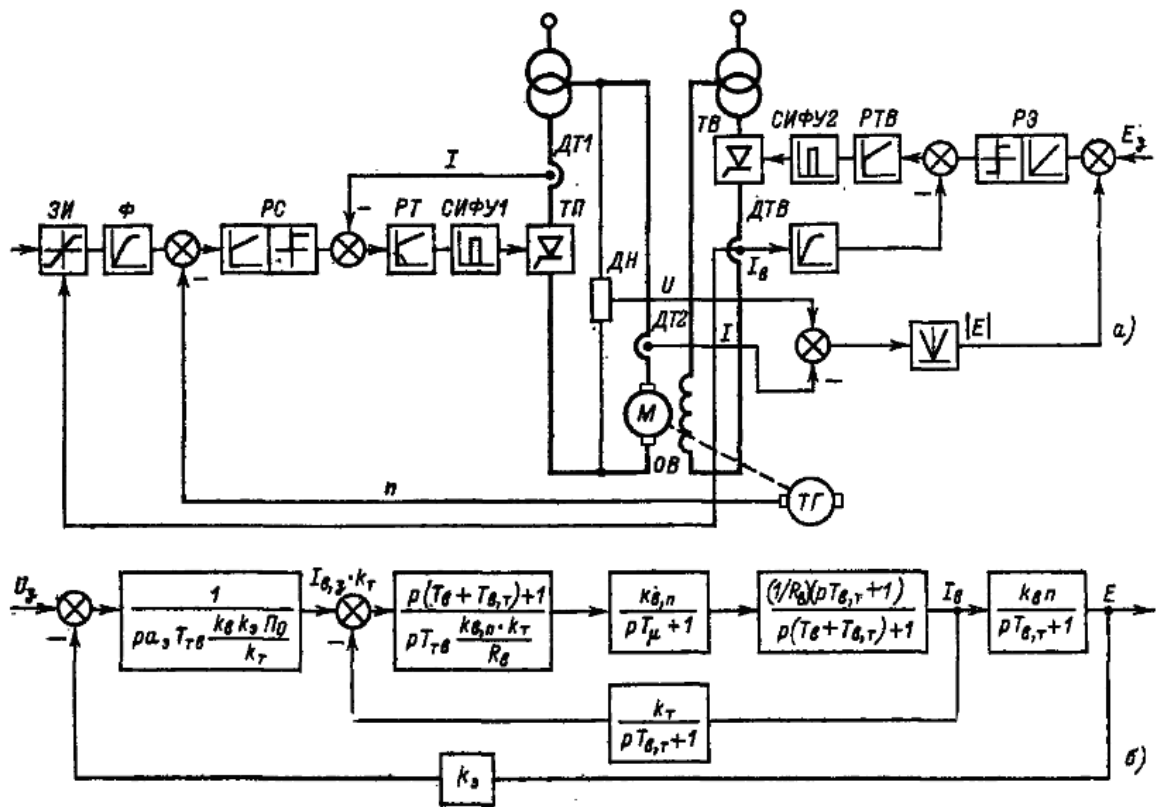


Рис. 1.3. Електропривод з двозонним регулюванням частоти обертання двигуна постійного струму: а) функціональна схема, б) структурна схема системи збудження

При напрузі двигуна, рівній номінальній, вступає в дію регулятор ЕРС і струм збудження двигуна знижується. Це здійснюється наступним шляхом. Розглянемо випадок завдання максимальної швидкості двигуна.

При досягненні двигуном основної швидкості дійсне значення швидкості ще не буде рівним заданому. Тому система регулювання напруги якоря двигуна буде намагатися підняти напругу вище номінальної. При досить невеликому перевищенні напруги двигуна в порівнянні з номінальним значення ЕРС E_d буде наближатися до заданого значення E_z і струм збудження почне знижуватися. Рівновага наступить, коли швидкість двигуна дійсно буде рівна заданій. Обмеження напруги якоря двигуна здійснюється за допомогою системи імпульсно-фазового керування СІФУ 1, яка обмежує мінімальне значення кута регулювання.

Структурна схема системи збудження зображена на рис. 1.3, б. При побудові цієї системи не враховується зміна ЕРС двигуна при зміні частоти обертання як більш повільне, ніж приріст ЕРС при зміні потоку збудження. При регулюванні

швидкості зміною магнітного потоку змінюється електромагнітна стала часу електропривода, що характеризує систему як нелінійну. Тому при зміні струму збудження збуджування необхідно коректувати параметри регулятора струму збудження. Однак для електроприводу механізмів, подібних гумозмішувачу, з невисокими вимогами к динаміці перехідного процесу систему двозонного регулювання можна налагоджувати при номінальному потоці двигуна.

На рис. 1.4 наведена функціональна схема асинхронного електропривода з частотним керуванням.

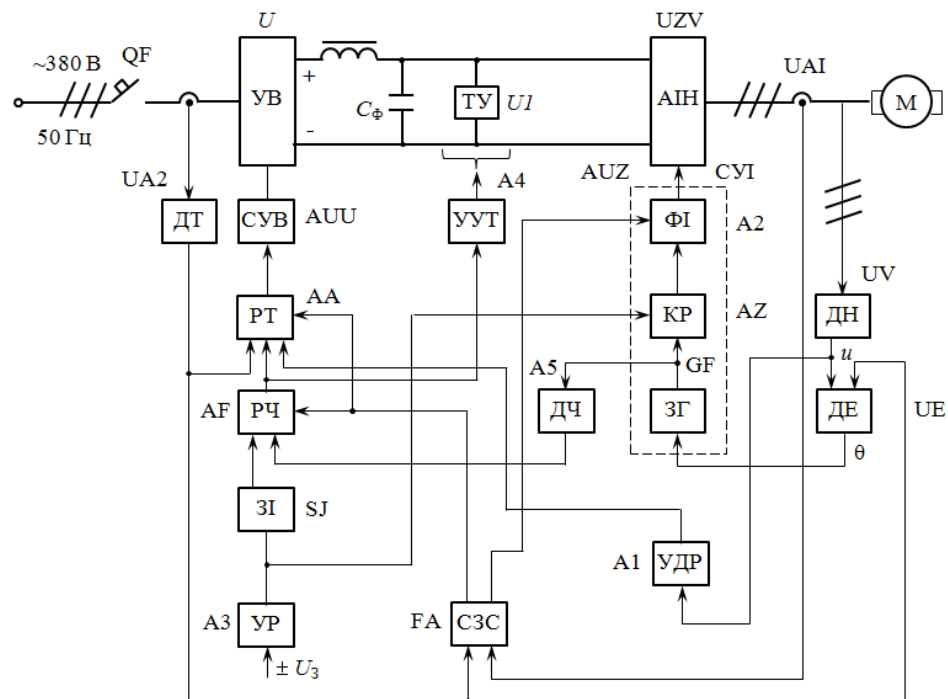


Рис. 1.4. Функціональна схема асинхронного електропривода з частотним керуванням

Даний електропривод виконаний по схемі керований випрямляч автономний інвертор напруги. Задаючий генератор ЗГ виробляє послідовність імпульсів, які поступають на кільцевий розподільник КР і на формувач імпульсів ФІ, а потім на керуючі входи тиристорів АІН. Частота імпульсів ЗГ визначається вхідним сигналом, пропорційним ЕРС двигуна, для чого в датчику ЕРС ДЕ здійснюється перетворення $e = U I R_s$, де U напруга на двигуні, яка вимірюється за допомогою датчика напруги ДН, I струм, який вимірюється за допомогою датчика струму ДС $UA2$; R_s активний опір фази двигуна. Блоки ФІ, КР і ЗГ утворюють систему перетворень інвертором СПІ. Вихідний сигнал ДЕ подається на вхід ЗІ, забезпечуючи тим самим виконання закону частотного керування $e/f = const$, де f

вихідна частота інвертора. При регулюванні частоти вище номінальної пристрій двозонного регулювання ПДР підтримує напругу на рівні номінальної або фактичної напруги мережі (якщо вона нижче номінальної). Замкнута система регулювання електропривода виконана по структурі підпорядкованого регулювання і містить внутрішній контур регулювання вхідного струму (ДТ датчик струму, РС регулятор струму, СКВ система керування випрямлячем) і ПІ-регулятор частоти РЧ. Сигнал задавання частоти $\pm U$ надходить на вхід пристрою реверса ПР, яке встановлює кільцевий розподільник КР для рахування в прямому або протилежному напрямках. Крім того, сигнал $+ U_z$ через задавач інтенсивності ЗЧ подається на регулятор частоти РЧ, куди також надходить сигнал з виходу ЗІ через датчик частоти ДЧ. Таким чином, РЧ формує завдання регулятору струму.

1.3. Аналіз технічних характеристик гумозмішувача РС-45

Розглянемо гумозмішувач моделі РС-45. Даний гумозмішувач на рис. 1.5 призначений для приготування гумових сумішей, у ньому реалізується процес змішення каучуку з наповнювачами, сіркою і іншими компонентами. За принципом дії даний гумозмішувач періодичної дії. Робочими органами такого змішувача є два ротори, що поміщені в камеру і обертаються назустріч один одному. Камера має вікна для завантаження компонентів і вивантаження готової гумової суміші. Під час приготування гумової суміші вікна закриваються спеціальними механізмами. З цієї причини такий змішувач називається гумозмішувачем закритого типу. Ротори по геометричним контурам робочої частини є овальними.

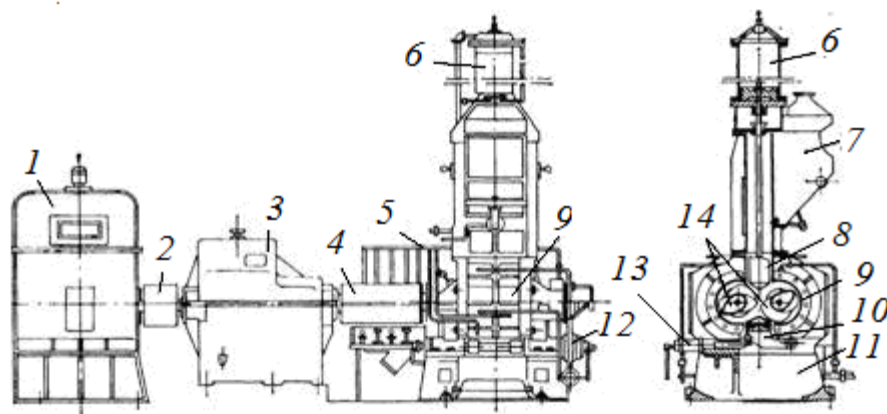


Рис. 1.5. Гумозмішувач типу РС-45:

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 – електродвигун; 2 – муфта; 3 – блок-редуктор; 4 – шарнірна муфта;
 5 – трубопроводи системи охолодження; 6 – пневмоциліндр верхнього затвора;
 7 – завантажувальна воронка; 8 – верхній затвор; 9 – камера змішувача;
 10 – нижній затвор; 11 – станина; 12 – гідропривід нижнього затвора;
 13 – гідроциліндр приводу замку нижнього затвора; 14 – ротори

Гумозмішувач на рис. 1.5 складається з камери змішувача 9, змонтованою на станині 11, усередині якої розміщені ротори 14, верхнього затвора 8 і його приводу 6; завантажувальної воронки 7; нижнього затвора 10 з приводом 12; системи комунікацій 5 для подачі води до змішувача для охолодження; приводу роторів, до складу якого входять електродвигун 1, муфта 2, блок-редуктор 3 і шарнірні муфти 4, цілий ряд інших допоміжних пристроїв. Принцип роботи гумозмішувача полягає в наступному. Вихідні компоненти завантажуються в камеру змішувача: рідкі компоненти – через патрубок в горловині, технічний вуглець – через інший патрубок в цій же горловині, всі останні компоненти (каучук у вигляді шматків або гранул і сипкі) – через завантажувальну воронку. У завантажувальній воронці на горизонтальній осі встановлені дверці з пневматичним приводом.

Після завантаження компонентів дверці займають вертикальне положення і запобігають винесенню речовин, що порошуються, назовні. Частина з них відсисається через вентиляційний патрубок. Роторами, що обертаються назустріч один одному, компоненти суміші залучаються до складного руху і піддаються деформаціям стискування, розтягування і зрушення. Домінуючими є деформації зрушення і стискування [5]. Цьому сприяє сама конструкція роторів, що представляють порожнисті вали з фігурними гребенями. Гребені розташовані під кутом до створюючої циліндра. Кут закручування гребенів однаковий і рівний 90° , а кути підйому різні. Один з гребенів розташований під кутом приблизно 30° до створюючої циліндра, а інший – під кутом 45° .

Завдяки цьому один з гребенів тягнеться уздовж робочої частини ротора на довжину, більшу половини всієї довжини ротора, а інший – на довжину, меншу половини довжини робочої частини ротора. Таким чином, гребінь, розташований під меншим кутом до створюючої, є довшим, а інший гребінь з великим кутом по відношенню до створюючої – менш довгим, або коротким. Гребені розташовані в

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

протилежащих частинах ротора і між собою не з'єднуються. Поперечний перетин ротора по гребеню має напівовальну форму. Зазор між вершиною гребеня ротора і циліндровою стінкою камери складає величину порядку 3 мм. Після закінчення завантаження компонентів в камеру гумозмішувача включається в роботу пневматичний привід, шток якого з'єднаний з верхнім затвором. Останній опускається і впливає на компоненти суміші з певним зусиллям. Завдяки цьому досягається необхідне для процесу змішення зчеплення перемішуваного матеріалу з поверхнею роторів і камери змішувача. У початковий період роботи змішувача компоненти заповнюють не лише весь об'єм камери змішувача, але і частину горловини. У міру розподілу сипких і рідких компонентів в каучуку об'єм суміші зменшується і на завершуючій стадії процесу камера змішувача заповнена сумішшю частково. Відношення об'єму гумової суміші до вільного об'єму камери змішувача носить назву коефіцієнта завантаження. Середнє значення коефіцієнта завантаження камери змішувача вибирається експериментальним шляхом і лежить в межах 0,6-0,7. Перемішуваний матеріал піддається деформаціям в серповидному зазорі між гребенями роторів і стінками камери змішувача, у вузькому зазорі між вершинами гребенів і стінкою камери, в просторі між роторами і затворами, верхнім і нижнім, в просторі між циліндричною поверхнею роторів і стінкою камери.

Унаслідок того, що ротори обертаються з різною частотою, геометрична форма робочого простору безперервно змінюється, компоненти суміші і сама суміш здійснюють складний рух, переходять з однієї половини камери в іншу. Завдяки гвинтовому розташуванню гребенів окрім поперечного переміщення суміш отримує подовжній рух, розвертається у бічних стінок і рухається по складних траєкторіях за об'ємом камери змішувача. Процес приготування гумових сумішей вельми енергоємний. Гумозмішувач оснащений досить потужним електродвигуном. При вільному об'ємі камери змішувача 4,5 л при частоті обертання швидкохідного ротора 100 об/мін оснащується електродвигуном потужністю 22 кВт. Вся ця потужність, за винятком втрат в приводі, витрачається на приготування гумової суміші і виділяється у вигляді теплоти в камері змішувача.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для підтримки температурного режиму гумозмішувач оснащується комплексною системою охолодження.

1.4. Аналіз властивостей електроприводу гумозмішувача *РС-45*

Привод роторів гумозмішувача здійснюється від електродвигуна за допомогою передач. Ротори гумозмішувача обертаються з різною частотою і по аналогії з вальцями відношення частоти обертання швидкохідного ротора до частоти обертання менш швидкохідного ротора називають фрикцією, а пара шестерень в приводі, що забезпечує цю різницю частот обертання роторів, отримала назву фрикційних [6]. Така назва звичайних зубчастих шестерень носить з цієї причини умовний характер. На рис. 1.6 приведена кінематична схема електроприводу роторів. Даний електропривод складається з електродвигуна 1, який передає обертальний рух через пружну муфту 2 на блок-редуктор 3. Блок-редуктор має три ступені та призначений для перетворення механічної енергії, яка передається від двигуна до роторів гумозмішувача. Він з'єднаний з роторами гумозмішувача через шарнірні муфти 4.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

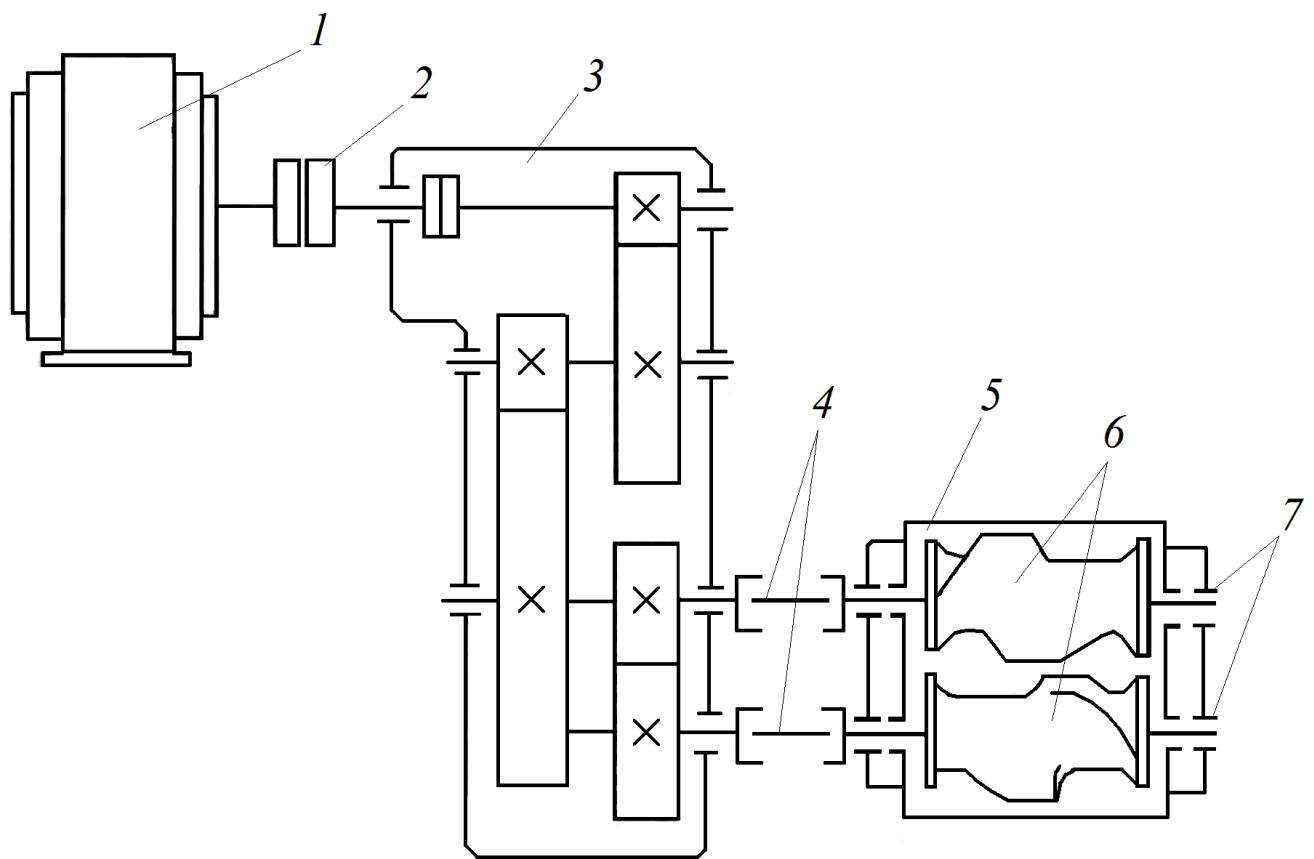


Рис. 1.6 Кінематична схема електроприводу роторів гумозмішувача:
 1 – електродвигун; 2 – пружна муфта; 3 – блок-редуктор; 4 – шарнірні муфти;
 5 – камера змішувача; 6 – ротори; 7 – роторні підшипники;

Вживання універсальних шарнірних муфт дозволяє передавати на ротори лише необхідний для їх приводу обертальний момент.

