

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

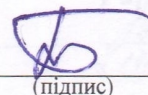
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри


(підпис)

I. С. Білюк

«15» 06 2026р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва спеціальності)

освітня програма Електротехніка та електротехнології
(назва освітньої програми)

на тему: «Модернізація системи керування привода карусельного верстата»

Виконав: студент IV курсу, групи 4311

Степанов Олександр Євгенович

(прізвище, ім'я, по батькові)

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

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

Нормоконтроль викладач каф. автоматики, Савченков О.В.

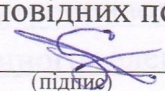
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Рецензент доц. ка ф. СЕЕС, к.т.н., доц. Новоргецький С.М.

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

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

Студент


(підпис)

м. Миколаїв – 2026 року

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

О.Г. Васильєв
«17» 06 2026 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ

Степанов Олександр Євгенович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Модернізація системи керування привода карусельного верстата»

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

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

2. Строк подання студентом роботи 10.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Двигун змінного струму з короткозамкненим ротором і потужністю 7,5 кВт. Напруга живлення 380 В. Система з частотно-струмовим керуванням. Час перехідного процесу не більш 0.2с. Перерегулювання не більш 27%

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Опис верстата 2 Аналіз автоматизованого електропривода «РАЗМЕР-2М-5-21», 3 Дослідження динаміки привода подач верстата верстата 4 Охорона праці

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

1 Кінематична схема верстата 2 Існуюча схема керування карусельним верстатом 3 Функціональна схема електропривода при частотно-струмовому керуванні 4 Структурна схема асинхронного електропривода при частотно-струмовому керуванні 5 графіки перехідних процесів привода подач карусельного верстата

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 02.02. 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опис верстата	14.02.26	
2	Аналіз автоматизованого електропривода «РАЗМЕР-2М-5-21»	28.02.26	
3	Дослідження динаміки приводу подач верстата	21.03.26	
4	Охорона праці	18.04.26	
5	Графічна частина	23.05.26	
6	Графічна частина	30.05.26	

Студент

(підпис)

Степанов О. Є.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Фоменко А.М.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 71 с., 4 р., 38 рис., 1 дод., 12 джерел.

Ключові слова: асинхронний електропривод, привод подач, перехідна характеристика, карусельний верстат, частотне керування.

Мета роботи – підвищення показників якості системи керування привода подач карусельного верстата .

У першому розділі наведено опис карусельного верстата. Проведено аналіз електрообладнання привода подач та зроблений висновок про проведення вдосконалення системи привода подач, обраний спосіб керування двигуном. У розділі 2 наведено опис комплектного електропривода «РАЗМЕР-2М-5-21» та принцип роботи. Проведений аналіз налагодження електропривода. Виконано Розділ 3 включає побудову математичної моделі системи керування та отримання характеристик перехідних процесів системи. Виконано аналіз перехідних процесів системи. За результатами дослідження був зроблений висновок ще проведення заміни привода подач з використанням обраного комплектного електропривода є доцільним так як показники якості перехідних процесів відповідають завданням. В розділі 4 розглянуті питання з охорони праці. Додатки містять слайди мультимедійної презентації (додаток А).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ОПИС ВЕРСТАТА.....	8
1.1 Опис карусельного верстата.....	8
1.2 Аналіз електрообладнання привода подач.....	12
1.3 Вибір електродвигуна привода подач.....	13
1.4 Вибір способу керування двигуном.....	15
2. АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА «РАЗМЕР-2М-5-21».....	24
2.1 Опис роботи електроприводу	29
2.2 Налагодження привода	54
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПРИВОДУ ПОДАЧ ВЕРСТАТА	58
3.1 Побудова математичної моделі асинхронного двигуна при керуванні частотою й напругою статора.....	58
3.2 Побудова перехідних процесів системи.....	65
4. ОХОРОНА ПРАЦІ	63
4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів, які впливають на людину при виробництві	64
4.2 Заходи щодо техніки безпеки	65
ВИСНОВКИ.....	70
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	71
ДОДАТОК А.....	72

ВСТУП

Рішення питань автоматизації виробничих процесів в значній мірі залежить від рівня розвитку техніки. Широке застосування верстатів з пристроями числового програмного управління (УЧПК) привело до поглиблення задач автоматизації виробництва.

Для управління виконавчими пристроями верстатів з УЧПК велике значення має використання регульованих електроприводів, як які застосовуються комплектні електроприводи постійного і змінного струму. Основним призначенням комплектного електроприводу є його використання у верстатах як привід головного руху або якості приводу подачі.

Розширення технологічних можливостей металорізучих верстатів забезпечило можливість проведення на одному верстаті різних технологічних операцій: фрезерування, свердлення і розточування; точіння, свердлення і розточування і ін. Це, у свою чергу, привело до ускладнення електроприводів подач унаслідок збільшення обертаючого моменту на валу двигуна, розширення діапазону робочих швидкостей і настановних переміщень, збільшення швидкодії приводу як при управляючій дії, так і при обуренні по навантаженню.

Останніми роками істотно змінилася конструкція верстатів унаслідок значного скорочення механічної частини приводів подач. Стала можливою установка високомоментних двигунів, що мають менші габаритні розміри в порівнянні із звичними двигунами постійного струму. До скорочення механічної частини приводу привело також і виключення коробки передач. У зв'язку з цим знизилася навантаження на двигун при холостих переміщеннях і зросла складова від різання в загальному навантаженні приводів подач. У більшості сучасних верстатів навантаження на двигун при робочих подачах без різання складає не більш 20...30 % від номінальної.

Значне збільшення швидкості швидких переміщень, зниження швидкості настановних переміщень привело до значного збільшення діапазону регулювання. Максимально робоча подача на сучасних багатоопераційних верстатах складає

10...30 % від швидкості швидких переміщень. Повний діапазон регулювання у верстатах фрезерної, розточувальної і токарної груп складає 100...10000.

У кваліфікаційній роботі розглядається питання пов'язані з модернізацією електропривода подач карусельного верстата.

1 ОПИС ВЕРСТАТА

1.1 Опис карусельного верстата

Верстат призначений для обробки заготовель складного профілю зі сталі, чавуна, важкооброблюваних сталей і кольорових металів в умовах одиничного і серійного виробництва. Як інструмент застосовують кінцеві, торцеві, кутові, сферичні і фасонні фрези, свердли, зенкери, різці. Клас точності верстата Н.