Даний електропривод є нерегульованим і має розімкнену систему керування. Електричний двигун пускається та керується релейно-контактним способом згідно схеми на рис. 1.7.

Дана схема реалізує пуск асинхронного двигуна з симетричним опором у колі статора. Включається автоматичний вимикач QF , подається напруга на силовий ланцюг і ланцюг управління. Після натиснення на кнопку $SB1$ спрацьовує контактор $KM1$, силові контакти якого замикаються і підключають двигун до мережі з активними опорами в колі статора. Одночасно отримує живлення реле часу KT , оскільки контакт $KM1$ в ланцюзі реле KT замикається. Після закінчення часу, рівного витримці часу реле KT , замикається контакт KT , внаслідок чого контактор $KM2$ спрацьовує і своїми контактами шунтує опори в ланцюзі статора. Пуск

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

закінчується. Для зупинки двигуна натискається кнопка *SB2* "Стоп" і відключається автоматичний вимикач *QF*.

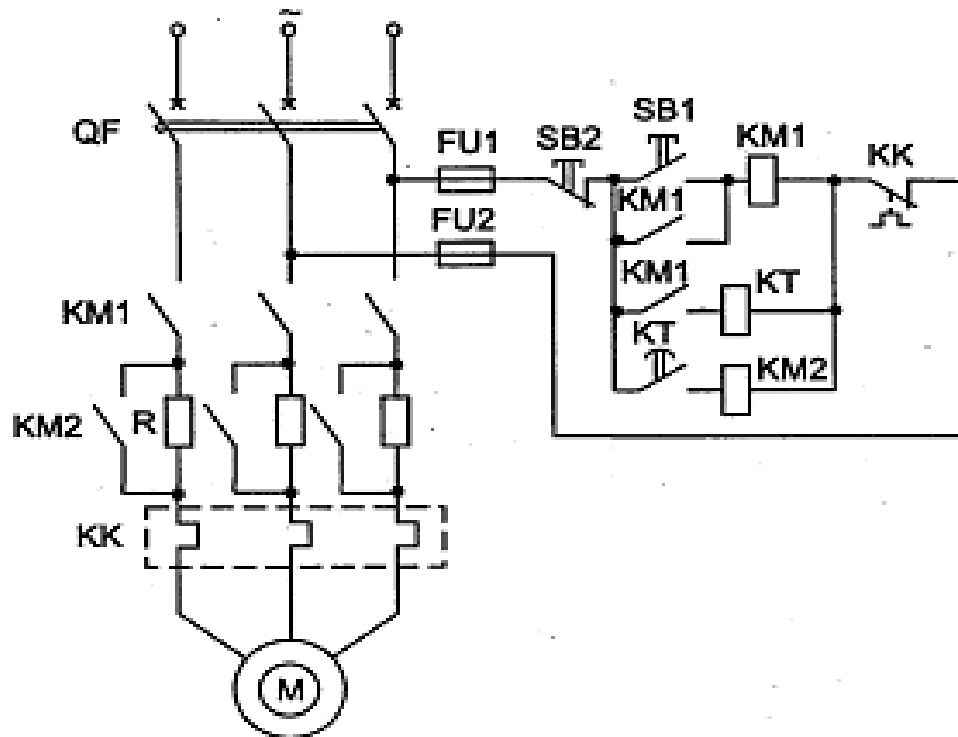


Рис. 1.7 Схема керування електроприводом роторів гумозмішувача

Таблиця 1.1

Тип двигуна	Потужність	Частота обертання	КК	$\cos\varphi$	I_p/I_n	M_p/M_n
	ь		Д		н	
4A180S4Y3	22 кВт	1500 об/хв	0,9	0,9	7	2,2

В даній схемі (рис. 1.7) використовується двигун серії 4A180S4Y3. В таблиці 1.1 наведено параметри двигуна.

Висновки за розділом 1

На сучасному етапі розвитку шинної промисловості і при високих темпах зростання обсягу виробництва гумових технічних виробів, посилюванні вимог до

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

якості шин і РТІ найважливішим завданням є підвищення технічного рівня технологічних процесів і гумозмішувального устаткування.

Експлуатаційні властивості гумових технічних виробів в значній мірі визначаються фізико-механічними характеристиками гумових сумішей, якість яких істотно залежить від частотного режиму процесу змішення.

Відомо, що найбільш ефективний керуючий вплив на процес виготовлення гумових сумішей надає частота обертання роторів гумозмішувача. Аналіз результатів математичного моделювання процесу змішення показує, що для більш ретельного та якісного змішування доцільно змінювати частоту обертання роторів під час проходження процесу змішування. Також найбільш ефективним способом інтенсифікації процесу змішування є збільшення частоти обертання роторів, особливо при приготуванні м'яких сумішей. Експериментально та теоретично показано, що середня швидкість зсуву в змішувачі змінюється пропорційно частоті обертання роторів. Це означає, що при збільшуванні швидкості обертання роторів, час циклу змішування зменшується. Між частотою обертання роторів та тривалістю змішення існує приблизно обернено пропорційна залежність.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					6.050201.2341ст.ДР.ПЗ.Р1				
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					
Студент		Алфімов В.К.			МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГУМОЗМІШУВАЧЕМ	Літ		Аркуш	Аркушів
Керівник		Топалов А.М.							
Н. контр.		Вінниченко І.Л.							
Зав. Каф.		Черно О.О.				НУК ім. адм. Макарова			

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГУМОЗМІШУВАЧЕМ

Рекомендується використовувати перетворювач частоти в змішувачі для управління двигуном для досягнення скалярного управління електроприводом. Найпоширенішими є асинхронні електроприводи зі скалярним керуванням. Використовуючи в приводі гумовий змішувач, важливо підтримувати частоту обертання валу двигуна (за допомогою датчика швидкості). Основним принципом скалярного керування є зміна частоти та амплітуди напруги відповідно до закону $U / f^n = \text{const}$ де $n \geq 1$. Конкретний вид залежності визначається вимогами, що пред'являються до електроприводу навантаженням. Зазвичай за незалежну вплив приймається частота, а значення напруги при даній частоті визначає вид механічної характеристики, значення пускового і критичного моментів. Скалярне керування забезпечує сталість перевантажувальної здатності електроприводу незалежно від частоти напруги, проте має місце зниження розвинутого двигуном моменту при низьких частотах (при $f < 0,1 f_{\text{ном}}$). Максимальний діапазон регулювання швидкості обертання ротора при незмінному моменті опору для електроприводів з скалярним управлінням досягає 1:10 – це повністю задовольняє умови роботи гумозмішувача, так як максимальний необхідний діапазон регулювання швидкості обертання роторів гумозмішувача становить 1:3.

Метод скалярного керування відносно простий в реалізації, але має два істотні недоліки. По-перше, за відсутності датчика швидкості на валу двигуна неможливо регулювати швидкість обертання вала, тому що вона залежить від навантаження. Наявність датчика швидкості вирішує цю проблему, однак залишається другий істотний недолік – не можна регулювати момент на валу двигуна. З одного боку, і цю проблему можна вирішити встановленням датчика моменту, однак такі датчики мають дуже високу вартість, часто перевищує .

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.1. Вплив частоти на електромагнітні процеси в асинхронному двигуні гумозмішувача

Вивчення впливу зміни частоти почнемо з електромагнітних процесів в асинхронному двигуні (АД). Для цього запишемо векторне рівняння у ланцюзі статора АД в нерухомій системі координат, опускаючи індекс системи:

$$u_1 = r_1 i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} \quad (2.1)$$

Далі представимо повне потокозчеплення статора Ψ_1 вигляді суми потокозчеплення розсіювання та основного потокозчеплення $\Psi_1 = \Psi_{1\sigma} + \Psi_m$. Потокозчеплення розсіювання створюється струмом статора і його можна представити як $\Psi_{1\sigma} = L_{1\sigma} i_1$. Підставляючи ці вирази у (2.1), отримаємо:

$$u_1 = r_1 i_1 + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} + \frac{d\Psi_m}{dt} \quad (2.2)$$

Векторне рівняння (2.2) не містить ЕРС обертання, що рівняння фазної напруги матиме буквально такий же вигляд і в символічній формі його можна записати у вигляді:

$$\underline{U}_{1m} = r \underline{I}_{1m} + j\omega_1 L_{1\sigma} \underline{I}_{1m} + j\omega_1 w_{1\sigma} \underline{\Phi}_m \quad (2.3)$$

Тут потокозчеплення $\underline{\Psi}_m$ представлено через ефективне число витків обмотки статора $w_{1\sigma}$ і комплексну амплітуду основного магнітного потоку $\underline{\Phi}_m$, а множники $j\omega_1$ відповідають операції диференціювання в рівнянні (2.2). Звідси комплексна амплітуда потоку:

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\underline{\Phi}_m = \frac{-j}{2\pi\omega_{1\sigma}} \left(\frac{\underline{U}_{1m}}{f_1} - \frac{r_1}{f_1} \underline{I}_{1m} - j2\pi L_{1\sigma} \underline{I}_{1m} \right) \quad (2.4)$$

Якщо прийняти $r_1 \approx 0$; $L_{1\sigma} \approx 0$, то амплітуда основного магнітного потоку буде рівна:

$$\Phi_m = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\omega_{1\sigma}} \left(\frac{U_1}{f_1} \right) = c_\Phi \frac{U_1}{f_1} \quad (2.5)$$

тобто буде визначатися співвідношенням U_1/f_1 , яке в АТ виконує функцію аналогічну струму збудження двигуна постійного струму (ДПС). Що для підтримки постійного головного магнітного струму при зміні частоти харчування АТ необхідно одночасно змінювати напругу.

Активний опір обмотки статора r_1 зазвичай відносно небагато, але все ж має кінцеве значення. Що другий доданок в (2.4) при зменшенні частоти збільшується, знижуючи основний потік артеріального тиску. Це зниження пропорційно також величині струму статора і збільшується в міру збільшення навантаження АТ. Його можна компенсувати відповідним збільшенням напруги U_1 , однак, за будь-яких кінцевих значеннях r_1 і I_1 , якщо $f_1 \rightarrow 0$, то величина магнітного потоку також знижується до нуля.

Розмір третього доданка в рівнянні (2.3) визначається індуктивністю розсіювання і струмом статора. У міру зростання навантаження це доданок також збільшується і знижує магнітний потік, однак, на відміну від зниження, викликаного падінням напруги на r_1 , вплив навантаження тут проявляється на всіх частотах однаково.

Введемо відносні величини: частоту статора, частоту ротора і напруга статора:

$$\alpha = \frac{\omega_1}{\omega_{1ном}} = \frac{f_1}{f_{1ном}} \quad (2.6)$$

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\beta = \frac{\omega_2}{\omega_{1\text{НОМ}}} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_{1\text{НОМ}}} = \frac{f_2}{f_{1\text{НОМ}}} \quad (2.7)$$

$$\gamma = \frac{U_1}{U_{1\text{НОМ}}} \quad (2.8)$$

Тоді рівняння кіл статора і ротора, а також схему заміщення АД в статичному режимі можна представити так, як показано на рис. 2.1, а, де:

$$x_{1\sigma}(\alpha) = \omega_1 L_{1\sigma} = \alpha \omega_{1\text{НОМ}} L_{1\sigma} = \alpha x_{1\sigma}; \quad (2.9)$$

$$x_{2\sigma}(\alpha) = \omega_1 L_{2\sigma} = \alpha \omega_{1\text{НОМ}} L_{2\sigma} = \alpha x_{2\sigma}; \quad (2.10)$$

$$x_m(\alpha) = \omega_1 L_m = \alpha \omega_{1\text{НОМ}} L_m = \alpha x_m; \quad (2.11)$$

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\omega_2 \cdot \omega_{1\text{НОМ}}}{\omega_1 \cdot \omega_{1\text{НОМ}}} = \frac{\beta}{\alpha}. \quad (2.12)$$

Використовуючи ці вирази перетворимо схему заміщення і обліку рис. 2.1, б, де всі параметри АТ відповідають номінальній частоті. Ця схема наочно ілюструє розглянуті вище зміни головного магнітного струму при зміні частоти. При зменшенні частоти всі опори схеми заміщення, крім r_1 , будуть зменшуватися і вхідна напруга перерозподілятися між r_1 і всієї іншою частиною ланцюга:

$$\underline{U}_{r1} \xrightarrow{\alpha \rightarrow 0} \underline{U}_1 \text{ и } \underline{U}_{ab} \xrightarrow{\alpha \rightarrow 0} 0 \Rightarrow \underline{\Phi}_m \xrightarrow{\alpha \rightarrow 0} 0 \quad (2.13)$$

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

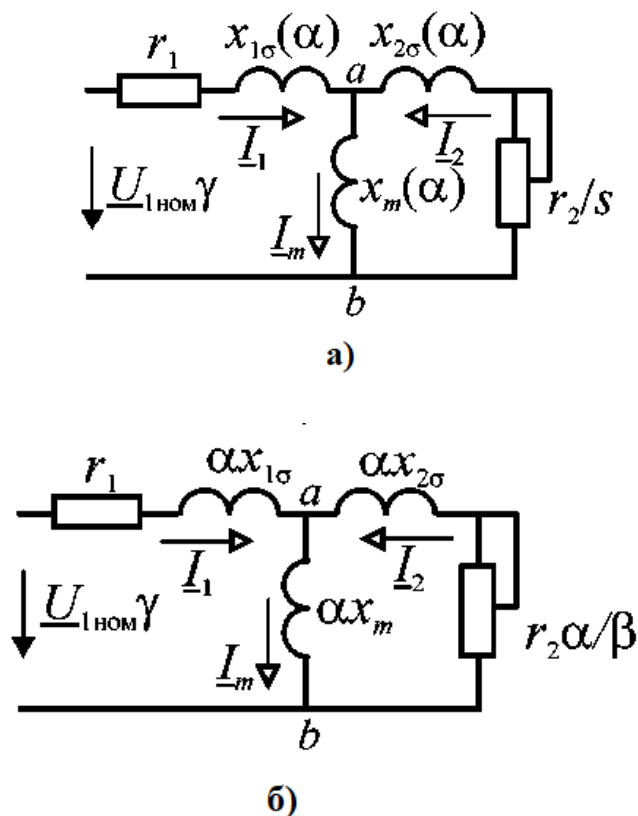


Рис. 2.1. Схема заміщення АД при частотному керуванні

Не важко помітити, що частота ротора в схемі заміщення рис. 2.1 виконує функцію ковзання при номінальній частоті. При змінній частоті ковзання не може служити параметром, що безсумнівно визначає режим двигуна, що воно залежить від, що в теорії частотного управління відносна частота ротора відповідно до виконуваної функцією нерідко називається абсолютним ковзанням.

Користуючись схемою заміщення на рис. 2.1, можна визначити залежності всіх величин ($E_1 = U_{ab}$, Φ , I_1 , I_2 , I_m , M) від відносних змінних: α , β , γ , φ , ι .

Закон М. П. Костенко. Найбільший загальний аналіз процесів в АД, зроблений у попередньому розділі, дозволяє зробити висновок про те, що для забезпечення працездатності приводу при модульному частотному управлінні необхідно задати функціональний зв'язок між каналами керування напругою і частотою статора, звану законом управління.

У 1925 академік Михайло Полієвктович Костенко сформулював загальний закон, що забезпечує оптимальні умови роботи двигуна в такій формі: щоб забезпечити оптимальний режим роботи артеріальний тиск при всіх значеннях

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

частоти і навантаження, необхідно відносно напруга двигуна змінювати пропорційно добутку відносної частоти на корінь квадратний з відносного моменту:

$$\gamma = \alpha \sqrt{\mu}, \quad (2.14)$$

Де $\mu = M/M_{\text{ном}}$ – відносний електромагнітний момент. Якщо магнітна ланцюг машини слабо насичена і активним опором статора можна знехтувати, то АТ в цьому випадку буде працювати при зручно постійному коефіцієнті потужності, запасі статичної стійкості і беззастережному ковзанні. Закон Костенка можна отримати з цих елементарних міркувань. Якщо припустити, що коефіцієнт перевантажувальної здатності при регулювання залишається постійним, то критичний момент, залежить від квадрата величини магнітного струму, також повинен залишатися постійним і відношення моментів при двох різних частотах дорівнює:

$$\frac{M'}{M''} = \frac{(\Phi')^2}{(\Phi'')^2} \Rightarrow \frac{\Phi'}{\Phi''} = \sqrt{\frac{M'}{M''}}. \quad (2.15)$$

Але якщо знехтувати r_1 , то напруга статора буде врівноважуватися в основному ЕРС магнітного потоку і відношення напруг буде дорівнювати:

$$\frac{U'}{U''} \approx \frac{E'}{E''} = \frac{\Phi' f'}{\Phi'' f''}. \quad (2.16)$$

Підставляючи (2.15) в (2.16), отримаємо закон Костенко:

$$\frac{U'}{U''} = \frac{f'}{f''} \sqrt{\frac{M'}{M''}} \Leftrightarrow \gamma = \alpha \sqrt{\mu} \quad (2.17)$$

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для деяких найпростіших випадків із закону Костенко можна виключити відносний момент. Вважаючи з точністю до ковзання $\omega_1 \approx \omega$, представимо рівняння механічної характеристики навантаження ступеневої функції $M_c = C\omega^k$ або, у відносних одиницях, як $\mu = \alpha^k$. Тоді вираз (2.14) набуде вигляду:

$$\gamma = \alpha^{\left(1 + \frac{k}{2}\right)} \quad (2.18)$$

І для типових видів навантаження ми отримуємо закони керування, наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Закони керування АД

	Вид навантаження		
	Статична $M_c = const; k = 0$	Вентиляторна $M_c = C\omega^2; k = 2$	Постійна потужність $M_c\omega = const; k = -1$
Закон керування	$\gamma = \alpha$	$\gamma = \alpha^2$	$\gamma = \sqrt{\alpha}$

Ці закони є фактичним стереотипом, закладеним в усі сучасні перетворювачі частоти широкого застосування. Закон Костенка можна розглядати стосовно до розімкнутої і замкнутої систем управління. Суттю закону є управління напругою (магнітним потоком) машини в функції навантаження на валу без безпосереднього її вимірювання. Якщо навантаження зменшується, то магнітний потік можна також зменшити, зменшивши напругу, але зберігши при цьому припас статичної стійкості.

2.2. Розімкнені системи частотного керування гумозмішувачем

Як відомо, будь-яка система електропривода в статичному режимі повинна забезпечувати стійкість з певним запасом, а також задане значення однієї або декількох вихідних координат з відхиленням, що не перевищує допустимої величини. У той же час, будь-яка технічна задача має кілька можливих рішень і при інших рівних умовах звичайно вибирається найбільш просте [7]. Що якщо до динаміки приводу не пред'являється особливих вимог, а статичні властивості відповідають умовам поставленого завдання, то найбільш простим і ефективним рішенням є використання частотного регулювання в розімкнутій системі.

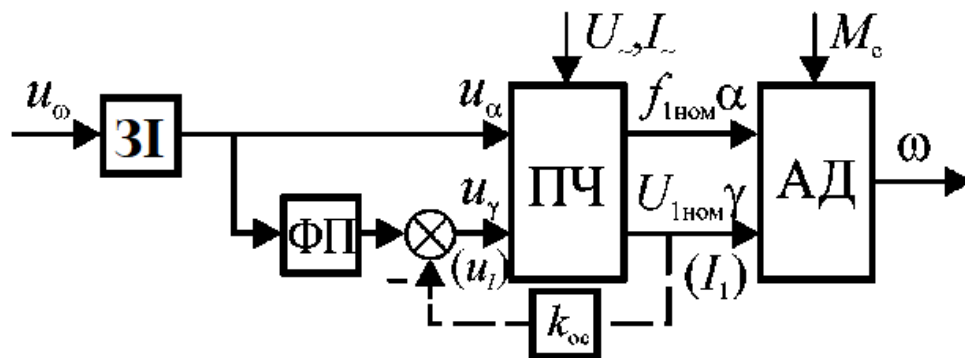


Рис 2.2. Функціональна схема розімкнутої системи частотного керування

Функціональна схема розімкнутої системи показана на малюнку 2.2 Тут статор АД підключений до перетворювача частоти (ПЧ), що має два незалежних каналу керування амплітудою u_γ і частотою u_α вихідної напруги або струму. Канал управління амплітудою може бути охоплений негативним зворотним зв'язком за відповідним параметру. На малюнку вона показана штриховий лінією. У цьому випадку ПЧ має властивості ідеального джерела напруги або струму, і параметри його вихідних ланцюгів можуть не враховуватися при аналізі процесів в АД. В іншому випадку імпеданс вихідних ланцюгів перетворювача включають в параметри ланцюга статора.

Функціональний перетворювач (ФП) необхідний для формування закону керування напругою або струмом статора АД в залежності від частоти, тобто частота в такій системі є незалежним параметром, що визначає швидкість обертання АТ з точністю до ковзання. Задатчик інтенсивності (ЗІ) працювати для налаштування швидкості наростання і спаду вхідного сигналу, що виключає електричні і механічні перевантаження. Ретельно його настройка особливо необхідно, якщо ПЧ неререверсивний, тобто не має здатності двостороннього обміну енергією між мережею і АТ, що в цьому випадку кінетична енергія, накопичена зворотними масами, при гальмуванні буде розсіюватися в перетворювачі, створюючи неприпустимі перевантаження або навіть аварійні режими. При частотно-струмового управління, тобто якщо ПЧ працює в режимі джерела струму, механічні властивості АТ не залежать від частоти і мають істотно меншим критичним ковзанням. Крім такого, АТ розвиває значно більший момент на валу при Що ж струмі статора. Проте, позитивні властивості частотно-струмового управління можна використовувати тільки в замкнутій системі з струмом статора, що змінюються в функції беззастережного ковзання, що в неприємному випадку необхідна перевантажувальна здатність досягається значним збільшенням напруги і струму, що неприпустимо в тривалому режимі. Що в більшості випадків ПЧ є джерелом напруги.

Керування частотою за законом $U_1 / f_1 = \text{const}$ і при $U_1 = \text{const}$. Керування за законом $U_1 / f_1 = \text{const}$ або, що те ж саме, $\gamma = \alpha$ є найбільш поширеним окремим випадком закону М.П. Костенко.

Схему заміщення для статичного режиму можна отримати зі схеми рис.2.1, б, діленням всіх параметрів на. У цьому випадку вона має вигляд, показаний на рис. 2.3, а. Основний магнітний потік пропорційний падіння напруги на гілці намагнічування U_{bc} . Тому при зменшенні частоти ($\alpha \rightarrow 0$) і при збільшенні навантаження ($\beta \rightarrow \infty$) він буде зменшуватися. У першому випадку буде збільшуватися падіння напруги на r_1 / α за рахунок зменшення α , а в другому - буде

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збільшуватися падіння напруги на імпедансі статора $z_1 = \sqrt{(r_1/\alpha)^2 + x_{1\sigma}^2}$ за рахунок збільшення струму тому I_1 , так як $z_{ab} \xrightarrow{\beta \rightarrow \pm\infty} \min z_{ab} = x_m P x_{2\sigma} \approx x_{2\sigma}$. На рис.2.3, б, показані типові криві зміни потоку. Як і слід було чекати, при будь-якому навантаженні магнітний потік знижується до нуля при $\alpha \rightarrow 0$, однак при частотах статора близьких до номінальної потік знижується слабо. Зменшення потоку тим більше, чим вище навантаження двигуна, тобто частота ротора або абсолютне ковзання β .

Зі зменшенням частоти статора при тих же значеннях частоти ротора зменшуються струм, момент і потужність двигуна за рахунок збільшення. Зменшується також і ККД двигуна, а коефіцієнт потужності зростає, тому що збільшується активна складова вхідного імпедансу.

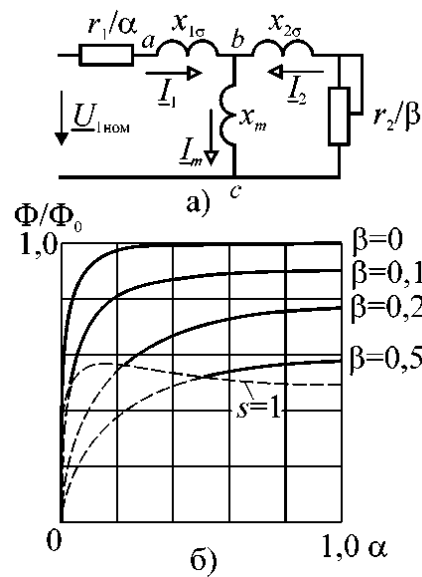


Рис. 2.3. Схема заміщення (а) та відносна зміна потоку при зміні частоти і навантаження (б)

Вираз у формі Клоса:

$$M = \frac{2M_k(1 + q\beta_k)}{\frac{\beta}{\beta_k} + \frac{\beta_k}{\beta} + 2q\beta_k} \quad (2.19)$$

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

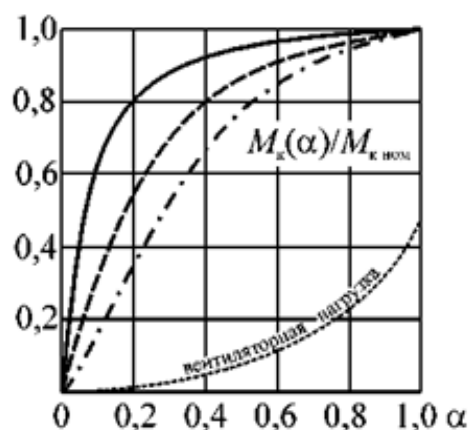
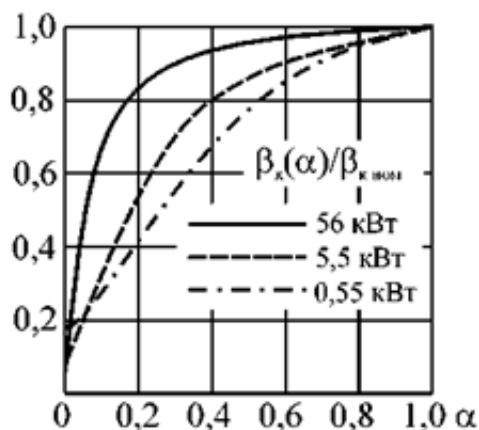
Рівняння механічної характеристики АД при управлінні за законом

$$U_1/f_1 = \text{const}.$$

$$M = M_{\kappa} \frac{2(1 + q\beta_{\kappa})}{\frac{\beta}{\beta_{\kappa}} + \frac{\beta_{\kappa}}{\beta} + 2q\beta_{\kappa}} \quad (2.20)$$

де, $q = \frac{x_m^2}{\alpha z_1^2} \frac{r_1}{r_2}$; $z_1(\alpha) = \sqrt{(r_1/\alpha)^2 + x_1^2}$; $z_1'(\alpha) = \sqrt{(r_1/\alpha)^2 + (x_1')^2}$; $x' = \sigma \cdot x_1$; $k_2 = x_m/x_2$
 $\beta_{\kappa} = \frac{r_2}{x_2} \frac{z_1(\alpha)}{z_1'(\alpha)}$ – абсолютне критичне ковзання;
 $M_{\kappa} = \frac{m_1 U_{1\text{ном}}^2}{\omega_{1\text{ном}}} \cdot \frac{q\beta_{\kappa}}{2r_1(1 + q\beta_{\kappa})}$ – критичний момент.

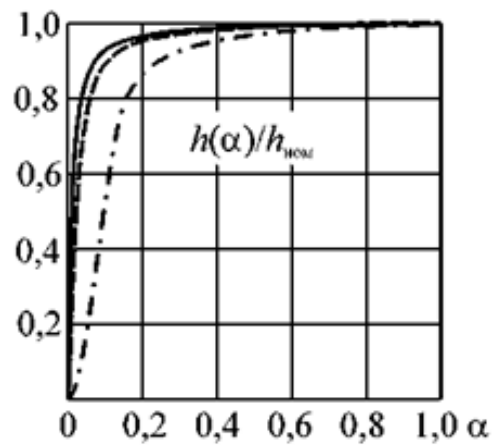
З виразу (2.19) випливає, що всі три величини, що визначають механічну характеристику АД, $(M_{\kappa}; \beta_{\kappa}; q)$ змінюються при зміні частоти. Через вплив активного опору статора r_1 критичний момент в генераторній області $M_{\kappa\text{г}}$ істотно вище, ніж в області двигуна $M_{\kappa\text{д}}$. У режимі двигуна зі зменшенням частоти критичний момент монотонно зменшується, що означає зменшення запасу статичної стійкості при роботі на навантаження з постійним моментом. На рис. 2.4 наведені залежності критичного моменту і абсолютного ковзання від частоти для двигунів різної потужності, віднесені до їх значень при номінальній частоті. Там же наведені криві оцінки модуля відносної жорсткості механічних характеристик $h(\alpha)$ лінеаризованих на робочій ділянці.



					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

а)

б)



в)

Рис. 2.4. Зміна критичного абсолютного ковзання (а), зміна критичного моменту (б), зміна жорсткості у машин різної потужності (в)

З кривих на рис. 2.4 випливає, що при управлінні за законом $U/f = const$ в принципі неможливо забезпечити перевантажувальну здатність на рівні природної характеристики АД. Якщо ж допустити деяке зниження запасу стійкості, то тим самим визначиться і діапазон регулювання як $D = 1/\alpha_{пр}$, де $\alpha_{пр}$ – гранична частота, що відповідає допустимому зниженню. Нехай, наприклад, можливе зниження перевантажувальної здатності до 0,8 від значення природної характеристики. Тоді для різних потужностей АД по кривих $M_k(\alpha)$ отримаємо граничні значення частот 0,2; 0,4 і 0,53, що за умовою запасу стійкості відповідає діапазонами регулювання 5:1; 2,5:1 і 1,9:1 для двигунів потужністю 56; 5,5 і 0,55 кВт. Характер залежності $M_k(\alpha)$ для двигунів всіх потужностей однаковий, але зі збільшенням потужності крутизна її в області низьких частот зростає, збільшуючи діапазон регулювання. Це пов'язано з тим, що зі збільшенням потужності зменшується відносна величина активного опору статора і його вплив на електромеханічні процеси.

Слід зауважити, що діапазон регулювання визначається характеристиками двигуна і навантаження. Для розглянутого закону керування у разі вентиляторного навантаження діапазон регулювання теоретично дорівнює нескінченності. На

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

малюнку побудована така характеристик, з моментом рівним половині критичного на номінальній частоті.

Як видно з малюнка для двигунів всіх потужностей перевантажувальна здатність на всіх частотах $(M_k(\alpha)/M_{\text{вент}}(\alpha))$ більше 2, тобто більше, ніж на природній характеристиці. Тому закон регулювання $U/f = \text{const}$ в основному використовують саме для таких приводів. У реальних приводах до вентиляторного моменту додається момент сухого тертя, і діапазон регулювання знижується і складає (50 ... 30):1.

Однак діапазон регулювання визначається зазвичай не тільки завданням збереження запасу стійкості, але також і умовою забезпечення заданого астатизму, тобто жорсткості механічних характеристик. Криві $h(\alpha)$ (рис. 2.4) свідчать, що жорсткість природної характеристики максимальна і знижується зі зменшенням частоти до нуля. Крім того, з рисунку випливає, що жорсткість механічних характеристик до певної межі менш схильна до впливу зміни частоти, ніж критичний момент. Для двигунів потужністю більш ніж 1...2 кВт зниження жорсткості в діапазоні регулювання 10:1 складає величину порядку 7-10% і в більшості випадку цілком задовольняє заданим вимогам значної кількості приводів. Якщо ж потрібна велика жорсткість характеристик або ширший діапазон регулювання, то використовують замкнуті системи частотного регулювання.

Якщо абсолютна критичне ковзання представити через відносне $\beta_k = \alpha s_k$ і підставити в рівняння механічної характеристики (2.20), то можна побудувати сімейство механічних характеристик у функції відносного ковзання або частоти обертання представлено на рис. 2.5. Тут же показані криві точок перекидання для двигунів різних потужностей. Ці характеристики, а також інші розглянуті раніше показують, що всі експлуатаційні властивості АД, крім коефіцієнта потужності, при керуванні за законом $U/f = \text{const}$ зі зменшення їм частоти погіршуються. Причому, це погіршення стає особливо помітним приблизно з $\alpha > 0,5$, хоча вказана межа досить умовна і залежить від параметрів машини. І в першу чергу від відносного значення активного опору статора.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

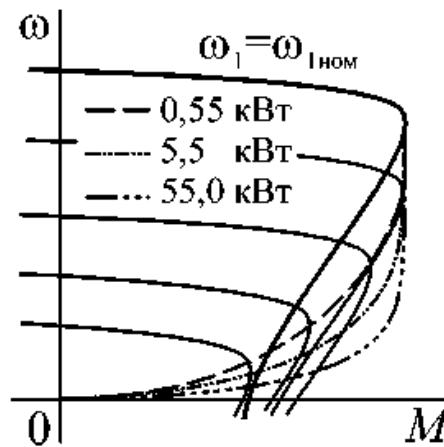


Рис. 2.5. Механічні характеристики АД при керуванні по закону $U/f = \text{const}$

Таким чином, режим управління $U/f = \text{const}$ ефективно може застосовуватися тільки в приводах з вентиляторної навантаженням. Для інших пристроїв необхідно використовувати закони керування, що забезпечують збільшення відношення U_1/f_1 в міру зниження частоти для компенсації падіння напруги на активному опорі статора.

У деяких випадках діапазон регулювання можна розширити за рахунок підвищення частоти. Якщо при цьому зберігати співвідношення U_1/f_1 , то потужність двигуна буде зростати і, відповідно, зростатиме навантаження на перетворювачі. Тому при керуванні у діапазоні частот вище номінальної напруга статора підтримують постійним $U_1 = \text{const}$.