Технічна характеристика верстата. Розміри робочої поверхні каруселі (діаметр) 1600 мм; число частот обертання шпинделя 18; межі частот обертання шпинделя $40 - 2000 \text{ хв}^{-1}$; межі робочих подач (безступінчасте регулювання) столу і повзуна $10 - 2000 \text{ мм/хв}$; швидкість швидкого переміщення столу і повзуна 4800 мм/хв; габаритні розміри верстата 3200x2465x2670 мм.

Пристрій ЧПК – контурне типу НЗЗ-2М, Програмоносій – восьмидоріжкова перфострічка, код ISO. Геометрична інформація задається в збільшеннях. Інтерполятор – лінійно-круговий. Число керованих координат 3, число одночасне керованих координат при лінійній інтерполяції 3, при круговий 2. Дискретність відліку по осях координат X', Y', Z 0,01 мм. Просторова обробка досягається сполученням руху столу по двох координатах (X' і Y') і вертикального переміщення повзуна з різальним інструментом (координата Z). Можлива робота в режимі преднабора з введенням програми в пристрій ЧПК безпосередньо оператором за допомогою клавіатури.

Основні механізми і рухи у верстаті. Базою верстата (рисунок 1.1) є станина А, що має тверду конструкцію за рахунок розвитої основи і великого числа ребер. По вертикальним направляючого корпуса станини рухається консоль Е (настановне переміщення). По горизонтальним (прямокутним профілю) напрямним консолі переміщається в поперечному напрямку механізм стол-салазки Д (подача по осі Y'), а по направляючої салазок у подовжньому напрямку – стіл (подача по осі X'). У корпусі консолі змонтовано приводи поперечної і вертикальної подачі, а в корпусі салазок – привод подовжньої подачі. Головний

рух інструмент одержує від коробки швидкостей Б. У шпиндельній голівці У встановлений привод вертикальних переміщень повзуна Г по осі Z.

Кінематика верстата. *Головний рух.* Шпиндель VIII одержує обертання від асинхронного електродвигуна M1 ($N = 7,5$ кВт, $n = 1450$ хв⁻¹) через коробку швидкостей із трьома пересувними блоками зубчастих коліс B1, B2, B3 і передачі $z = 39 - 39$, $z = 42 - 41 - 42$ у шпиндельній голівці. Механізм переключення блоків забезпечує одержання 18 частот обертання і дозволяє вибирати необхідну частоту обертання без послідовного проходження проміжних ступіней. Рівняння кінематичного ланцюга для мінімальної частоти обертання шпинделя

$$n_{\min} = 1460 \frac{31}{49} \frac{16}{38} \frac{17}{46} \frac{19}{69} \frac{39}{39} \frac{42}{41} \frac{41}{42} = 40 \text{ хв}^{-1}$$

Інструмент в оправленні кріплять поза верстатом за допомогою насінних шомполів. Оправлення має зовнішній конус 50 і внутрішній конус Морзе № 4.

Для кріплення інструмента з конусами Морзе № 2 і 3 застосовують змінні втулки. Затиск інструмента здійснюється електромеханічним пристроєм. Змазування підшипників і зубчастих коліс коробки швидкостей здійснюється від плунжерного насоса, розташованого усередині коробки швидкостей.

Руху подач. Вертикальна подача повзуна зі змонтованим у ньому шпинделем здійснюється від високомоментного двигуна M2 ($M = 13$ Нм, $n = 1000$ хв⁻¹) через зубцювату пару $z = 44 - 44$ і передачу гвинт – гайка качіння VII із кроком $P = 5$ мм. Передбачено ручне переміщення повзуна. На валові XI установлений датчик зворотного зв'язку – трансформатор типу ВТМ-1В.

Поперечна подача салазок здійснюється від високомоментного двигуна M4 ($M = 13$ Нм, $n = 1000$ хв⁻¹), через безззорний редуктор $z = 22 - 52 - 44$ і гвинт – гайку качення XVII із кроком $P = 10$ мм. Зазор у косозубих циліндричних колесах 1, 3 і 5 редуктори (рисунок 1.2) усувають шліфуванням півкілець 2 і 4, установлюваних між колісьми 3 і 5.