Користуючись схемою заміщення рис. 2.3, а, відносно значення потоку можна представити як:

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \left| 1/\alpha - \frac{I_1}{U_{1\text{ном}}} (r_1/\alpha + jx_{1\sigma}) \right| \quad (2.21)$$

У режимі холостого ходу потік змінюється обернено пропорційно частоті рис. 2.6, а, а під навантаженням він знижується тим повільніше, чим більше абсолютне ковзання.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

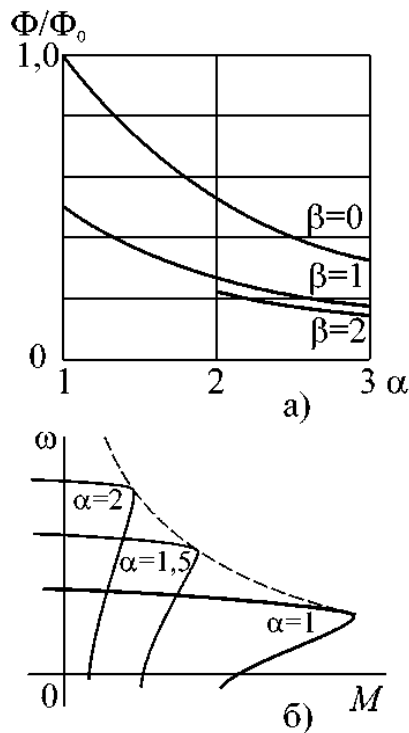


Рис. 2.6. Зміна магнітного потоку при різних навантаженнях (а) і механічні характеристики (б) в області частот вище номінальної при постійній напрузі $U_1 = const$

Зміни потоку при збільшенні частоти викликані зменшенням струму статора внаслідок зростання індуктивного опору розсіювання $x_{1\sigma}$, яке в цьому режимі відіграє таку ж роль, як активний опір r_1 при управлінні за законом $U_1/f_1 = const$. При збільшенні частоти наявний електромагнітний момент двигуна зменшується обернено пропорційно квадрату α рис. 2.6, б, а наявна потужність – обернено пропорційно до першого ступеня α , тому що одночасно зростає швидкість обертання поля.

Поєднання двох режимів частотного керування $U_1/f_1 = const$ і $U_1 = const$ дає можливість отримати двозонне регулювання швидкості АД абсолютно аналогічному двозонному регулюванню ДПС. Особливість полягає лише в тому, що регулювання швидкості при частотному керуванні здійснюється зміною частоти в обох зонах, а режим керування потоком визначається законом керування напругою.

Керування з постійним критичним моментом. Під час аналізу електромагнітних процесів в АД при частотному керуванні було встановлено, що

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

максимальний момент при зниженні частоти зменшується внаслідок відносного зростання активного опору статора. Розглянемо можливість компенсації цього явища за рахунок зміни напруги. Для цього використовуємо вираз (2.19) для моменту АД у формі Клоса.

$$M = M_{\kappa} \frac{2(1 + q\beta_{\kappa})}{\frac{\beta}{\beta_{\kappa}} + \frac{\beta_{\kappa}}{\beta} + 2q\beta_{\kappa}}$$

$$\text{де, } q(\alpha) = \frac{r_1 \alpha}{r_2 [b(\alpha)]^2}; \quad \beta_{\kappa}(\alpha) = \pm r_2 \frac{b(\alpha)}{a(\alpha)}; \quad M_{\kappa}(\alpha, \gamma) = \frac{m_1 U_{1\text{ном}}^2}{\omega_{1\text{ном}}} \gamma^2 \frac{q\beta_{\kappa}}{2r_1 \alpha (1 + q\beta_{\kappa})}.$$

Критичний момент залежить від α і γ , тому з умови $M_{\kappa}(\alpha) = M_{\kappa}(1)$, тобто з умови, щоб критичний момент при будь-якому значенні α дорівнював моменту при номінальній частоті, отримаємо необхідний закон керування:

$$\gamma = \sqrt{\frac{r_1 \alpha \pm a(\alpha) \cdot b(\alpha)}{r_1 \pm a(1) \cdot b(1)}}, \quad (2.22)$$

При цьому законі керування γ не залежить від β , тому, користуючись виразом для потоку, можна знайти відношення потоків для граничних абсолютних ковзань.

$$\delta_{\Phi}(\alpha) = \frac{\Phi_{\beta=0}}{\Phi_{\beta=\pm 0}} = \frac{1}{x_{2\sigma}} \frac{a(\alpha)}{b(\alpha)} = \frac{r_2}{x_{2\sigma}} \frac{1}{\beta_{\kappa}} \quad (2.23)$$

Підставляючи в цей вираз граничні значення $\alpha = 1$ і $\alpha = 0$, отримаємо:

$$\frac{\delta_{\Phi}(0)}{\delta_{\Phi}(1)} = \sqrt{\frac{r_1^2 + x_1^2}{r_1^2 + [(x_{1\sigma} + x_{2\sigma} + x_{1\sigma} x_{2\sigma}) x_m / x_2]^2}} \quad (2.24)$$

При керуванні за законом забезпечується зразкову сталість потоку при зниженні частоти, а потім збереження перевантажувальної здатності АД забезпечується різким збільшенням магнітного потоку в зазорі і відповідного

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збільшення струму намагнічування $\delta_1 = I_m / I_{\text{ном}}$. Струм намагнічування може зрости до номінального значення струму статора і вище, що призведе до теплового перевантаження двигуна.

Таким чином, на відміну від закону керування $\gamma = \alpha$ або, що те ж саме, $U_1 / f_1 = \text{const}$, де обмеження діапазону регулювання було пов'язане зі зменшенням критичного моменту і жорсткості механічних характеристик, тут забезпечити роботу АД з номінальною перевантажувальною здатністю в широкому діапазоні регулювання частоти неможливо через зростання струму намагнічування і глибокого насичення магнітопроводу.

2.3. Замкнені системи частотного керування гумозмішувачем

Як вже зазначалося раніше, під системами модульного частотного керування ми розуміємо системи, що забезпечують заданий статизм і перевантажувальну здатність асинхронного електропривода за рахунок зміни частоти і напруги АД. У багатьох випадках ці вимоги реалізуються розімкнутими системами за допомогою введення певної функціональної залежності між каналами керування вихідною частотою і напругою перетворювача частоти. Якщо ж це неможливо, то використовують замкнуті системи керування з різними сигналами зворотного зв'язку рис. 2.7 Таким сигналами можуть бути струм та ЕРС статора (I_1 ; E_1), основний магнітний потік АД (Φ), частота обертання (ω) і частота ротора або абсолютне ковзання (β).

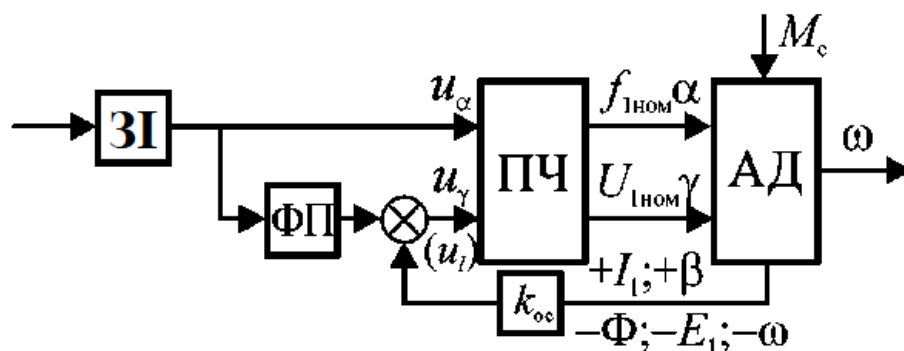


Рис. 2.7. Функціональна схема замкнутої системи частотного керування

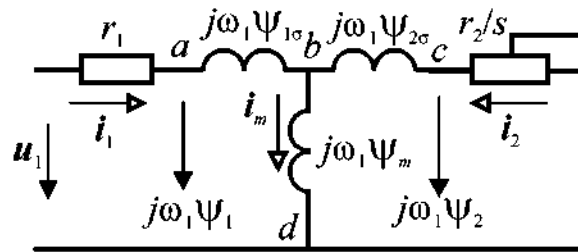
					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір сигналу зворотного зв'язку визначається безліччю умов: характером навантаження, технічних вимог до приводу, можливістю використання сигналів, що формуються в інших контурах управління [8]. Створення зворотного зв'язку з магнітного потоку в зазорі вимагає встановлення датчиків Холла; по ЕРС статора – укладання вимірювальної обмотки (витків) в пази статора. Сигнали абсолютного ковзання і частоти обертання вимагають установки тахогенератора, що частіше за все виправдано тільки у разі необхідності використання зворотного зв'язку по швидкості для отримання заданого статизма механічних характеристик. Найбільш доступним сигналом для частотного керування є струм статора, і саме він використовується в більшості приводів широкого застосування.

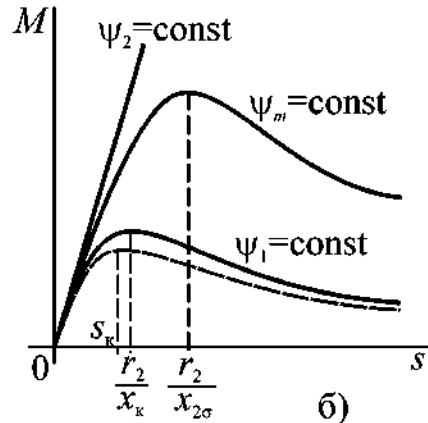
У кінцевому рахунку, вибір сигналу керування створює деякі особливості характеристик приводу, не впливаючи на основні властивості, що впливають з фізичних принципів перетворення енергії в АД. Розглянемо їх стосовно частотного керування.

Відомо, що механічні характеристики АД при постійному значенні напруги статора істотно нелінійних. Це пов'язано з тим, що зміна навантаження на валу викликає зміну струмів ротора і статора і пов'язаних з ними магнітних потоків, що створюють електромагнітний момент двигуна. Однак при живленні від регульованого джерела можна створити такий закон зміни напруги, при якому той чи інший магнітний потік машини буде стабілізовано. Тоді механічні характеристики двигуна змінять свої параметри або навіть знайдуть інший вигляд.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)

Рис. 2.8. Схема заміщення (а) і механічні характеристики АД (б) при різних законах частотного керування

Запишемо рівняння статора і ротора АД в статичному режимі і подамо потокозчеплення через основне потокозчеплення і потокозчеплення розсіювання:

$$u_1 = i_1 r_1 + j\omega_1 \Psi_1 = i_1 r_1 + j\omega_1 r_{1\sigma} + j\omega_1 \Psi_m = i_1 (r_1 + jx_{1\sigma}) + j\omega_1 \Psi_m; \quad (2.25)$$

$$0 = i_2 r_2 / s + j\omega_1 \Psi_2 = i_2 r_2 / s + j\omega_1 \Psi_{2\sigma} + j\omega_1 \Psi_m. \quad (2.26)$$

На рис. 2.8, а, представлена схема заміщення, що відповідає цим рівнянь. З неї випливають очевидні рівності:

$$\begin{aligned} 1) \quad u_{ad} &= u_1 - i_1 r_1 = j\omega_1 \Psi_1; \\ 2) \quad u_{bd} &= u_1 - i_1 (r_1 + jx_{1\sigma}) = j\omega_1 \Psi_m; \\ 3) \quad u_{cd} &= j\omega_1 \Psi_2 \approx u_1 - i_1 [r_1 + j(x_{1\sigma} + x_{2\sigma})]. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Нехай $|\Psi_1| = \Psi_{10} = const$. Тоді рівняння (2.27-1) для модулів можна представити у вигляді:

$$|u_{ad}| = U_{ad} = \gamma' U_{ad0} |u_1 - i_1 r_1| = \omega \Psi_{10} = \alpha \omega_{1ном} \Psi_{10}. \quad (2.28)$$

Очевидно, що воно справедливо тільки, якщо відносна напруга і частота пов'язані між собою постійним коефіцієнтом тобто $\gamma' = c\alpha$. У цьому випадку стабілізація потокозчеплення статора еквівалентна стабілізації напруги $U_{ad} = const$ або, що теж саме, підключення джерела до точок $a d$ схеми заміщення рис. 2.8, (а). Цим усувається або компенсується вплив на електромагнітні процеси в АД падіння напруги на r_1 . Тому цей закон керування називається IR -компенсацією. Реалізувати компенсацію можна, запровадивши позитивного зворотного зв'язку по струму статора.

Другий закон зміни напруги в замкнутій системі можна отримати вважаючи постійним основний магнітний потік $|\Psi_m| = \Psi_{m0} = const$. У цьому випадку можна отримати аналогічні співвідношення (2.28), якщо в них замінити r_1 на $z_1 = r_1 + jx_{1\sigma}$ і замість γ ввести відносна напругу $\gamma'' = U_{bd} / U_{bd0}$. Цей закон керування відповідає компенсації імпедансу статорної обмотки і називається IZ -компенсацією. Очевидно, такий режим означає також стабілізацію ЕРС статора ($U_{bd} = const$), що дозволяє отримати характеристики АД винятком r_1 і $x_{1\sigma}$ та зі схеми заміщення. Стабілізувати робочий потік АД можна, використовуючи сигнали струму або ЕРС статора, а також сигнали датчиків, що вимірюють магнітний потік в зазорі. Ви можете також оцінити потік, використовуючи миттєві значення напруги та струму статора у відповідності з рівнянням (2.27-2). Проте всі реалізації режиму IZ -компенсації істотно складніше і застосовуються в технічно і економічно обґрунтованих випадках.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Механічну характеристику, відповідно керування з постійним потоком ротора $|\Psi_2| = \text{const} \Leftrightarrow U_{cd} = \text{const}$ можна отримати з (2.19), вважаючи скомпенсовані, тобто рівними нулю $r_1, x_{1\sigma}, x_{2\sigma}$. Тоді:

$$M = \frac{m_1 z_p U_{cd}^2}{\omega_1 r_2} s \quad (2.29)$$

тобто в цьому випадку характеристика стає лінійною рис. 2.8, (б) і обмежується тільки режимом насичення магнітопроводу.

Максимальні моменти всіх характеристик визначаються рівнем стабілізованої напруги у відповідних точках схеми заміщення. Якщо взяти для розглянутих законів наближене рівність $U_{cd} \approx U_{bd} \approx U_{ad} = U_{1\text{ном}}$, то механічні характеристики будуть мати вигляд, представлений на рис. 2.8 (б).

IR-компенсація. Статичні характеристики. Статичні механічні характеристики цього режиму можна отримати з виразу (2.19), вважаючи в ньому $r_1 = 0$, $\gamma = 1$ і замість $U_{1\text{ном}}$, підставляючи $U'_1 = |U_{1\text{ном}} - I_{1\text{ном}} r_1| = \gamma' U_{1\text{ном}}$. Тоді:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{\beta}{\beta_k} + \frac{\beta_k}{\beta}} \quad (2.30)$$

$$\text{де } \beta_k = \frac{r_2 x_1}{x_{1\sigma} x_2 + x_{2\sigma} x_m}; \quad M_k = \frac{m_1 (U'_{1\text{ном}})^2}{2\omega_{1\text{ном}}} \cdot \frac{1}{x_{1\sigma}(1+\sigma) + x_{2\sigma}(1+k_{1\sigma})}.$$

При номінальному навантажувальному моменті співвідношення напруги на вході $U_{1\text{ном}}$ і після опору r_1 дорівнює:

$$\frac{U'_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} = \sqrt{\frac{q^2 \frac{s_{\text{ном}}}{r_2} + w^2 \frac{r_2}{s_{\text{ном}}}}{a(1) \frac{s_{\text{ном}}}{r_2} + b(1) \frac{r_2}{s_{\text{ном}}} + 2r_1}} \quad (2.31)$$

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, в даному режимі критичні момент і абсолютне ковзання не залежать від частоти статора, отже, механічні характеристики при зміні частоти зміщуються паралельно, зберігаючи жорсткість і перевантажувальну здатність. На рис. 2.11 показано сімейство механічних характеристик в режимі двигуна. Там штриховими лініями показані характеристики відповідні керуванню за законом $U_1/f_1 = \text{const}$. Як випливає з малюнка режим IR -компенсації дозволяє регулювати швидкість обертання АД з перевантажувальною здатністю і статизмом не менше ніж на природній характеристиці в діапазоні $D = 1/\beta_k$, що становить близько 10:1. Для отримання більшої жорсткості характеристик і, відповідно, більшого діапазону регулювання потрібно використовувати зворотний зв'язок за швидкістю обертання. У сучасних серійних перетворювачах частоти для АД режим IR -компенсації є стандартною функцією.

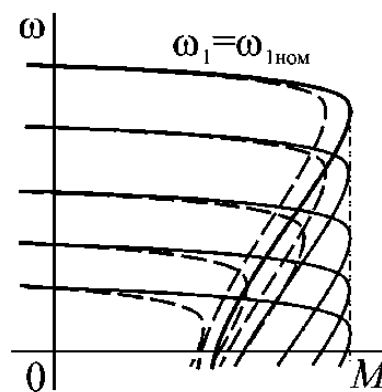


Рис. 2.9. Механічні характеристики АД при частотному керуванні з IR -компенсацією

IZ-компенсація. Статичні характеристики. Рівняння статичної механічної характеристики при IZ -компенсації можна отримати також, як воно було отримано для IR -компенсації із загального виразу (2.30), але вважаючи в цьому

випадку $\underline{z}_1 = 0$ і замість напруги статора, підставляючи
$$U = \left| \underline{U}_0'' \alpha - \underline{I}_{1ном} \underline{z}_1 \right| = \gamma'' U_{1ном}$$

, де
$$U_0'' = \frac{U_{1ном}}{b(1)} \approx \frac{U_{1ном} x_m}{x_1}$$
 – початкове значення внутрішньої напруги, відповідне до робочого потоку АД при холостому ході. Тоді:

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M = \frac{2M_{\kappa}}{\frac{\beta}{\beta_{\kappa}} + \frac{\beta_{\kappa}}{\beta}}, \text{ де } \beta_{\kappa} = \frac{r_2}{x_{2\sigma}}; \quad M = \frac{m_1 U_{1\text{НОМ}}^2}{2\omega_{1\text{НОМ}}} \cdot \frac{x_m}{x_{2\sigma} x_1}.$$

Тут як і у випадку *IR*-компенсації критичні момент і абсолютне ковзання не залежать від частоти статора, Критичні моменти в руховому і генераторному режимах однакові і перевершують момент в режимі двигуна на природній характеристиці в 2...3 рази. Співвідношення моментів у позначення основного рівняння механічної характеристики визначається виразом:

$$\frac{M_{IZ}}{M} = \frac{r_1 + a(1) \cdot b(1)}{x_{2\sigma} [b(1)]^2} \quad (2.32)$$

Характер цієї залежності від потужності АД рис 2.10 ідентичний режиму *IR*-компенсації з тією лише різницею, що значення критичного моменту у двигунів малої потужності більше, ніж втричі перевершують момент в номінальному режимі.

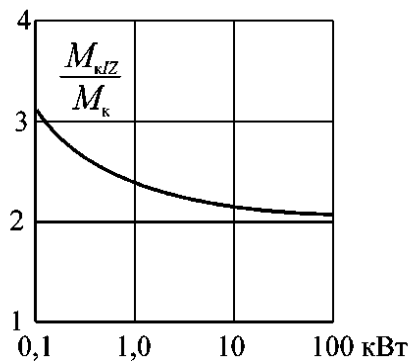


Рис. 2.10. Співвідношення критичного моменту при частотному керуванні

з *IZ* – компенсацією і критичного моменту природної характеристики АД. Критичне абсолютне ковзання в режимі *IZ*-компенсації приблизно вдвічі більше ковзання на природній характеристиці, тому у машин малої потужності жорсткість характеристик за рахунок збільшеного критичного моменту вище, а у машин середньої та великої потужності практично така ж, як на природній характеристиці, тому що у них критичний момент зростає також приблизно в два рази.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рис. 2.11 показано сімейство механічних характеристик в режимі двигуна при трьох режимах керування АД [9]. Як випливає з малюнка режим IZ -компенсації дозволяє регулювати швидкість обертання АД з високою перевантажувальною здатністю і статизмом не менше, ніж на природній характеристиці в діапазоні приблизно рівному діапазону в режимі IR -компенсації, тобто близько 10:1. Для отримання більшої жорсткості характеристик і, відповідно, більшого діапазону регулювання тут також потрібно використовувати зворотний зв'язок за швидкістю обертання.

Принциповою відмінністю режиму IZ -компенсації є неможливість насичення магнітопроводу за будь-яких частотах і навантаженнях, тому що напруга на гілці намагнічування підтримується постійним і рівним напрузі в режимі холостого ходу.

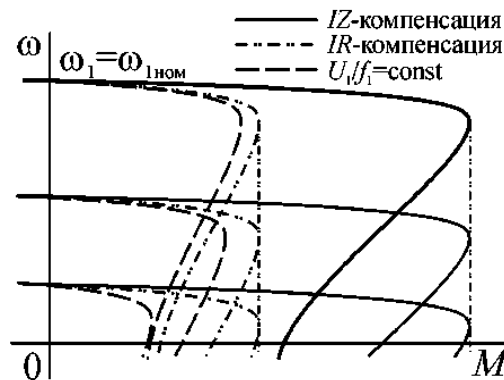


Рис. 2.11. Механічні характеристики АД при різних законах частотного керування

Незважаючи на зазначені переваги IZ -компенсації або режиму стабілізації магнітного потоку в зазорі машини, останнім часом він використовується все рідше. Це пов'язано з розвитком пристроїв цифрової обробки інформації, що дозволяють використовувати більш досконалі способи векторного керування АД.

2.4. Система ПЧ-АД зі зворотним зв'язком по швидкості

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Так як у даній системі керування електроприводом гумозмішувача використовується принцип керування системи перетворювач частоти – асинхронний двигун (ПЧ–АД). Розглянемо функціональну та структурну схеми. Функціональна структура розробленої авторами САК пластинчатим транспортером вузла завантаження реактора СПК наведена на рис. 2.12, де прийнято наступні позначення: ЗП – задавальний пристрій; РШ – регулятор швидкості; ПЧ – перетворювач частоти; АД – асинхронний двигун; Р – редуктор; РГ – ротори гумозмішувача; $\omega_{зРГ}$ – задане значення швидкості обертання РГ; $\varepsilon_{ш}$ – сигнал помилки керування швидкістю обертання РГ; $u_{РШ}$ – вихідний електричний сигнал регулятора швидкості; $U_{АД}$, $f_{АД}$ – змінна напруга та частота живлення АД, які формуються у ПЧ; $\omega_{АД}$ – кутова швидкість обертання вихідного валу АД; $\omega_{Р}$ – кутова швидкість обертання вихідного валу редуктора; $\omega_{РРГ}$ – реальне значення швидкості обертання РГ; $u_{ДШ}$ – вихідний електричний сигнал датчика швидкості обертання РГ; $u_{ДШ}$ – вихідний електричний сигнал датчика швидкості обертання РГ; $F(t)$ – збурювальний вплив, що діє на ротори гумозмішувача. На рис. 2.12 зображено функціональну схему системи ПЧ-АД зі зворотним зв'язком по швидкості.

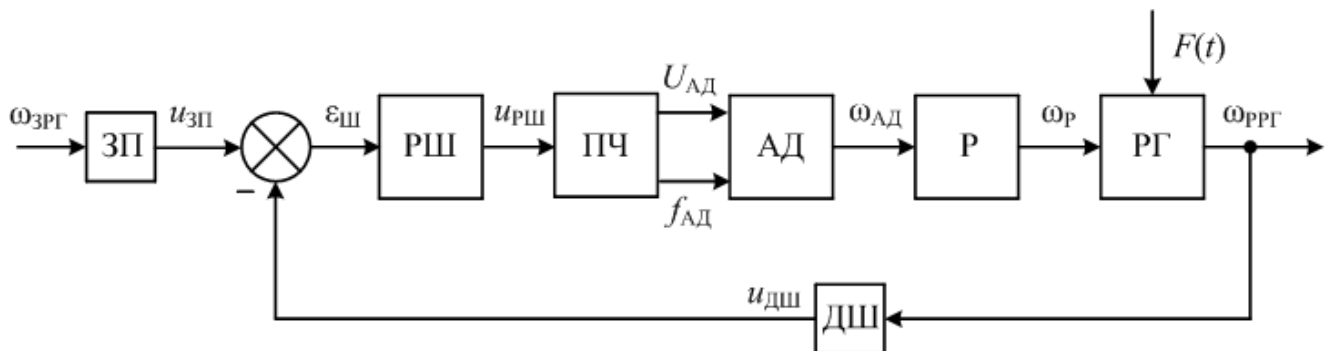


Рис. 2.12. Функціональна схема системи ПЧ-АД гумозмішувача зі зворотним зв'язком за швидкістю

На рис. 2.13 представлена структурна схема лінеаризованої системи, функціональна схема котрої приведена на рис. 2.12.

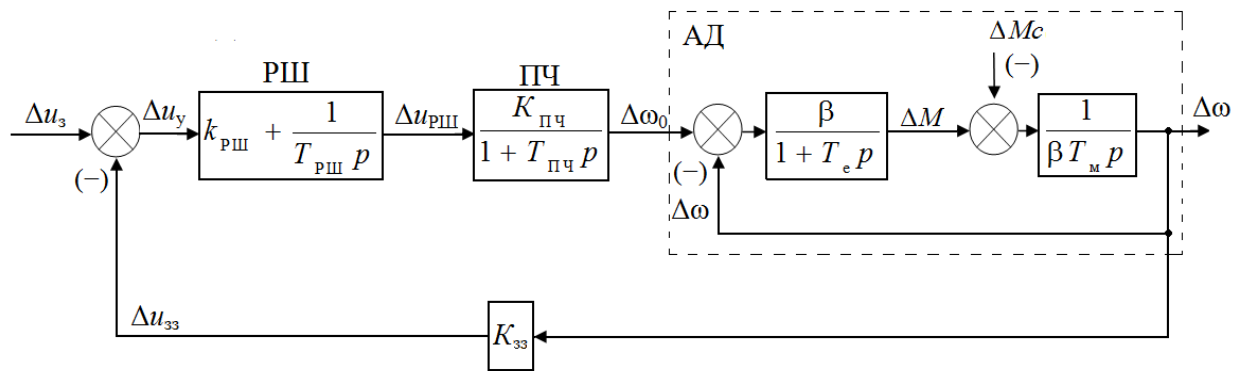


Рис. 2.13. Структурна схема системи ПЧ-АД з оберненим зв'язком

Стійкість і динамічні показники якості регулювання швидкості АД визначаються вибором параметрів пропорційної і інтегральної складової передатної функції РШ. Для розрахунку регуляторів буде використана структурна схема системи ПЧ-АД з оберненим зв'язком за швидкістю (рис. 2.13). У якості координати, що регулюється, будемо розглядати швидкість обертання вала двигуна, оскільки швидкість обертання роторів гумозмішувача жорстко зв'язана зі швидкістю обертання вала двигуна.

Висновки за розділом 2

В даному розділі було проведено математичне моделювання системи автоматичного керування гумозмішувачем. Був розглянутий вплив частоти на електромагнітні процеси в асинхронному двигуні гумозмішувача, також була наведена схема заміщення АД при частотному керуванні та розглянуті закони керування АД. На базі отриманої математичної моделі сформовано функціональну схему системи ПЧ-АД гумозмішувача зі зворотним зв'язком за швидкістю та структурна схема системи ПЧ-АД з оберненим зв'язком.

					6.050201.2341ст.ДР.ПЗ.Р1				
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ РОТОРІВ ГУМОЗМІШУВАЧА	Літ		Аркуш	Аркушів
Студент	Алфімов В.К.								
Керівник	Топалов А.М.								
Н. контр.	Вінниченко І.І.								
Зав. Каф.	Черно О.О.								
						НУК ім. адм. Макарова			

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ РОТОРІВ ГУМОЗМІШУВАЧА

3.1. Вибір та розрахунок двигуна гумозмішувача

В електроприводі гумозмішувача використовується асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором, який живиться від трьохфазної мережі змінного струму. Такий електродвигун може застосовуватись у багатьох сферах виробництва: механізми неперервного транспорту (конвеєри, транспортери), підйомні механізми (крани, ліфти), механізми відцентрового та поршневого типів, промислові верстати, екструдери та промислові міксери [10].

Асинхронні електродвигуни з короткозамкненими роторами фірми *Lenze* серії *MDXMA* володіють наступними перевагами:

- високий К.К.Д. та коефіцієнт потужності;
- мінімальна витрата електроенергії;
- низький рівень гучності;
- відсутність щіточко-колекторного вузла;
- ступінь захисту IP 54;
- клас ізоляції обмоток F;
- трифазне виконання з зовнішньої захистом за рахунок користувача;
- кількість оборотів: 1456 об / хв.

Згідно з завданням на дипломний проект обираємо асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором на 22 кВт. На підставі цього із каталогу асинхронних електродвигунів фірми *Lenze* вибираємо електродвигун типу *MDXMA180-22*. Основні технічні характеристики вибраного асинхронного електродвигуна приведені в таблиці 3.1. Загальний вигляд електродвигуна представлено на рис. 3.1.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 3.1. Асинхронний електродвигун *Lenze MDXMA*

Таблиця 3.1

Технічні характеристики електродвигуна *MCX MDXMA180-22*

Тип двигуна	$P_{\text{ном}}$ кВт	$n_{\text{ном}}$ об/х в	$M_{\text{ном}}$ Нм	$I_{\text{ном}}$ А	$U_{\text{но}}$ м В	$\cos\varphi$	К.К.Д . %	$M_{\text{к}}$ Нм	$M_{\text{п}}$ Нм	$I_{\text{п}}/I_{\text{но}}$ м	J кгм ²
<i>MDXMA</i> 180-22	22	1456	144,3	38,8	400	0,9	91	360	330	7,3	0,155

Обчислимо основні параметри обраного електродвигуна, за наступними вихідними даними:

- номінальна потужність $P_{\text{ном}} = 22$ кВт;
- частота живлячої мережі $f = 50$ Гц;
- частота обертання $n_{\text{ном}} = 1456$ об/хв.;
- момент інерції $J_{\text{дв}} = 0,155$ кгм²;
- коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) $\eta = 91$ %;

- кратність максимального моменту до номінального $\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{н}}} = \frac{360}{144,3} = 2,5$;

- кратність пускового моменту до номінального $\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}} = \frac{330}{144,3} = 2,3$;

					151.2347СТ.КР.ПЗ		Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{\pi n_{\text{дв}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1456}{30} = 152,4 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_{\text{хх}} = \frac{\pi n_{\text{с}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ с}^{-1};$$

$$s_{\text{н}} = \frac{\omega_{\text{хх}} - \omega_{\text{ном}}}{\omega_{\text{хх}}} = \frac{157 - 152,4}{157} = 0,029$$

$$s_{\text{к}} = \left(\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{н}}} + \sqrt{\left(\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{н}}} \right)^2 - 1} \right) s_{\text{н}} = \left(2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1} \right) 0,029 = 0,139$$

$$T_{\text{м}} = \frac{\omega_{\text{хх}} \cdot J_{\text{дв}}}{M_{\text{к}}} = \frac{157 \cdot 0,155}{360} = 6,8 \cdot 10^{-2} \text{ с};$$

$$K_0 = \frac{\omega_{\text{ном}}}{U_{\text{н}}} = \frac{152,4}{400} = 0,381 \text{ (рад/с)/В.}$$

3.2. Вибір перетворювача частоти САК швидкістю обертання роторів гумозмішувача

Для керування електродвигуном гумозмішувача використовується перетворювач частоти фірми *Lenze* серії 8200 та типу *ESMD 223 L4TXA*. Цей тип перетворювача як найкраще підходить для керуванням даного електродвигуна. Живиться він від трьохфазної мережі змінного струму напругою 320...528 В, і частотою 48...62 Гц.

Основні функції перетворювача частоти 8200 та типу *ESMD 223 L4TXA*:

- пуск і регулювання швидкості двигуна гумозмішувача;
- прискорення, сповільнення, зупинка;
- захист двигуна та перетворювача.

Із таблиці 3.1 вибираємо номінальні характеристики перетворювача частоти типу *ESMD 223 L4TXA*, і вносимо ці данні до таблиці 3.2. Також із таблиці 3.2 вибираємо габаритні розміри для цього перетворювача, і вносимо їх у таблицю 3.3.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.2

Номінальні характеристики перетворювача *ESMD 223 L4TXA*

Тип <i>ESMD...</i>	Потужність	Живлення		Вихідний струм			
	кВт	Напруга, частота	Струм	I_r		$I_{\max}$ за 60сек	
			А	А ¹	А ²	А ¹	А ²
223 L4TXA	22	3/ PE400/480V 50/60 Гц	52,0	46,0	42,0	69,0	64,0

В таблиці 3.3 верхніми індексами позначено:

- 1 – Для номінальної напруги мережі і частоти комутації 4, 6, 8 кГц;
2 – Для номінальної напруги мережі і частоти комутації 10 кГц.

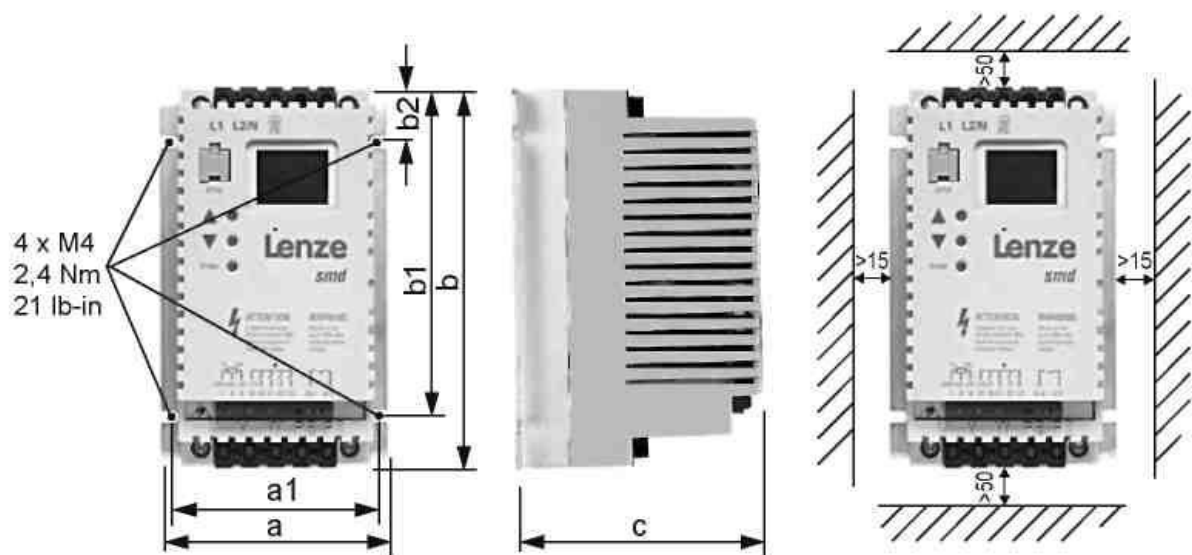
Таблиця 3.3

Габаритні розміри перетворювача *ESMD 223 L4TXA*

Тип <i>ESMD...</i>	<i>a</i> [мм]	<i>a1</i> [mm]	<i>b</i> [mm]	<i>b1</i> [mm]	<i>b2</i> [mm]	<i>c</i> [mm]	<i>m</i> [кг]
223 L4TXA	195	137	248	183	23	203	6.3

На рис. 3.2 представлений загальний вигляд та габаритні розміри перетворювача частоти *Lenze* серії 8200 модель *ESMD 223 L4TXA*, а в таблиці 3.4 представленні умови експлуатації. Для правильної роботи перетворювача необхідно підключати контакти та клеми у відповідності з вимогами підключення. На рис. 3.3 позначене правильне підключення виводів. *A* – екранні затискачі; *B* – кабель керування; *C* – кабель двигуна з низьким ємнісним опором; *D* – електропровідна монтажна опора; *E* – фільтр (якщо необхідно) [11].