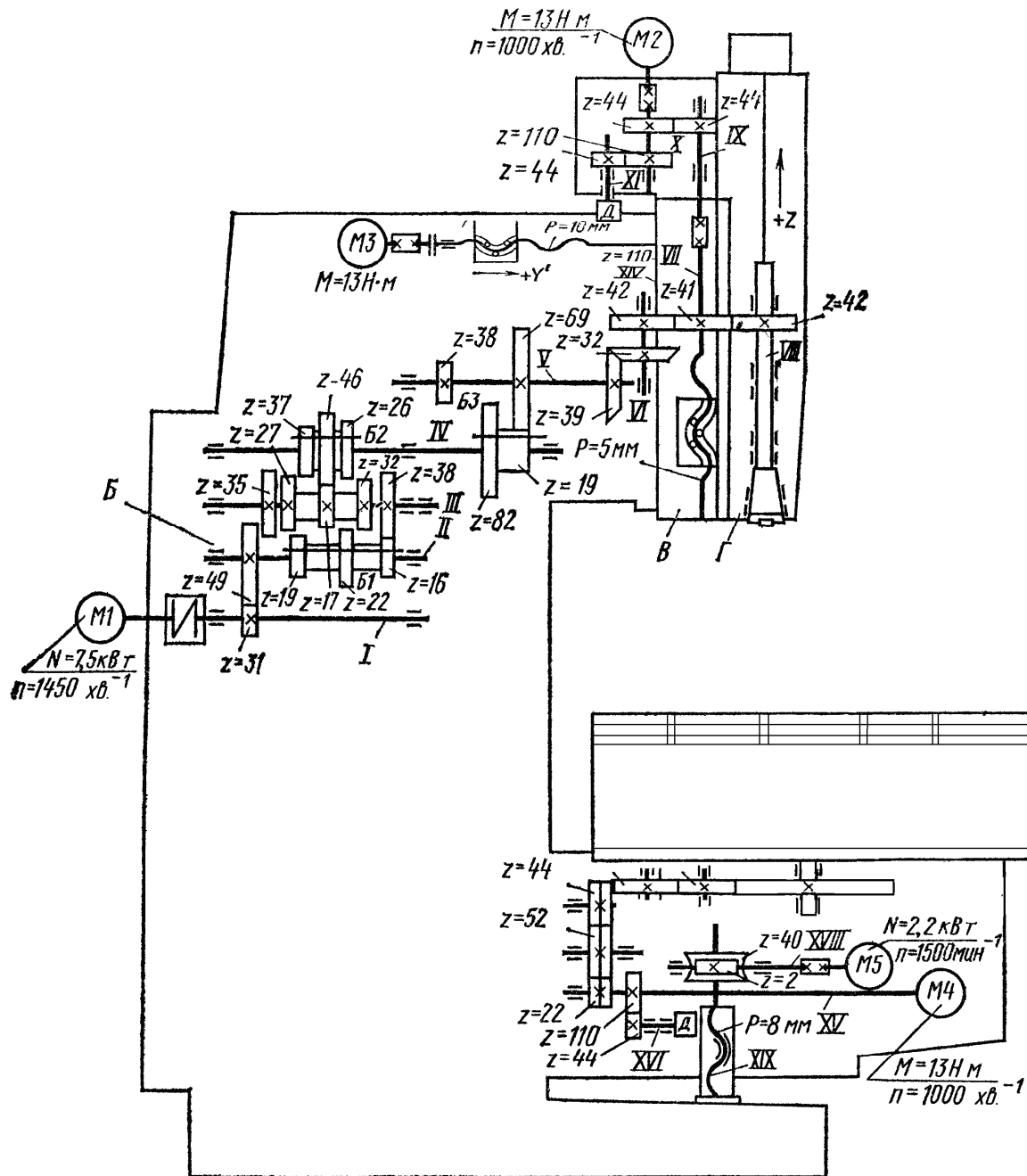


Рисунок 1.1 – Кінематична схема карусельного верстата 6P13Ф3-37 із ЧПК

Подовжня подача столу походить від високомоментного електродвигуна $M3$ (див. рис 1.1) через безззорний редуктор $z = 26 - 52$ і гвинт – гайку качіння $XIII$ із кроком $P = 10$ мм. У редукторах подовжнього і поперечного переміщень установлені датчики зворотного зв'язку — трансформатори типу ВТМ-1В. Зазор у напрямних столу і салазок вибирають клинами. Зазор у передачах гвинт – гайка качіння усувають поворотом обох гайок і одну сторону на потрібне число зубів.

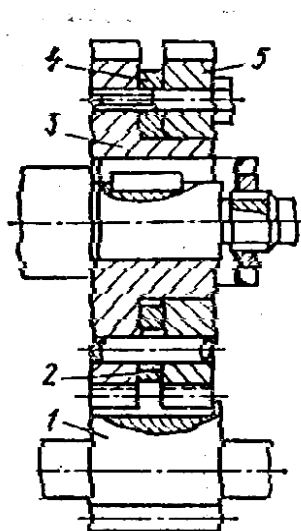


Рисунок 1.2 – Схема усунення зазору в редукторі поперечної подачі верстата 6Р13Ф3-37

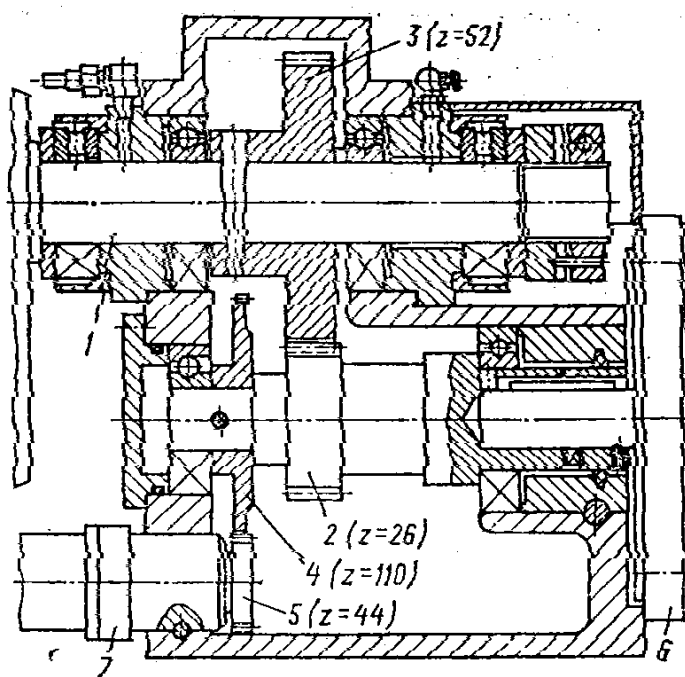


Рисунок 1.3 – Редуктор подовжньої подачі верстата

Для автоматичного керування пропонується комп'ютерна система керування як приводами подач так і приводом головного руху верстата. Для забезпечення програмного керування верстатом пропонується багаторівнева система програмного керування. Найвищий рівень забезпечує центральна машина оператора в задачі якої входить все цілий контроль та керування роботою верстата. Другий рівень це керування основними агрегатами верстата і третій рівень керування допоміжними агрегатами які забезпечують роботу основних. Компоновка системи керування може змінюватись в залежності від поетапного процесу модернізації и автоматизації агрегатів верстата. Це може відбуватися за рахунок більш сучасних автоматизованих приводів які можуть забезпечувати як автономне так і комплексне програмне керування по заданим алгоритмам.

1.3 Вибір електродвигуна привода подач

До промислового електропривода пред'являються наступні вимоги:

- висока експлуатаційна надійність, мінімальне технічне обслуговування при мінімумі персоналу, зайнятого ремонтом і налагодженням устаткування;
- можливість оперативного переналагодження (у тому числі автоматизованої) електроустаткування;
- забезпечення автоматизованого контролю функціонування устаткування за рахунок використання систем діагностики, індикації і захисти.

При розробці й створенні електропривода повинні зважуватися питання стандартизації й уніфікації конструкторських елементів, вхідних і вихідних параметрів електроавтоматики, вимірювальних пристроїв і т.п.

Електропривод повинний працювати при живленні від трифазної промислової мережі перемінного струму з лінійною напругою 380 В, частотою 50 Гц.

Електропривод повинний забезпечити роботу при:

- відхиленнях напруги живильної мережі від номінального від +10 % до – 15 %;
- відхиленнях частоти живильної мережі на 2 % від номінальної;
- короткочасних провалах миттєвих значень живильного напруги;
- температурі навколишнього повітря від -400 до +400 С;
- максимальної відносної вологості повітря 80% при температурі 300 С ;
- вибухонебезпечному середовищу, що не містить агресивних газів і парів, у концентраціях, що руйнує метали й ізоляцію.

Електропривод експлуатується на відкритій площадці. Складові частини електропривода, розташовувані в окремих шафах (оболонках), повинні допускати вібрацію з частотою від 1 до 30 Гц, а встановлювані на агрегаті – вібрацію до 60 Гц. Ступінь захисту основних вузлів електропривода, а також шаф – не менш IP54 (у деяких випадках допускається конструкція шаф із ступенем IP23). Ступінь захисту пульта управління – IP44, електродвигуна IP44.

Основними умовами на вибір типу привода для розглянутої є:

- широкий діапазон регулювання кутової швидкості двигуна;
- високі динамічні показники;
- високі показники надійності (довговічність, безвідмовність, ремонтпригодність, сохраннысть);
- ступінь захисту двигуна IP44.

При виборі привода необхідно також враховувати, що привод працює в безупинному режимі, а також можливість довгострокової роботи привода на знижених оборотах.

При експлуатації існуючої схеми системи управління електропривода подач вертикально-фрезерного верстата виникають наступні недоліки:

- 1- дана схема не дозволяє керувати електроприводом в програмному режимі;
- 2- у даній схемі не забезпечується підтримка постійної величини обертання фрези;
- 3- ступінчате регулювання швидкості обертання фрези.

На підставі цього пропонується замінити існуючу систему управління електропривода подач автоматизованою системною управління з можливістю управління як автономно, так і від ЕОМ вищого рівня.

Для цього проаналізуємо вихідні дані нової системи управління:

потужність електродвигуна	7,5 кВт
швидкість обертання -	1450 об/хв
момент на валу двигуна -	49,3 Н*м

Для системи керування привода подач верстата вибираємо асинхронний двигун із наступними даними:

типорозмір	4A132M4Y3
потужність, кВт	7,5
синхронна частота обертання ротора, об/хв	1500
номінальна частота мережі f , Гц	50
номінальна напруга U , В	380
ковзання %	1,8
КПД %	94
відношення пускового моменту до номінального	1,4
відношення мінімального до номінального	1,0
відношення максимального моменту до номінального	2,2

Далі зробимо вибір системи управління двигуном, для чого розглянемо існуючі способи управління асинхронними машинами.

1.4 Вибір способу керування двигуном

Частотне регулювання асинхронних електроприводів

Принципова можливість регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна зміною частоти живильного напруги впливає з формули:

$$\omega = 2\pi f_1(1-s)/p . \quad (1.1)$$

При регулюванні частоти також виникає необхідність регулювання амплітуди напруги джерела, що впливає з виразу:

$$U_1 \approx E_1 = k \cdot \Phi \cdot f_1 . \quad (1.2)$$

Якщо при незмінній напрузі змінювати частоту, то потік буде змінюватися назад пропорційно частоті. Так, при зменшенні частоти потік зросте і це приведе до насичення сталі ротора машини і як наслідок до різкого збільшення струму і перевищенню температури двигуна; при збільшенні частоти потік буде зменшуватися і як наслідок буде зменшуватися припустимий момент [9].

Для досконалого використання асинхронного двигуна при регулюванні кутової швидкості зміною частоти необхідно регулювати напругу, одночасно у функції частоти і навантаження, що реалізовано тільки в замкнутих системах електропривода. У розімкнутих системах напруга регулюється лише у функції частоти за деяким законом, що залежить від виду навантаження.

Аналіз характеристик асинхронного двигуна при частотному керуванні можна зробити, використовуючи схему заміщення, наведену на рисунку 1.5 [10].

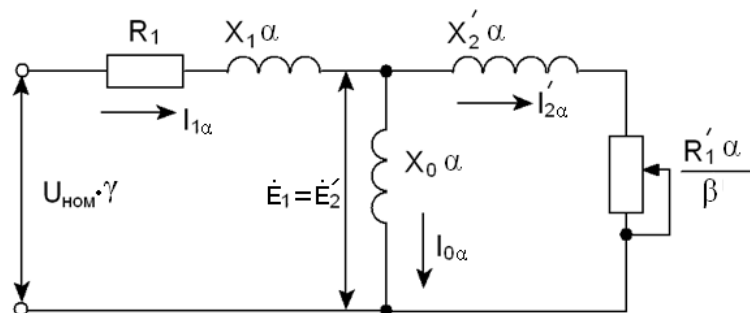


Рисунок 1.5 – Схема заміщення АД при частотному регулюванні

Нозначення на схемі:

- відносна частота напруги (струму) статора – відношення частоти струму статора до її номінального значення:

$$\alpha = f_1 / f_{\text{н}} ; \quad (1.3)$$

- параметр абсолютного ковзання чи відносна частота ротора:

$$\beta = \Delta\omega / \omega_{i\bar{i}i} = f_2 / f_{i\bar{i}i} , \quad (1.4)$$

де $\omega_{1ном}$ — синхронна кутова швидкість при номінальній частоті $f_{1ном}$.

Параметр β використовується замість ковзання s і зв'язаний з ним відношенням:

$$s = \Delta\omega / \omega_1 = \beta / \alpha , \quad (1.5)$$

тут ω_1 — синхронна кутова швидкість при частоті f_1 ;

- відносна напруга на статорі:

$$\gamma = U / U_{i\bar{i}i} . \quad (1.6)$$

Момент, що розвивається двигуном:

$$M_a = 3I_{2a}'^2 R_2' / \Delta\omega = 3I_{2a}'^2 R_2' / c \quad (1.7)$$

При підстановці в (1.7) вираз для струму I_{2a} , знайденого з розрахунку струмів у схемі заміщення двигуна (рисунок 2.4):

$$I_{2a}' = U_{ном} \gamma \frac{z_{0a}}{z_{1a}(z_{2\beta}' + z_{0a}) + z_{2\beta}' z_{0a}} , \quad (1.8)$$

де $z_{0a} = jx_{0a}$; $z_{1a} = R_1 + jx_{1a}$; $z_{2\beta}' = R_{2a}' / \beta + jx_{2a}' = \alpha(R_2' / \beta + jx_2')$, після перетворень одержимо формулу для моменту двигуна:

$$M_a = \frac{3U_{ном}^2 \gamma^2}{\omega_{1ном}} \cdot \frac{R_2' \beta}{(b^2 + c^2 a^2) \beta^2 + 2R_1 R_2' a \beta + (d^2 + e^2 a^2) R_2'^2} = \frac{3U_{ном}^2 \gamma^2}{\omega_{1ном}} \cdot \frac{R_2' \beta}{A(a_1 \beta)} , \quad (1.9)$$