					151.2347СТ.КР.ПЗ		Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			



Таблиця 3.4

Стандарти і умови експлуатації перетворювача ESMD 223 L4TXA

Ступінь захисту	IP 20;	
Схвалення	UL 508C – обладнання для перетворення енергії	
Макс. допустима довжина кабелю до двигуна	екранований: 50 м (з низьким ємнісним опором)	
	неекранований 100 м	
Фазна асиметрія вхідної напруги	$\leq 2\%$	
Вологість	$\leq 95\%$ без конденсації	
Вихідна частота	0...240 Гц	
Умови навколишнього середовища	Клас 3К3 згідно EN 50178	
Температурний діапазон	транспортування	-25...+70 °C
	зберігання	-20...+70 °C
	експлуатація	0...+55 °C
Висота установки	0...4000 метрів над рівнем моря	
Вібростійкість	стійкість до прискорення до 0,7 g 10...150Гц	
струм витоку на землю	>3,5 мА до захисного заземлення	

Заходи захисту від	короткого замикання, замикання на землю, підвищеної напруги, зупинки двигуна, перевантаження двигуна	
Експлуатація в комунальних мережах електроживлення	Повна потужність підключення до електромережі	
	< 0,5 кВт	Із мережевим дроселем
	0,5...1 кВт	Із активним фільтром
	> 1 кВт	Без додаткових заходів

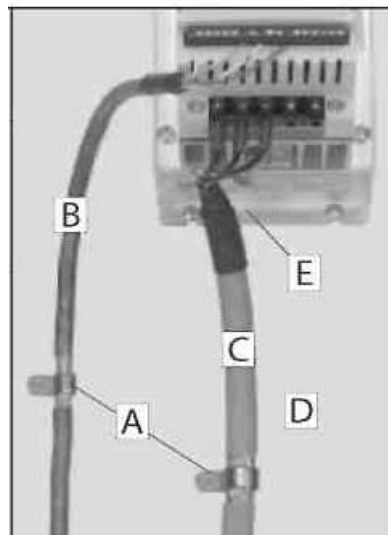


Рис. 3.3. Електричне підключення

На рис. 3.4 представлена схема підключення перетворювача частоти серії 8200 та типу *ESMD 223 L4TXA*

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

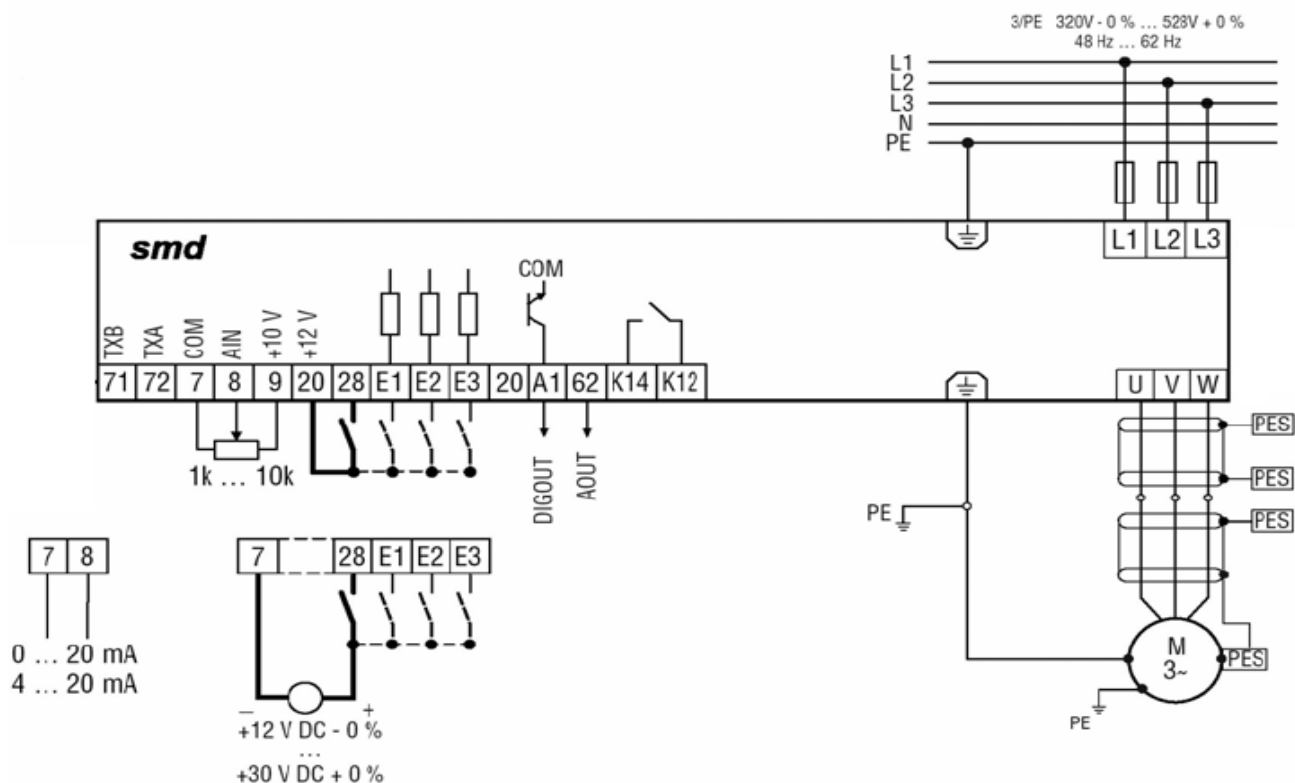


Рис. 3.4. Схема підключення перетворювача *ESMD 223 L4TXA*

Перетворювачі частоти підключають до живлячої мережі, гумозмішувача і до відповідних органів керування через спеціальні клеми, призначення кожної із клем обох перетворювачів представлені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Клеми керування

Клема	Характеристики для підключення перетворювача	
7	Опорна напруга	
8	Аналоговий вхід 0...+10 В (С34)	Вхідний опір: >50 кОм
9	Живлення потенціометра	+ 10 В, макс. 10 мА
20	Живлення дискретних входів	+ 12 В, макс. 20 мА
28	Дискретний вхід старт/стоп	LOW= Стоп

E3	Дискретний вхід настройка за допомогою CE3 (функція DCB)	HIGH = активація DCB
E1	Дискретний вхід, настройка за допомогою CE1 (функція JOG1)	HIGH= активація повільного ходу (JOG)
E2	Дискретний вхід настройка за допомогою CE2 (функція на пряму обертання)	LOW = обертання за годинниковою стрілкою HIGH = проти годинникової стрілки
K12	Релейний вхід (нормально розімкнутий контакт)	Змінний струм: 250 В / 3 А Постійний струм 24 В / 2 А...240 В / 0,22 А
K14	настройка за допомогою C08 несправність (TRIP)	
71	RS 485	Послідовний порт (клавіатура)
72	RS485	Послідовний порт (клавіатура)
A1	Конфігурація цифрових виходів з c17	DC 24V/50ma, NPN
62	Конфігурація аналогових виходів з c08 і c11	

$LOW = 0...+3\text{ В}$, $HIGH = +12...+30\text{ В}$.

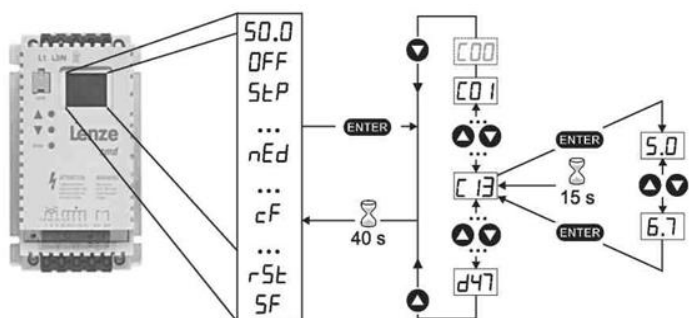


Рис. 3.5. Клавіатура налаштування перетворювача

Програмування перетворювача частоти і налаштування всіх режимів роботи відбувається за допомогою вмонтованої клавіатури. Приклад клавіатури показан на рис. 3.5.

3.3. Вибір датчику швидкості САК швидкістю обертання роторів гумозмішувача

Для цієї системи керування швидкістю обертання роторів гумозмішувача був обраний інкрементальний енкодер *ITD21 A4 TTL* фірми *Lenze*. Енкодер – пристрій, призначений для перетворення кута повороту об'єкту (валу), що обертається, в електричні сигнали, що дозволяють визначити кут його повороту. Енкодери підрозділяються на інкрементальні та абсолютні, які можуть досягати дуже високого розділення. Енкодери можуть бути як оптичні, резисторні, так і магнітні і можуть працювати через шинні інтерфейси або промислову мережу. Інкрементальні датчики обертання і датчики кута визначають поточну координату шляхом підрахунку числа імпульсів після проходження нульової точки, лічильником (окремий прилад). Для прив'язки системи відліку інкрементальні датчики мають референтну мітку (одну на оборот), через яку треба пройти після включення устаткування. Для визначення напрямку переміщення застосовуються два канали, в яких ідентичні послідовності імпульсів (меандр) зрушені на 90° один відносно одного, що дозволяє визначати напрям обертання і підвищує точність в два рази.



Рис. 3.6. Інкрементальний енкодер

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В даній системі керування інкрементальний енкодер використовується в якості датчика кутової швидкості обертання. Імпульси з енкодера надходять до дискретних входів перетворювача і за допомогою внутрішнього мікропроцесора обчислюються в електричний сигнал, пропорційний кутової швидкості обертання. Таким чином система керування отримує миттєве значення швидкості обертання ротора гумозмішувача.

Основні технічні характеристики енкодера *ITD21 A4 TTL*:

- рівень напруги – *TTL*;
- кількість імпульсів – 2048 ім/об;
- канали – 2 канали і нуль-мітка;
- напруга живлення – $5VDC \pm 5\%$;
- максимальна частота – 300 кГц;
- температурний діапазон – $-20^{\circ}C \dots +100^{\circ}C$;
- ступінь захисту від дії пилу і води *IP 54*;
- маса датчика тиску 300 г;
- максимальна швидкість – 8000 об/хв.

3.4. Розрахунок регуляторів САК швидкістю обертання роторів гумозмішувача

Для розрахунку регуляторів використаємо структурну схему системи ПЧ-АД з оберненим зв'язком за швидкістю (рис. 2.13). У якості координати, що регулюється, будемо розглядати швидкість обертання вала двигуна, оскільки швидкість обертання роторів гумозмішувача жорстко зв'язана зі швидкістю обертання вала двигуна.

При виконанні розрахунку за допомогою даної математичної моделі електропривода використано декілька допущень – частотний перетворювач, який працює у замкнутої системі керування по швидкості, здатен виконувати плавне регулювання частоти струму двигуна таким чином, що двигун працює на практично лінійній частині характеристики (момент опору від 0 до номінального і ковзання

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

від 0 до номінального). Крім того, вважаємо, що датчик швидкості має дуже малу інерційність, котру можна не брати до розрахунків.

На даній схемі в якості моделі двигуна для такого привода використана лінеаризована модель, що відповідає лінійної ділянці характеристики – від ω_0 до ω_H . Перетворювач частоти представлений аперіодичною ланкою. На схемі прийняті наступні позначення:

β – модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики:

$$\beta = 2M_k / (\omega_{0ном} s_k) = 2 \cdot 360 / (157 \cdot 0,139) = 33; \quad (3.1)$$

T_m – електромеханічна стала часу системи, визначається по формулі:

$$T_m = \frac{\omega_{xx} \cdot J_{\Sigma}}{M_k} = \frac{157 \cdot 1,345}{360} = 0,58 \text{ с}, \quad (3.2)$$

де J_{Σ} – сумарний момент інерції системи, приведений до валу двигуна, обчислюється по формулі:

$$J_{\Sigma} = J_{дв} + J_p + J_{рг} = 0,155 + 1,19 + 0,00036 = 1,345 \text{ кгм}^2, \quad (3.3)$$

де J_p та $J_{рг}$ – приведені до валу двигуна моменти інерції редуктора та роторів гумозмішувача відповідно.

T_e – еквівалентна електромагнітна стала часу кіл статора і ротору АД, вона визначається по формулі:

$$T_e = \frac{1}{\omega_{0ел.ном} s_k} = \frac{1}{314 \cdot 0,139} = 0,023 \text{ с}, \quad (3.4)$$

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $\omega_{0\text{ел.ном}}$ – кутова швидкість електромагнітного поля АД при його номінальній частоті живлення $f_{1\text{ном}} = 50$ Гц ($\omega_{0\text{ел.ном}} = 2\pi f_{1\text{ном}} = 314$ с⁻¹). Для АД загально-промислового призначення $s_k \cong 0,05 \dots 0,5$ (менші значення характерні для потужних двигунів), $T_e \cong (0,006 \dots 0,06)$ с.

$k_{\text{ПЧ}}$ – передатний коефіцієнт перетворювача частоти, визначається по формулі:

$$k_{\text{ПЧ}} = \Delta\omega_0 / \Delta u_{\text{рш}} = 2\pi\Delta f / (p_n \Delta u_{\text{рш}}) \quad (3.5)$$

При роботі АД в зоні частот $f_1 \leq f_{\text{ном}} = 50$ Гц і номінальному сигналі керування перетворювача $u_{\text{у.ПЧном}}$ співвідношення $\Delta f_1 / \Delta u_{\text{рш}} = f_1 / u_{\text{у.ПЧном}}$.

$T_{\text{ПЧ}}$ – постійна часу кола керування ПЧ, яка при високих частотах модуляції вихідної напруги промислових ПЧ (2...50 кГц) не перевищує 0,001 с.

Передатна функція ПІ-регулятора швидкості:

$$W_{\text{рш}}(p) = \Delta u_{\text{рш}} / \Delta u_y = k_{\text{рш}} + 1 / (T_{\text{рш}} p); \quad (3.6)$$

Передатна функція ланцюга зворотного зв'язку по швидкості двигуна:

$$W_{\text{рш}}(p) = \Delta u_{\text{о.с}} / \Delta\omega = k_{\text{о.с}} \quad (3.7)$$

При номінальному сигналі керування електроприводом, що дорівнює $u_{\text{з.с.ном}}$, і відповідній йому номінальній швидкості АД $k_{\text{о.с}} = u_{\text{з.с.ном}} / \omega_{\text{ном}}$. У відповідності до структурної схеми АД його результуюча передатна функція по відношенню до відхилення $\Delta\omega_0$ та з сумарним моментом інерції системи буде наступна:

$$W_{\text{д}}(p) = \Delta\omega / \Delta\omega_0 = 1 / (T_e T_{\text{м}} p^2 + T_{\text{м}} p + 1) \quad (3.8)$$

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Так як відношення $\frac{T_m}{T_e} = \frac{0,58}{0,023} = 25,22$, то $T_m \geq 10T_e$, для цього випадку передаточна функція двигуна матиме наступний вигляд:

$$W_d(p) = \Delta\omega / \Delta\omega_0 = 1 / (T_m p + 1) \quad (3.9)$$

Якщо віднести постійні часу до малих некомпенсованих постійних і в якості оцінки їх впливу прийняти $T_\mu = T_m + T_{ПЧ} + T_e$, то при налаштуванні електроприводу на модульний оптимум постійна інтегрування і коефіцієнт передачі пропорційної частини регулятора РШ визначається наступним чином:

$$T_{РШ} = k_{o.c} k_{ПЧ} a_\mu T_\mu; \quad k_{РШ} = T_\mu / T_{РШ} \quad (3.10)$$

Проведемо розрахунок постійних часу та коефіцієнтів:

$$T_\mu = T_m + T_{ПЧ} + T_e = 0,58 + 0,001 + 0,023 = 0,604 \text{ с}; \quad (3.11)$$

$$T_{РШ} = k_{o.c} k_{ПЧ} a_\mu T_\mu = 0,0275 \cdot 10 \cdot 1 \cdot 0,604 = 0,17 \text{ с}; \quad (3.12)$$

$$k_{РШ} = T_\mu / T_{РШ} = 0,604 / 0,17 = 3,55 \quad (3.13)$$

3.5. Математичне моделювання САК швидкістю обертання роторів гумозмішувача

Побудова перехідних характеристик системи відбувається з використанням програми Simulink з пакета програм *MATLAB*. ЛАЧХ та ЛФЧХ побудовані по розімкненій передаточній функції системи, а перехідні характеристики побудовані по структурній схемі, що показана на рис. 2.13.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

MATLAB – це високопродуктивна мова для технічних розрахунків. Вона містить у собі обчислення, візуалізацію і програмування у зручному вигляді, де задачі й розв’язки виражаються у формі, близькій до математичної. Типовим використанням *MATLAB* є математичні обчислення, створення алгоритмів, моделювання, аналіз даних, дослідження і візуалізація, наукова й інженерна графіка, розробка додатків, зокрема створення графічного інтерфейсу.

Simulink – це інтерактивна система для моделювання динамічних систем. Вона являє собою середовище, що дозволяє моделювати процес з переміщенням блоків та їх маніпуляцією для побудови перехідних процесів за структурною схемою. *Simulink* працює з лінійними, нелінійними, безперервними, дискретними, багатомірними системами.

На рис. 3.7 представлено схему для моделювання розімкнутої системи керування без зворотного зв’язку і корегувальної ланки у програмі *Simulink*, по якій побудовано графік перехідного процесу – рис. 3.10. Цей перехідний процес побудований за допомогою розрахованих постійних часу коефіцієнтів двигуна та перетворювача частоти.

З рис. 3.8 видно, що розімкнена система без зворотного зв’язку та корегувальної ланки має перехідний процес аперіодичного характеру. Час перехідного процесу становить близько 8 секунд. Швидкість на графіку

перехідного процесу (рис. 3.10) представлена у відносних одиницях,

$$\omega^* = \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}}$$

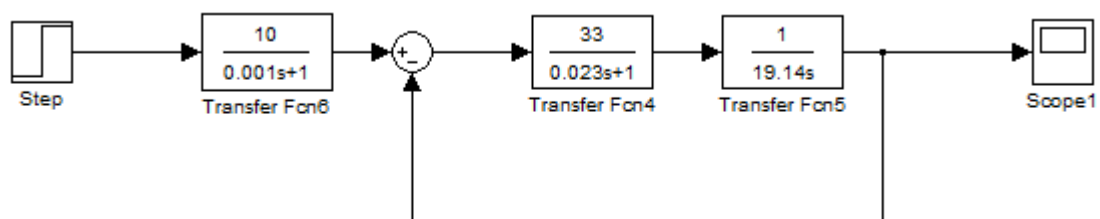


Рис. 3.7. Схема моделювання у програмі *Simulink* для розімкнутої САК

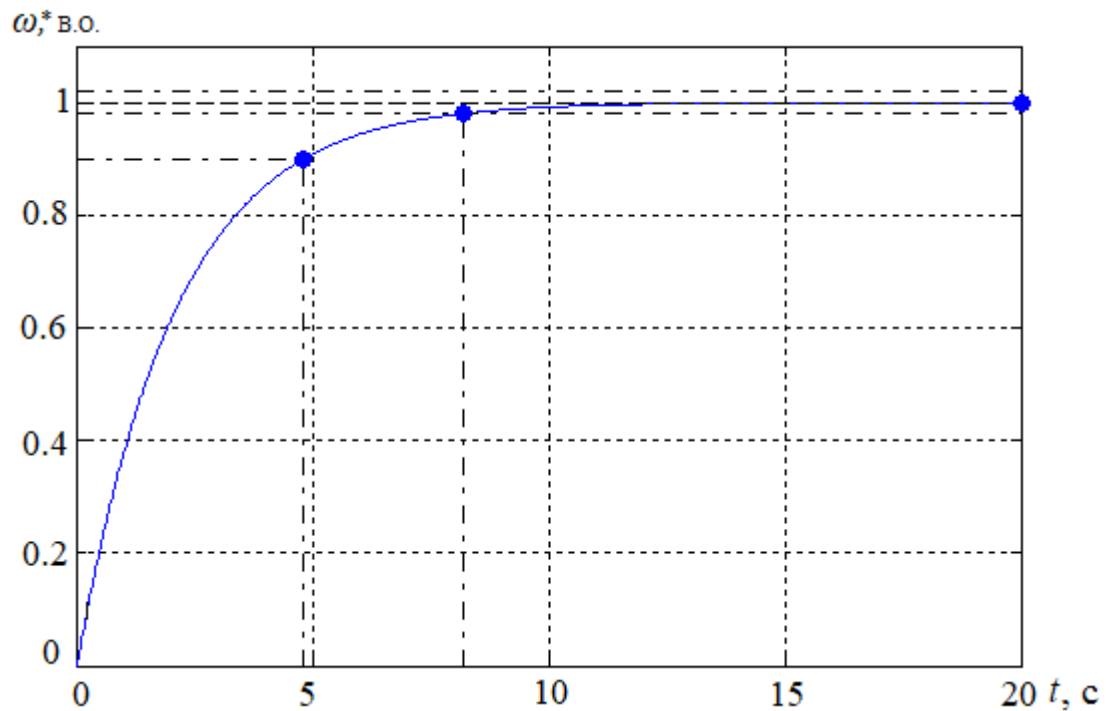


Рис. 3.8. Графік перехідного процесу по швидкості для розімкнутої САК

Після введення в дану систему зворотного зв'язку за швидкістю та корегувальної ланки отримаємо схему моделювання системи. На рис. 3.9 наведена схема замкнутої системи керування, по якій побудовано графік перехідного процесу – рис. 3.10. Перехідний процес який представлено на рис. 3.10 побудований при номінальному значенні коефіцієнта передачі та сталої часу регулятора швидкості $k_{PII} = 3,55$ та $T_{PII} = 0,17$ с, що відповідає налагодженню системи на модульний оптимум.

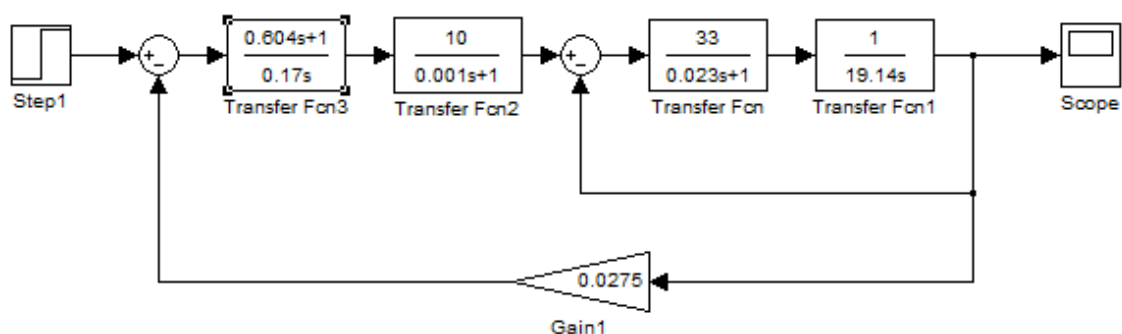


Рис. 3.9. Схема моделювання у програмі *Simulink* при $k_{PII} = 3,55$ та $T_{PII} = 0,17$ с

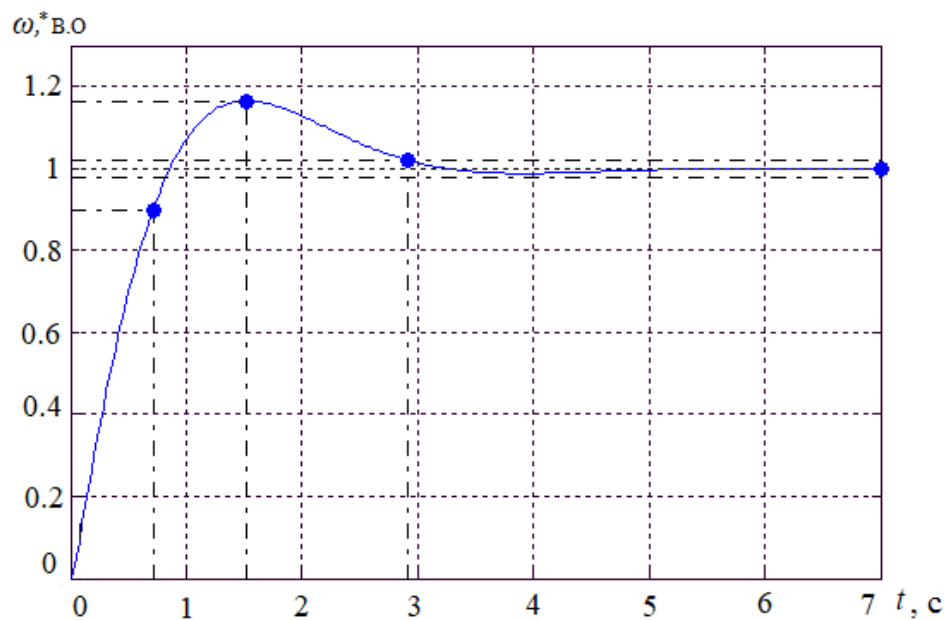


Рис. 3.10. Графік перехідного процесу по швидкості при $k_{\text{рш}} = 3,55$ та $T_{\text{рш}} = 0,17$ с

З графіку видно, що час регулювання становить близько 3 секунд. Перерегулювання в даному випадку становить менше 20 відсотків – це відповідає вимогам до електроприводу при налагодженні на модульний оптимум, отже, перехідний процес є прийнятним. Для більш наглядного оцінювання побудуємо графіки перехідних процесів розімкненої та замкнутої системи на одній осі координат (рис. 3.11).

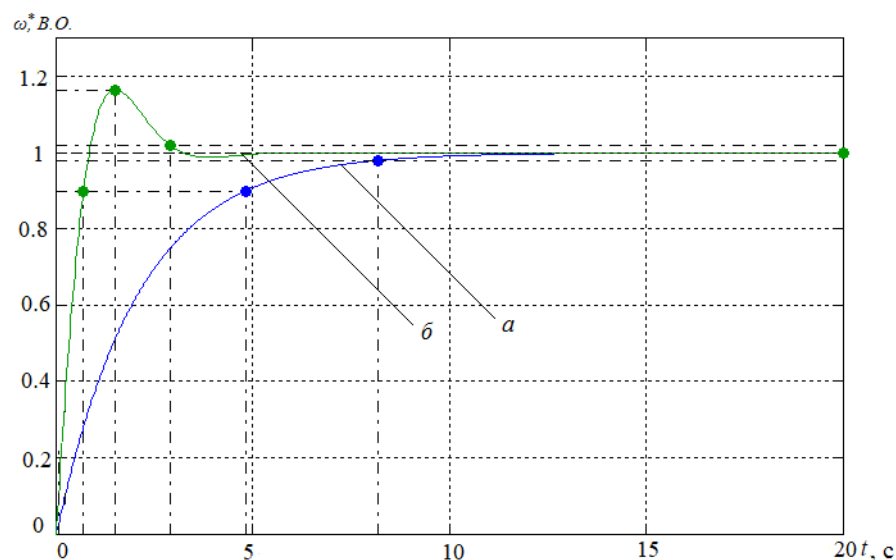


Рис. 3.11. Графіки перехідних процесів: *a* – розімкненої системи; *б* – замкнутої системи зі зворотнім зв'язком за швидкістю та корегувальною ланкою

На рис. 3.11 видно, що після введення корегувальної ланки, швидкодія даної системи керування зросла більше ніж в 2 рази. Також з'явилося перерегулювання, яке не перевищує 20 відсотків, що задовольняє умовам налагодження системи на модульний оптимум. Для отримання перехідного процесу аперіодичного характеру, без перерегулювання, підберемо наступні коефіцієнти регулятора швидкості: $T_{рш} = 0,5$ с; $k_{рш} = 4$.

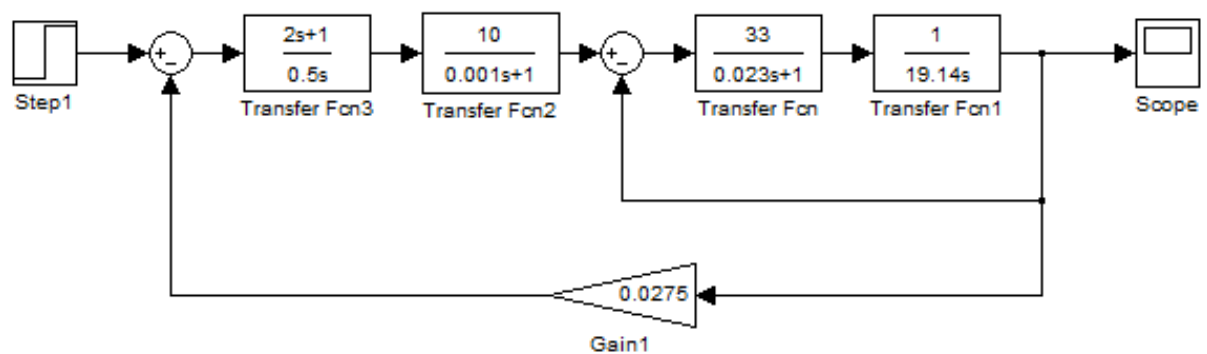


Рис. 3.12. Схема моделювання у програмі Simulink при $k_{рш} = 4$ та $T_{рш} = 0,5$ с

По схемі моделювання, зображеній на рис. 3.12. побудовано графік перехідного процесу (рис. 3.13).

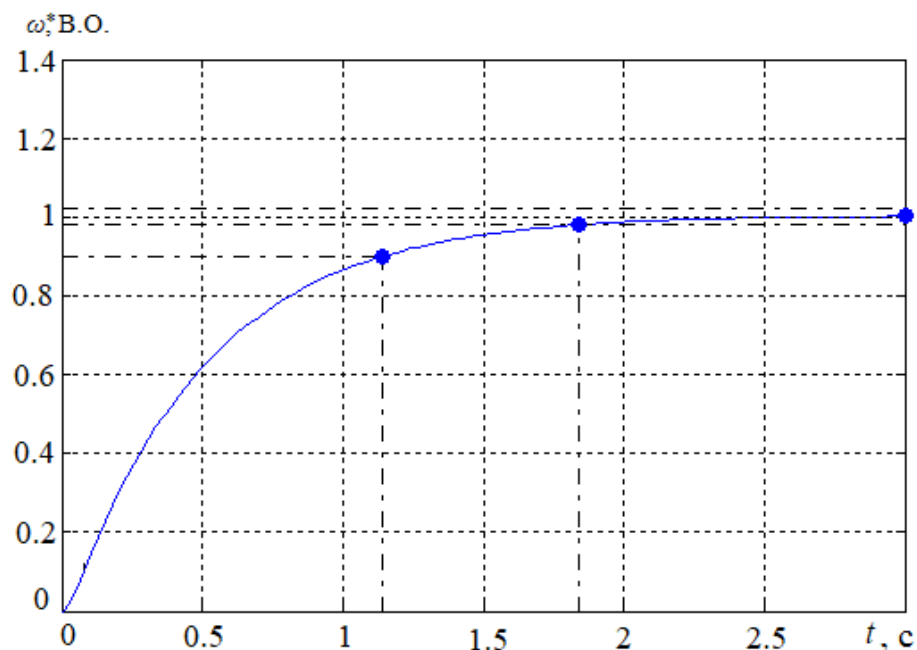


Рис. 3.13. Графік перехідного процесу по швидкості при $k_{рш} = 4$ та $T_{рш} = 0,5$ с

З графіку перехідного процесу системи, зображеного на рис. 3.13 видно, що перерегулювання дорівнює нулю, час перехідного процесу дорівнює 1.8 с. Для оцінки ефективності корегувальної ланки (ПІ-регулятора з коефіцієнтами $k_{PI} = 4$ та $T_{PI} = 0,5$ с) необхідно побудувати графіки перехідних процесів системи без корегувальної ланки та з нею на одній вісі координат (рис. 3.14). Для оцінки запасів стійкості системи з даними коефіцієнтами корегувальної ланки необхідно побудувати ЛАЧХ та ЛФЧХ. (рис. 3.14).

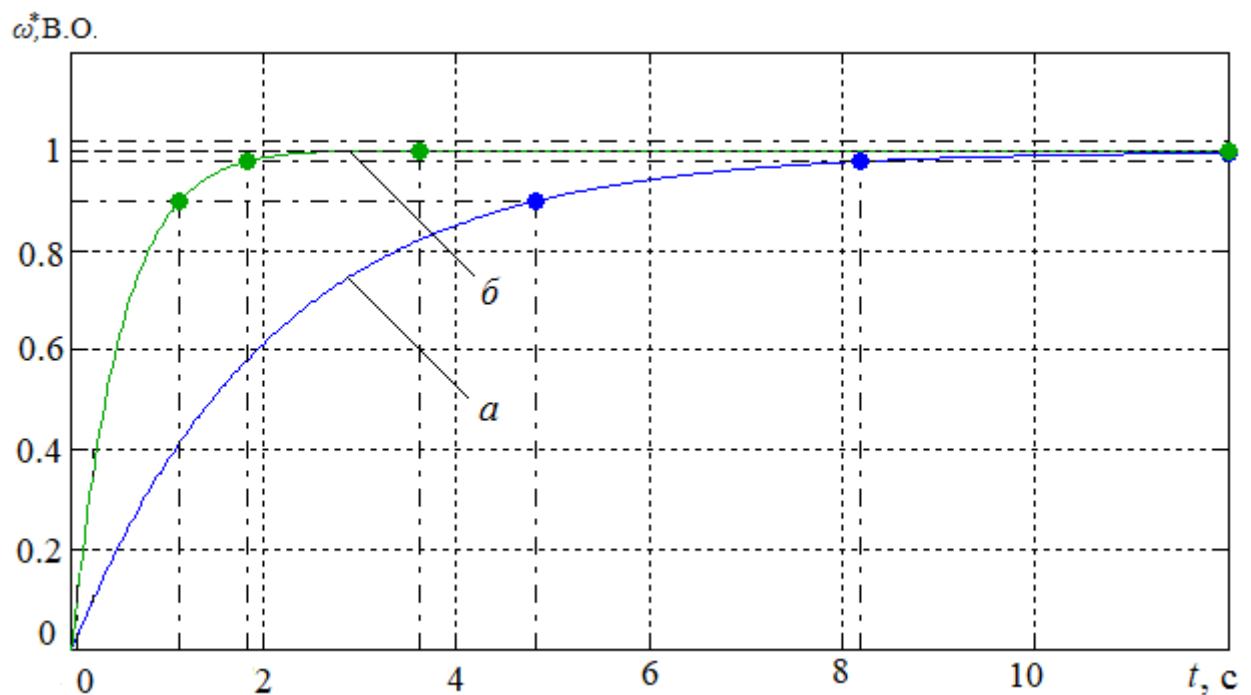


Рис. 3.14. Графіки перехідних процесів: *а* – розімкненої системи; *б* – замкненої системи з корегувальною ланкою при $k_{PI} = 4$ та $T_{PI} = 0,5$ с

З рис. 3.14 видно, що після введення корегувальної ланки з коефіцієнтами $k_{PI} = 4$ та $T_{PI} = 0,5$ с, швидкодія системи зросла більше ніж у два рази, а перерегулювання залишилося рівним нулю. Після встановлення коефіцієнтів ПІ-регулятора швидкості $k_{PI} = 4$ та $T_{PI} = 0,5$ с система отримала більші запаси стійкості по фазі та амплітуді в порівнянні з попередніми налагодженнями.

Висновки за розділом 3

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В даному розділі проведений вибір та розрахунок елементної баз САК швидкістю обертання роторів гумозмішувача, а також здійснений синтез регуляторів. Після проведення моделювання роботи даної САК можна зробити наступні висновки.

Розімкнена система без зворотного зв'язку за швидкістю та корегувальної ланки має досить великий час перехідного процесу (8 с) – це обумовлено досить великими сталими часу складових механічної частини (двигуна, редуктора та роторів гумозмішувача).

Так як розімкнена система має досить велику сталу часу механічної частини в порівнянні зі сталою часу електричної частини $T_m \geq 10T_e$, то в якості корегувальної ланки достатньо використовувати ПІ-регулятор для роботи системи по астатичній механічній характеристиці.

Після введення в систему зворотного зв'язку за швидкістю та ПІ-регулятора швидкості, з налагодженням його коефіцієнтів на модульний оптимум ($k_{PII} = 3,55$ та $T_{PII} = 0,17$ с), час перехідного процесу значно зменшився (2,9 с), але з'явилося перерегулювання (18 %), що цілком задовольняє умовам технічного оптимуму.

Після перебирання коефіцієнтів ПІ-регулятора та встановлення їх значень: $k_{PII} = 4$ та $T_{PII} = 0,5$ с отримали перехідний процес аперіодичного характеру (без перерегулювання) та з меншим часом перехідного процесу (1,8 с).

Після встановлення коефіцієнтів ПІ-регулятора швидкості $k_{PII} = 4$ та $T_{PII} = 0,5$ с система отримала більші запаси стійкості по фазі та амплітуді в порівнянні з попередніми налагодженнями.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					6.050201.2341ст.ДР.ПЗ.Р1						
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата							
Студент		Алфімов В.К.			ОХОРОНА ПРАЦІ			Літ	Аркуш	Аркушів	
Керівник		Топалов А.М.									
Н. контр.		Вінниченко І.І.									
Зав. Каф.		Черно О.О.						НУК ім. адм. Макарова			

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

На всіх підприємствах створюються здорові і безпечні умови праці, встановлюються правові основи регулювання відносин в галузі охорони праці між роботодавцями і працівниками, а також створюються умови праці, що відповідають вимогам збереження життя і здоров'я працівників в процесі трудової діяльності. Забезпечення здорових і безпечних умов праці покладається на адміністрацію підприємства. Адміністрація зобов'язана впроваджувати сучасні засоби техніки безпеки, що попереджають виробничий травматизм, і забезпечувати санітарно-гігієнічні умови, що запобігають виникненню професійних захворювань працівників.