де $b = R_1(1 + \tau_2)$; $c = x_0 \tau$; $d = R_1 / x_0$; $e = 1 + \tau_1$, τ_1 і τ_2 — коефіцієнти розсіювання статора і ротора відповідно (τ — загальний коефіцієнт розсіювання);

Коли регулювання виробляється при напрузі, що залежить тільки від частоти і не залежному від навантаження β , те абсолютне критичне ковзання дорівнює:

$$\beta_{к(a)} = \pm R_2' \sqrt{\frac{d^2 + e^2 a^2}{b^2 + c^2 a^2}} , \quad (1.10)$$

а максимальний момент:

$$M_{k(a)} = \frac{3U_{ном}^2 \gamma^2}{2\omega_{ном}} \cdot \frac{R_2' \beta}{R_1 a \sqrt{(b^2 + c^2 a^2)(d^2 + e^2 a^2)}} \quad (1.11)$$

Аналіз виразу (2.11) показує, що при порівняно великих частотах, коли значенням R_1 у порівнянні з

$$X_K = X_1 + X_2', \quad (1.12)$$

можна зневажити, максимальний момент двигуна при зміні частоти постійний $M_{k(\alpha)} = \text{const}$, якщо напруга змінюється пропорційно частоті, тобто $\gamma = \alpha$ чи $U/f = \text{const}$.

При подальшому зниженні частоти активний опір статора R_1 стає порівняним зі значенням X_K і максимум моменту двигуна знижується (рисунок 1.6) [7]. Це відбувається як наслідок зменшення потоку двигуна через частку падіння напруги на R_1 від загальної прикладеної напруги, так і зменшення абсолютного критичного ковзання, обумовленого формулою (1.12), що приводить навіть при незмінному потоці до зменшення моменту внаслідок зменшення струму ротора відповідно до виразу :

$$M = k\Phi I_2' \cos \varphi_2. \quad (1.13)$$

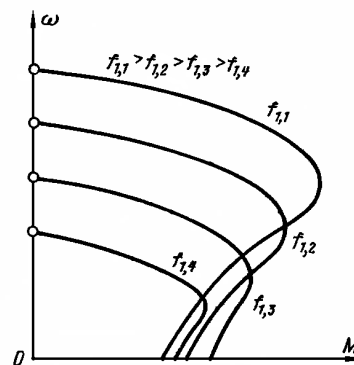


Рисунок 1.6 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному керуванні по закону $U/f = \text{const}$

Для підтримки достатньої перевантажувальної здатності у всьому діапазоні регулювання необхідно при малих частотах зменшувати напругу в меншому ступені, чим знижується частота.

Дорівнявши одиниці відношення максимального моменту при номінальній частоті до максимального моменту для будь-якої частоти, отримуємо закон регулювання напруги, коли максимальний момент двигуна зберігається:

$$\gamma = \sqrt{\frac{R_1 a \pm \sqrt{(b^2 + c^2 a^2)(d^2 + e^2 a^2)}}{R_1 \pm \sqrt{(b^2 + c^2)(d^2 + e^2)}}} . \quad (1.14)$$

Однак керування за цим законом зв'язано зі збільшенням потоку двигуна в точці максимуму моменту приблизно обернено пропорційно $\sqrt{\beta k(\alpha)}$, що приводить до насичення сталі двигуна у випадку великого діапазону регулювання. Тому застосування закону (1.14) обмежується діапазоном регулювання частоти униз від номінальної.

Регулювання нижче основної швидкості може вироблятися з постійним моментом навантаження, якщо двигун має незалежну вентиляцію. У тих випадках, коли використовуються самовентильовані двигуни, у яких зі зниженням швидкості зменшується тепловіддача, припустима навантаження повинне бути знижене при тривалій роботі на низьких швидкостях. При частотному регулюванні швидкості і номінальному моменті втрати зменшуються за рахунок зниження втрат у сталі, що дозволяє в меншій мірі знижувати його навантаження, чим при інших способах регулювання. Якщо момент навантаження при регулюванні кутової швидкості залишається незмінним і рівної номінальному, то потрібно завищити встановлену потужність двигуна (використовувати двигун з більшою номінальною потужністю) так, щоб момент навантаження не перевищив припустимий момент двигуна при мінімальній кутовій швидкості [9].

Частотне регулювання кутової швидкості є економічним, тому що керування двигуном виробляється при малих ковзаннях. Крім того, у замкнених системах можна керувати двигуном, досягаючи мінімуму втрат у ньому чи мінімуму споживаного двигуном струму чи екстремуму інших енергетичних показників, тому що мається можливість регулювати напругу у функції навантаження. Але вона вимагає застосування щодо складного перетворювача.

Система частотного керування асинхронним двигуном зі зворотним зв'язком по струму

Стабілізація магнітного потоку за допомогою від'ємного зворотного зв'язку по потоку двигуна Φ (рисунок 1.7) шляхом регулювання напруги на двигуні у функції частоти (за допомогою ФП) і навантаження забезпечує механічні характеристики двигуна з високою перевантажувальною здатністю і жорсткістю, що відповідає природній характеристиці [10]. Магнітний потік визначається по формулі:

$$\Phi = \frac{k_{ПУ} k_D}{1 + k_{ПУ} k_{ДФ} k_{\Phi}} U_{з\gamma}, \quad (1.15)$$

де $k_{ПУ} = U_{ном} \gamma / U_{\gamma}$; $k_D = \Phi / U_{ном} \gamma$; $k_{\omega} = 1 / U_{зс} \cdot f_{1ном}$; $k_{\Phi} = U_{ос} / \Phi$.

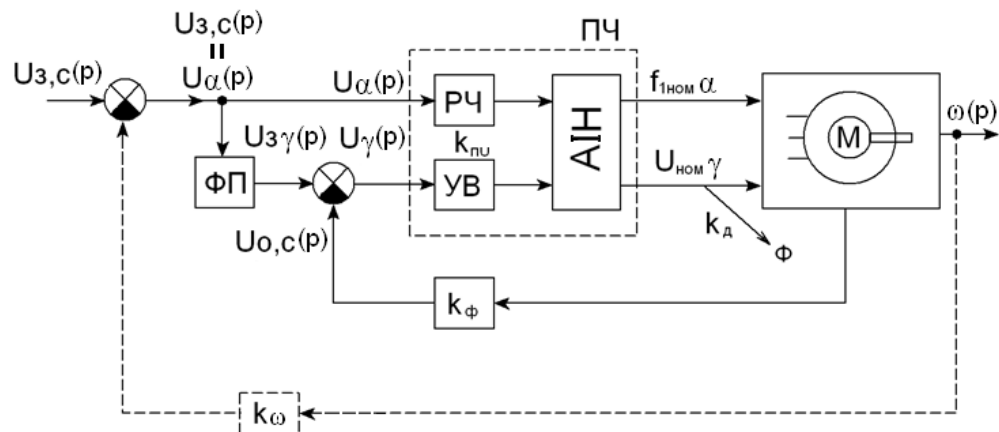


Рисунок 1.7 – Структурна схема замкнутої системи автоматичного частотного регулювання з АІН із від'ємним зворотним зв'язком по потоку в контурі стабілізації потоку.

Перетворивши (1.15) з обліком прийнятих раніше (1.19) позначень, знаходимо:

$$\Phi = \frac{k_{ПУ} U_{з\gamma}}{c_1 f_{1ном}} \frac{\sqrt{B(\beta)}}{\sqrt{A(\alpha, \beta) + k \sqrt{B(\beta)}}}. \quad (1.16)$$

Підставляючи (2.16) у формулу моменту:

$$M_a = \frac{3c_1^2 f_{1ном}^2}{\omega_{1ном}} \cdot \Phi \frac{R'_2 \beta}{B(\beta)}, \quad (1.17)$$

одержуємо вираз механічної характеристики двигуна в замкнутій системі зі зворотним зв'язком по потоку:

$$M_a = \frac{3k_{ПУ}^2 U_{зг}^2}{\omega_{ном}} \frac{R'_2(\beta)}{\left[\sqrt{A(\alpha, \beta)} + k\sqrt{B(\beta)} \right]^2}. \quad (1.18)$$

З виразу магнітного потоку одержуваного зі схеми заміщення, і з (1.16) знайдемо, що напруга на двигуні в цій системі регулюється відповідно до виразу:

$$U_{ном} \gamma = k_{ПУ} U_{зг} \frac{\sqrt{A(\alpha, \beta)}}{\sqrt{A(\alpha, \beta)} + k\sqrt{B(\beta)}}. \quad (1.19)$$

Напругу, підведену до двигуна, потрібно змінювати так, щоб потік для всіх частот і навантажень залишався незмінним і рівним потоку при номінальній напрузі і частоті та ідеальному холостому ході ($\Phi = \Phi_0$).

Починаючи з деякого великого коефіцієнта підсилення ($k \geq 100$) максимальний момент двигуна в розглянутій системі при будь-якій частоті залишається практично постійним і прагне до значення:

$$M_{к(а)} \rightarrow \frac{m_1 U_{ном}^2}{2\omega_{ном} x'_2} \cdot \frac{1}{d^2 + e^2} \approx \frac{3U_{ном}^2}{2\omega_{ном} x'_2}, \quad (1.20)$$

а критичне абсолютне ковзання:

$$\beta_{ка} \rightarrow R'_2 / x'_2. \quad (1.21)$$

З (1.20) і (1.21) видно, що граничні значення $M_{к(а)}$ і $\beta_{ка}$ не залежать від частоти

Аналіз замкнутої системи зі зворотним зв'язком по потоці показує незначне зменшення струмів у порівнянні з розімкнутою системою (при однакових моментах навантаження), але при цьому зменшується коефіцієнт потужності (приблизно на 3 – 5 % у порівнянні з номінальним при $\alpha = 1$ і $m = 1$) [10].

Максимальний діапазон регулювання при $M = M_{1ном} = \text{const}$ можна визначити (при регулюванні униз від номінальної кутової швидкості) по формулі:

$$D_{amax} \approx 2 \frac{1}{\beta_{к,ном}}, \quad (1.22)$$

де $\beta_{к,ном}$ — критичне абсолютне ковзання в природній схемі включення двигуна.

Приймаючи в середньому $\beta_{\text{к,ном}} = (0,1 — 0,2)$, одержуємо $D_{\alpha\text{max}} = (20 \div 10) : 1$, тому якщо є необхідність надалі розширити діапазон регулювання, то необхідно розглянуту систему доповнити негативним зворотним зв'язком по швидкості з впливом на частоту і задану напругу контуру стабілізації потоку. Можливо також використання зворотного зв'язку по швидкості й у контурі стабілізації потоку.

Керування електродвигунами змінного струму ускладнено рядом обставин, найбільш істотними з яких є наступні:

- момент електродвигуна визначається добутком двох результуючих векторів електромагнітних параметрів статора і ротора і є функцією чотирьох перемінних;
- мається сильна взаємодія намагнічуючих сил статора і ротора, взаємний стан яких безупинно міняється при обертанні ротора;
- з метою кращого використання двигуна в різних режимах його роботи виникає задача регулювання магнітного потоку двигуна.

Роздільне керування швидкістю і потокозчепленням асинхронного короткозамкненого електродвигуна можна ефективно робити, використовуючи принцип векторного керування, що і буде розглянутий нижче.

Розглянувши способи керування асинхронним двигуном, вибираємо частотно-струмовим спосіб керування, тому що при цьому забезпечуються необхідні регулювання режимів роботи при керуванні асинхронним двигуном. Для автоматизації керування привода подач верстата вибираємо комплектний привод типу «Размер» функціональна схема якого наведена на рисунку 1.8

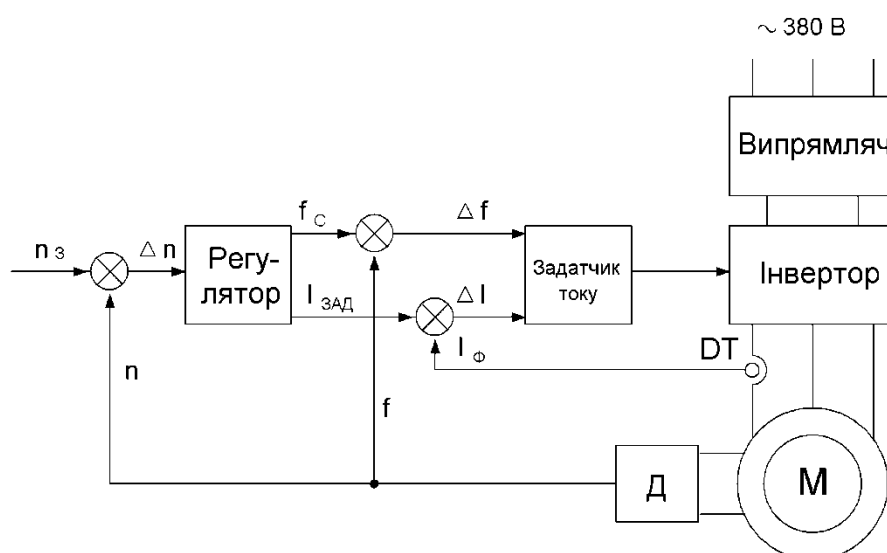


Рисунок 1.8 – Функціональна схема системи з частотно-струмовим способом керування.