Метою охорони праці є науковий аналіз умов праці, технологічних процесів, апаратури та обладнання з точки зору можливості виникнення появи небезпечних факторів, виділення шкідливих виробничих речовин. На основі такого аналізу визначаються небезпечні ділянки виробництва, можливі аварійні ситуації і розробляються заходи щодо їх усунення або обмеження наслідків. Законодавство України на тему охорону [12] праці являє собою систему взаємопов'язаних нормативних актів, що регулюють відносини в галузі реалізації державної політики щодо правових, соціально-економічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці. Воно складається із загальних законів України та спеціальних законодавчих актів. Загальні закони України, що визначають основні положення з охорони праці, є Конституція України, Кодекс законів на тему праці України та Закон України "Про охорону праці" [13]. Спеціальними законодавчими актами є державні нормативні акти з охорони праці. Вимогам нормативних актів з охорони праці повинні відповідати:

- умови праці на кожному робочому місці;
- безпека технологічних процесів, машин, механізмів, обладнання й інших засобів виробництва;

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- стан засобів колективного та індивідуального захисту;
- санітарно-побутові умови.

4.1. Техніка безпеки при обслуговуванні електродвигунів

При виконанні робіт з розбирання електричної машини і очищенні її деталей слід суворо дотримуватись заходів безпеки праці та пожежної безпеки. Треба користуватися тільки перевіреними тросами і справними вантажопідйомними пристроями, відповідними масі вантажу, що піднімається. При роботі з токсичними та легкозаймистими миючими рідинами необхідно вживати заходів, що виключають отруєння їх парами і займання [14] при зіткненні з відкритим вогнем. При розбиранні слід застосовувати тільки справні інструменти і механізми. Стропування вантажів при підйомі виробляють стропами - короткими шматками ланцюга або сталевого каната, забезпеченими гаками, петлями, коушами і т.д. Встановлювати на місце монтажу щити, шафи та пускові ящики масою понад 196 Н (20 кг) слід не менше ніж двом робітникам. При установці конструкцій, закріплених в стінах, стелях або підлогах за допомогою цементного розчину, можна видаляти підтримують деталі (підпори, розтяжки) до повного затвердіння розчину. При наявності кабельних каналів ззаду або спереду щита на час його монтажу необхідно закрити їх плитами або дошками товщиною не менше 50 мм. Роботи по установці двигунів середньої і великої потужності на фундаменти і конструкції виробляють тільки вантажопідйомними механізмами, встановленими або підвішеними на місці монтажу. Роботи по установці електродвигунів на фундаменти слід виконувати в рукавицях. Електродвигуни масою до 490 Н (50 кг) на низькі фундаменти можна встановлювати вручну, але не менше ніж двома робітниками.

Забороняється перевіряти пальцями суміщення отворів в зібраних панелях щитів або в напівмуфтах (для цієї мети використовують спеціальні шаблони). Забороняється переміщення і встановлення щитів без вжиття заходів, покликаних унеможливити їх перекидання. При затягуванні болтових з'єднань напівмуфт забороняється: користуватися замість гайкових ключів будь-яким іншим

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інструментом; подовжувати гайкові ключі іншими ключами, відрізками труб, користуватися несправними гайковим ключем або ключами невідповідних розмірів. Перед пробним пуском електродвигуна [15] необхідно перевірити: кріплення фундаментних болтів і інших елементів обладнання, відсутність сторонніх предметів всередині або поблизу обладнання, наявність захисного заземлення.

4.2. Електробезпека

Вплив електричного струму на організм людини може привести до травм і навіть загибелі. Це залежить від величини і тривалості проходження струму, від частоти, електричного опору тіла людини, прикладеної напруги. Проходячи крізь тіло людини електричний струм чинить термічну, електролітичну та біологічну дію [16].

Термічна дія-найлегше дотик до електричного струму. Вона виражається в опіках на окремих частинах тіла, нагріванні судин, нервів і інших тканин. Електролітична дія виражається в розкладанні крові організму, що викликає порушення її фізично-хімічного складу. Біологічна дія виражається в подразненні і руйнуванні живих тканин організму, що супроводжується мимовільним судорожним скороченням м'язів. Вплив електричного струму призводить до електричних травм, які діляться на: місцеві електротравми: електричні опіки, символи, металізація шкіри під дією електричної дуги, механічне пошкодження, електрофтальмія, електричні удари. Опіки бувають контактні і дугові. Електричний сигнал-це пляма блідо-жовтого кольору, що залишилася після опіку, місце зіткнення шкіри зі струмом. Металізація шкіри-розпечений метал потрапляє на шкіру при електричній дузі. Механічні пошкодження – це розрив м'язів, нервів і т.д. Електрофтальмія-запалення зовнішніх оболонок очей під дією ультрафіолетових променів електричної дуги.

Електричні удари діляться на:

- 1 ступень: скорочення м'язів без втрати тями;
- 2 ступень: скорочення м'язів з втратою тями;
- 3 ступень: втрата тями та порушення роботи серця;

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 4 ступень: клінічна смерть.

Відомо, що постійний струм у середньому в 4-5 раз безпечніше змінного струму $f = 50$ Гц, але при напрузі до 500 В. Якщо напруга вище 500 В, то ураження постійним струмом небезпечніше ніж змінним. Визначають чотири інтервали при змінному струмі $f = 50$ Гц:

- $I = 0,6-1,5$ мА – граничний відчутний струм;
- $I = 10-15$ мА – граничний струм, при якому виникає удома м'язів рук та голосових зв'язок;
- $I = 25-50$ мА – дія струму розповсюджується на м'язи грудної клітини, що призводить до утруднення і навіть припинення дихання людини, що потрапила під напругу; якщо струм діє декілька хвилин – настає смерть через припинення роботи легенів.
- $I = 500-100$ мА – фібриляційний струм, який впливає на серцевні м'язи; при тривалості від 1 до 3 секунд виникає зупинка серця (фібриляція).

Найбільш шкідливим для людини є змінний струм з частотою від 20 до 100 Гц. Причинами ураження електричним струмом можуть стати: випадковий дотик або наближення на небезпечну відстань до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою; поява напруги на металевих конструктивних частинах устаткування у результаті пошкодження ізоляції; поява напруги на відключених струмоведучих частинах устаткування внаслідок помилкового ввімкнення обладнання; виникнення крокової напруги на поверхні землі у результаті замикання проводу на землю.

4.3. Виробниче освітлення

Виробниче освітлення має істотне значення в зниженні виробничого травматизму, зменшує небезпеку багатьох виробничих факторів ризику, знижує небезпеку захворювання органів зору, створює нормальні умови роботи і підвищує загальну працездатність організму [17].

Існує три види освітлення: природне, штучне і сполучене. Природне освітлення буває: бічне, котре у свою чергу може бути однобічним і двостороннім; верхнє і комбіноване. Штучне освітлення по конструктивному виконанню буває:

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

загальне, для освітлення приміщень; місцеве, для освітлення одного робочого місця; комбіноване освітлення. Також, штучне освітлення по функціональному призначенню буває: робоче, аварійне, евакуаційне, чергове і охоронне. Сполучене освітлення представляє сукупність природного і штучного освітлення.

Як джерела світла застосовуються лампи розжарювання і газорозрядні лампи. Лампи накаливання бувають вакуумні і газонаповнені. До переваг застосування ламп розжарювання відносяться: зручність в експлуатації, не потрібно додаткових пристроїв для включення в мережу, простота у виготовленні, широкий діапазон потужностей і робочих напруг, відсутність періоду загорання.

До недоліків ламп розжарювання відносяться: низький ККД і низька світлова віддача, малий термін служби (2000-2500 годин), у спектрі цих ламп переважають жовті і червоні промені, що сильно відрізняє їхній спектральний склад від природного світла. До переваг газорозрядних ламп відносяться високий ККД, великий термін служби (8000-12000 годин) і можливість імітації денного світла. До недоліків газорозрядних ламп відносяться наявність пульсацій світлового потоку і стробоскопічного ефекту, необхідність наявності додаткового пристрою для включення в мережу, токсичність парів ртуті при руйнуванні лампи. Основним типом газорозрядної лампи є люмінесцентна лампа.

4.4. Заходи безпеки при роботі з гумозмішувачем

Перед початком роботи на гумозмішувачі треба переконатися в наступном [18]:

- У завантажувальній воронки гумозмішувача повинна бути встановлена аварійна кнопка "Стоп".
- Над завантажувальною воронкою гумозмішувача повинен бути передбачений місцевий відсмоктувач для видалення пилу і газів, що виділяються при завантаженні і роботі резиносмесителя.
- Управління гумозмішувачем повинно проводитися з пульта управління. Пульт слід встановлювати в місцях, що забезпечують при роботі зручність обслуговування і гарний огляд робочої зони.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Перед початком роботи на гумозмішувачах необхідно переконатися в справності охолоджувальної системи гумозмішувача і контрольно-вимірювальних приладів, відкрити нижній і верхній затвори, щоб переконатися у відсутності сторонніх предметів в камері гумозмішувача, а також перевірити на холостому ході гумозмішувача роботу відкидної кришки, нижнього і верхнього затворів і переконатися у відсутності заїдань і пропуску повітря через шланги, ущільнення і крани.

Якщо змішувач використовується для порошкових матеріалів [19]:

– Завантаження порошкових матеріалів у змішувач повинно бути, як правило, механізована.

– При використанні контейнерного завантаження змішувачів позиції по завантаженню контейнера і вивантаженню контейнера в змішувач повинні бути обладнані укриттями та місцевими відсмоктувачами.

– Управління роботою змішувача повинно проводитися з пульта управління. Пульт слід встановлювати в місцях, що забезпечують при роботі зручність обслуговування і хороший огляд робочої зони.

– Люки на корпусі змішувача повинні бути заблоковані з приводом. При відкритих люках привід не вмикається.

– Найбільш відповідальні різьбові з'єднання змішувача (вузол кріплення вібраторів, кріплення ножових роторів) повинні мати поле допуску і міцність відповідно до інструкції по експлуатації змішувача. Періодично необхідно перевіряти ступінь затяжки різьбових з'єднань і надійність їх стопоріння для найбільш відповідальних вузлів змішувачів.

– Ущільнення основних вузлів змішувача повинні своєчасно замінюватись. Робота на змішувачі з зношеними ущільненнями не допускається.

– Розвантажувальної пристрій змішувача повинно мати укриття з урахуванням розміщення в ньому контейнера. Двері укриття повинні закриватися герметично. Укриття повинно мати місцевий відсмоктувач.

Висновки за розділом 4

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У даному розділі був проведений аналіз небезпечних і шкідливих факторів при роботі з електродвигунами. Також розглянутий вплив струму на людський організм та проведений аналіз можливих випадків, травм зв'язаних зі струмом.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

Гідромеханічні системи, які дотепер є основним видом САК ГТУ, забезпечують можливість реалізації відносно простих законів керування, для яких характерні лінійні залежності керованого параметра від одного-двох (не більше) збуджувальних впливів. Однак нелінійність характеристик ГТУ як об'єкта керування потребує застосування складніших законів керування для одержання оптимальних значень вихідних параметрів у разі зміни більшої кількості зовнішніх впливів. Таку можливість надає застосування електронних (цифрових) систем керування. У зв'язку з тим, що на КС газотурбінні установки використовуються в складі ГПА як привод відцентрового нагнітача газу, виникає необхідність спільного керування ГТУ, нагнітачем газу й усім обладнанням, пов'язаним з роботою ГПА. На КС керування технологічними процесами, пов'язаними зі стисненням і транспортуванням природного газу, здійснюється з диспетчерського пульта КС і досягається за допомогою електронної системи централізованого контролю й управління КС. Тому ГПА, оснащені електронною САК, найбільш пристосовані для включення в склад системи централізованого контролю й автоматичного керування КС. На даний момент системи автоматичного керування ГПА практично на всіх КС доопрацьовані з включенням у їх склад САК ГПА електронної автоматики. Електронні системи автоматичного керування ГТУ різних типів і схем, на відміну від суто гідравлічних, дають можливість зменшити статичну похибку регулювання частоти обертання роторів з $\pm 0,5$ до $\pm 0,1$, а температуру газу з ± 12 до ± 5 К. При цьому збільшується швидкість дії і знижується величина допустимого перерегулювання на перехідних режимах. Інший аспект проблеми забезпечення надійності електронних систем автоматичного керування ГТУ пов'язаний з такою організацією процесу керування, за якого відмови окремих підсистем не спричинюватимуть вихід з ладу всієї системи. Подібна властивість досягається за рахунок розподілу функцій між підсистемами і забезпечення умов, за яких підсистеми керування зможуть брати на себе функції підсистем, що відмовили.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У загальному випадку, в електронну систему автоматичного керування ГТУ входять датчики параметрів з чутливими елементами, різноманітні виконувальні механізми, керувальні органи, валоповоротні й пускові пристрої, автомати безпеки і комплекс електронного обладнання. При цьому датчики параметрів і частина виконавчих механізмів установлюється безпосередньо на двигуні, а інші керувальні механізми розміщують в агрегатній шафі. Комплекс електронного обладнання, який входить у САК, виконується у вигляді стояків і встановлених у приміщенні диспетчерського пункту КС. Так, наприклад, у САК газоперекачувальним агрегатом ГПУ-10-01 з двигуном ДР-59 використано комплекс технічних засобів САТ-05. Комплекс забезпечує: • збір, первинну обробку аналогової та дискретної інформації; • керування виконавчими механізмами (ВМ) за заданим алгоритмом, захист основного й допоміжного технологічного обладнання ГПА в усіх режимах його роботи; • оперативне відображення достовірної інформації про хід технологічного процесу в цифровій і графічній формі; • нагромадження, сортування, реєстрацію інформації з можливістю виведення її на друк; • обчислення розрахункових параметрів, які характеризують окремі показники роботи ГПА; • обчислення часу напрацювання основного й допоміжного технологічного обладнання ГПА; • діагностику стану технічних засобів комплексу та контроль цілісності ланцюгів ВМ.

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вострокнутов Е.Г. Переработка каучуков и резиновых смесей (реологические основы, технология, оборудование) [Текст] / Е.Г. Вострокнутов М.И. Новиков // М.: Химия, 1980. – 280 с.
(http://www.ximicat.com/ebook.php?file=vostoknutov_teh.djvu&page=1)
2. Бекин Н.Г. Оборудование и основы проектирования заводов резиновой промышленности [Текст] / 1988. – 156 с. (<https://www.twirpx.com/file/34173/>)
3. Ступаченко О.Г. // Каучук и резина. 1971. № 7. С. 18–20.
(<https://cyberleninka.ru/article/n/optimalnoe-upravlenie-chastotoy-vrascheniya-rotorov-rezinosmesitelya>)
4. Гульков Г.И. Системы автоматизированного управления электроприводами: Учеб. пособие / Г.И. Гульков, Ю.Н. Петренко, Е.П. Раткевич, О.Л.Симоненкова; Под общ. ред. Ю.Н. Петренко. – Мн.: Новое знание, 2004. – 384 с. (<https://www.twirpx.com/file/8199/>)
5. Елисеева А.В. Справочник по автоматизированному электроприводу [Текст] / А.В. Елисеева, А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – с. 616.
(https://www.studmed.ru/eliseev-va-shinyanskiy-av-spravochnik-po-avtomatizirovannomu-elektroprivodu_d73f526a7cf.html)
6. Погонин В.А. Оптимальное управление частотой вращения роторов резиносмесителя (НИИШП). М. 1983. (<https://cyberleninka.ru/article/n/optimalnoe-upravlenie-chastotoy-vrascheniya-rotorov-rezinosmesitelya>)
7. Усольцев А.А., Частотное управление асинхронными двигателями / Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006, – 94 с.
(<http://window.edu.ru/resource/824/27824>)
8. Терехов В.М. Системы управления электроприводов / Учебник. – М.: Академия, 2005. – 301 с.
(https://elprivod.nmu.org.ua/files/automaticED/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%85%D0%BE%D0%B2_%D0%A1%D0%A3%D0%AD%D0%9F.pdf)

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Ключев В.И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. (http://kitab.ttna.az/upload-files/books/09/511/Elektroprivod_i_avtomatizaciya_obsepromislennix_mexanizmov.pdf)
10. Асинхронный электродвигун Lenze MDXMA 160-32. / Короткий опис [Електронний ресурс] / режим доступу (http://www.lenze.org.ua/?inc=mechanics/01_motors/01_md.)
11. Перетворювач частоти фірми Lenze серії 8200 та типу ESMD 223 L4TXA./ Короткий опис [Електронний ресурс] / режим доступу (http://www.lenze.org.ua/?inc=inverters/01_inv/01b_8200_SMD.)
12. Кодекс законів про працю України. (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/322-08>)
13. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.92 №2694-XII. (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/322-08#Text>)
14. Винокурова Л.Е. Основы охраны труда. Підручник. – К., 2001. (https://skmnvk.ucoz.ru/pidruchniki/Ohorona_praci/pidruchnik.pdf)
15. Павлов Г.В. Электробезопасность: Методические указания по дипломному проектированию.– Николаев: НКИ,1987. – 50с. (<http://eir.nuos.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/2385/Pavlov.PDF?sequence=1&isAllowed=y>)
16. Чернова Н.М. Екологія К.2002. (<https://obuchalka.org/2012112268205/osnovi-ekologii-10-11-klass-chernova-n-m-2002.html>)
17. Владимиров А.М. Охрана окружающей среды. – Л., 1991. – 423с. (http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-213160135.pdf)
18. Атаманюк В.Г. Гражданская оборона. М: Высшая школа,1986. (<https://fireman.club/literature/grazhdanskaya-oborona-atamanyuk-v-g-shirshev-l-g-akimov-n-i-pod-redakciej-mixajlika-d-i-m-vysshaya-shkola-1986/>)
19. Михайлюк В.О. Методичні вказівки до виконання розділу з питань безпеки життєдіяльності та цивільної оборони у дипломних роботах (проектах) студентів. – Миколаїв: НУК, 2008. – 49 ст. (<http://eir.nuos.edu.ua/xmlui/handle/123456789/2985?locale-attribute=ru>)

					151.2347СТ.КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		