2 АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА «РАЗМЕР-2М-5-21»

Електропривод асинхронний «Розмір 2М-5-21» використовується в технологічних верстатах з ЧПУ для керування електродвигунами двох механізмів подач і електродвигуном шпинделя.

У комплект електроприводу входять:

- шафа електроперетворювачів;
- три асинхронні машини з вбудованими датчиками положення і температури і вентиляторами;
- діагностичні пристрої сигнатурного контролю;
- блок трансформаторів.

Електропривод працює у всіх 4 квадрантах механічної характеристики при зміні управляючої напруги в межах ± 10 В.

Максимальна частота обертання 1000 або 1500 хв⁻¹.

Тіпорозмери приводу охоплюють ряд номінальних моментів двигунів від 7 до 70 Нм.

Електропривод виробляє імпульсні сигнали переміщення, які можуть використовуватися в пристрої ЧПУ для вимірювання переміщення механізмів подач.

Дві серії імпульсних сигналів Sin і Cos з фазовим зрушенням 90 ел. градусів несуть інформацію про величину і напрям переміщення. За один оборот валу двигуна видається 2000 або 1000 імпульсів залежно від виконання приводу. Сигнал нуль-мітки НМ видається двічі за один оборот валу двигуна і використовується в УЧПУ для формування міток початку відліку.

Головний привід має частоту обертання від 45 до 4500 хв⁻¹. Потужність приводу 11 кВт.

Електропривод реалізований відповідно до частотно-струмового способу управління.

2.1 Опис роботи електроприводу

Структурна схема одного каналу приводу подачі показана на рисунку 2.1. Електропривод виконаний по схемі підлеглого регулювання, з контурами регуляторів струму, швидкості, частоти ковзання і положення. Контур положення замикається через пристрій ЧПУ.

Вхідний сигнал управління U_q є різницею сигналу завдання U_s і аналогового сигналу зворотного зв'язку по швидкості — АС, формованого цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП) блоку ФІ11. Формувач ФАФТ формує сигнал завдання амплітуди і фази струму статора T_{3c} , а формувач ФС — сигнал, пропорційний частоті ковзання f_c .

Сигнал T_{3c} є сумою двох векторів, модулі яких пропорційні сигналам U_d і U_q , а осі взаємно перпендикулярні. У блоці ФАФТ здійснюється формування U_d (за допомогою сигналів $\Phi 1$ і $\Phi 2$, що поступають з регулятора струму РТ8) і його векторне підсумовування з сигналом U_q . Завдання частоти фазних струмів в сигналах T_{3A} і T_{3B} і фазове зрушення в 120 ел. градусів між ними формуються за допомогою сигналів $K0$ і $K120$. Частота фазних струмів визначається виразом $f = p f_{vr} \pm f_c$, де p — число пар полюсів.

Синусоїдальні сигнали T_{3A} і T_{3B} , пропорційні завданню струмів у фазах А і В, поступають на регулятор струму, розташований в блоці РТ8. Регулятор струму виробляє сигнали управління трифазним транзисторним інвертуванням. Безпосередньо до інвертування підключений асинхронний двигун з вбудованими датчиками положення і температури. Датчик температури дає інформацію про температуру магнітної системи двигуна, яка використовується для корекцій величини частоти ковзання.

У ланцюзі фаз А і В двигуна включені датчики струму $D1$, використовувані для негативного зворотного зв'язку по миттєвих значеннях фазних струмів, що необхідне при частотно-струмовому способі управління.

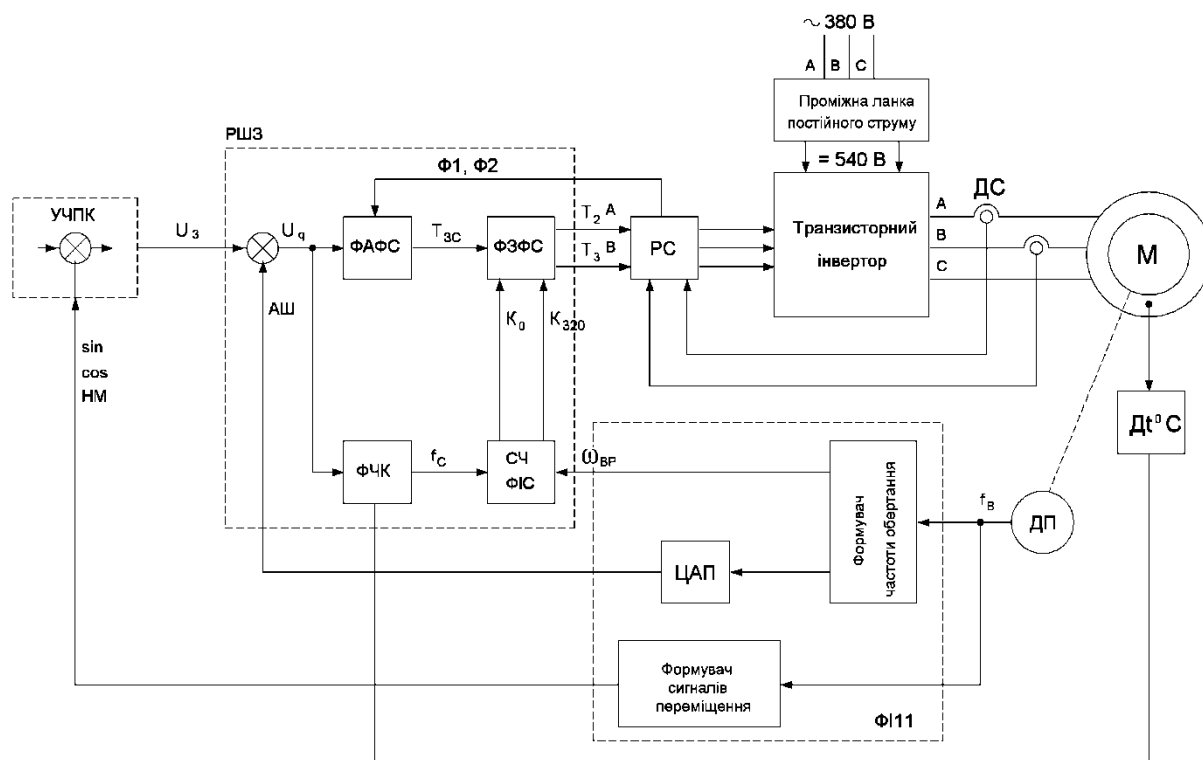


Рисунок 2.1 – функціональна схема електроприводу «Розмір 2М-5-21»

Датчик положення (ДП) — трансформатор, що обертається, включений по схемі фазообертача, виробляє сигнал f_0 , з якого в блоці ФІ11 формуються сигнали зворотних зв'язків по положенню Sin, Cos і НМ (нуль-мітки); по швидкості — АС (аналоговий сигнал), по частоті обертання $\omega_{вр}$.

У електроприводі передбачена розгалужена система захистів і контролю, забезпечуючи його зручну експлуатацію і надійність роботи.

Регулятор струму (рисунок 2.6) містить у собі аналогову і цифрову (схема вибору режимів, дешифратор кодів і формувачі) частини та розташований у блоці РТ8.

Датчики струму (ТТ4) включені тільки в обмотках фаз А та В. Тому аналогова частина фази С складається тільки з нуль-органа НО, керованого сигналами завдання частоти фазних струмів (T_3A , T_3Y) і вихідними сигналами фазообертачів (TA' , TB') каналів А та В.

Розглянемо роботу регулятора струму на прикладі каналу фази А.

конструктивно виконаний на феритовому кільці. Магнітне поле, створюване фазним струмом двигуна (ампер-витки $I_a W_n$), компенсується полем струму, що протікає по компенсаційній обмотці W_k трансформатора струму ТТ4 (ампер-витки $I_k W_k$). Оскільки число витків обмоток становить $W_n = 1$ й $W_k = 90$, то забезпечується масштабування 1:90 стосовно вимірюваного струму.

Вихідний сигнал датчика струму ТА знімається з вимірювальних резисторів R2, R6. Компенсаційний струм I_k формується імпульсним підсилювачем ІУ, керованим компаратором D1. Перемикання D1 здійснюється похідній від ЕДС самоіндукції на обмотці W_k . ЕДС залежить від струму в обмотці W_k і від індуктивності обмотки.

Зміна індуктивності обмотки W_k у функції струму показана на рисунку 2.7.

Знак струму I_k залежить від полярності напруги $E_{пА}$ на виході ІУ. Припустимо, воно позитивне, а намагнічування кільця йде в умовно-позитивному напрямку. При досягненні насичення кільця ланцюжок, що диференціює, С1-R3 викличе перемикання D1. Полярність напруги $E_{пА}$ зміниться, і почнеться перемагнічування кільця в умовно-негативному напрямку. При досягненні насичення кільця знову відбудеться перемикання D1 і процес намагнічування почнеться з початку.

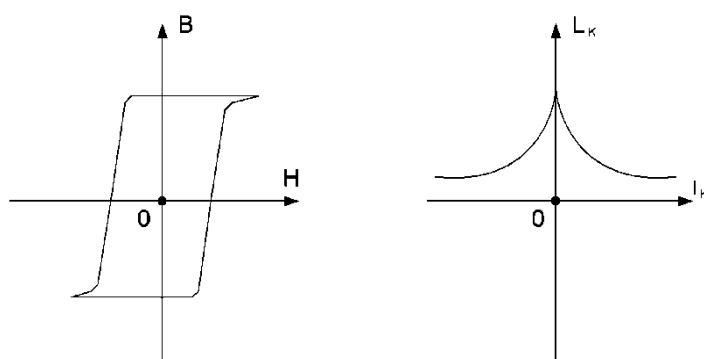


Рисунок 2.3 – Залежність індуктивності обмотки L_k датчика струму від намагніченості сердечника й струму

Частота перемикань становить 30 кГц, а тривалість напівперіодів встановлюється автоматично такою, що постійна складова струму I_k в обмотці W_k

буде пропорційна вимірюваному струму I_a .

Сигнал ТА, що знімає з вимірювального резистора $R_H = 9 \text{ Ом}$ ($R6 \parallel R2$), має вигляд:

$$U_{TA} = I_K R_H = \frac{I_A}{90} R_H = \frac{I_A}{10} (B)$$

На виході ІУ включена індуктивність L5, що виключає різке наростання струму I_K . У випадку, якщо з якої-небудь причини не відбудеться перемикавання D1, наростання сигналу ТА викличе пробій стабілітрона V1, що спричинить перемикавання D1 і повернення до робочого циклу намагнічування кільця.

При струмах, що перевищують $\pm 60 \text{ А}$, у схемі датчика струму встановлюються коливання із частотою 1,5 кГц.

Функціонування датчиків струму у фазах контролюється схемою контролю, виконаною на транзисторах V14, V16 і працюючою на частоті 3 кГц. У випадку несправності виробляється сигнал ФДТ, що індукується світлодіодом V23 і викликає блокування роботи формувача сигналів керування інвертором.

Компенсаційний метод виміру дозволяє здійснити гальванічну розв'язку від силових ланцюгів і знизити чутливість датчика струму до частотних перешкод у силовому ланцюзі.

Вихідні сигнали нуль-органів ПА, ПВ і ПС надходять у схему вибору режиму й синхронізації. Режим роботи визначає стан сигналу К. У режимі контролю (ДО=0) керування інвертором здійснюється сигналами A_K , B_K і $C_{\text{КОТ}}$ трифазного формувача.

В автономному режимі ДО=1 і інвертор управляється прямими сигналами ПА, ПВ та інверсним сигналом ПС.

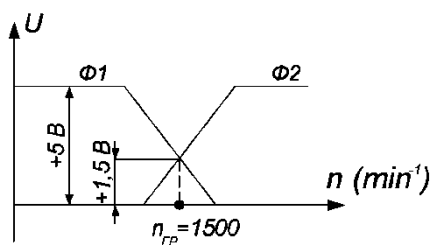
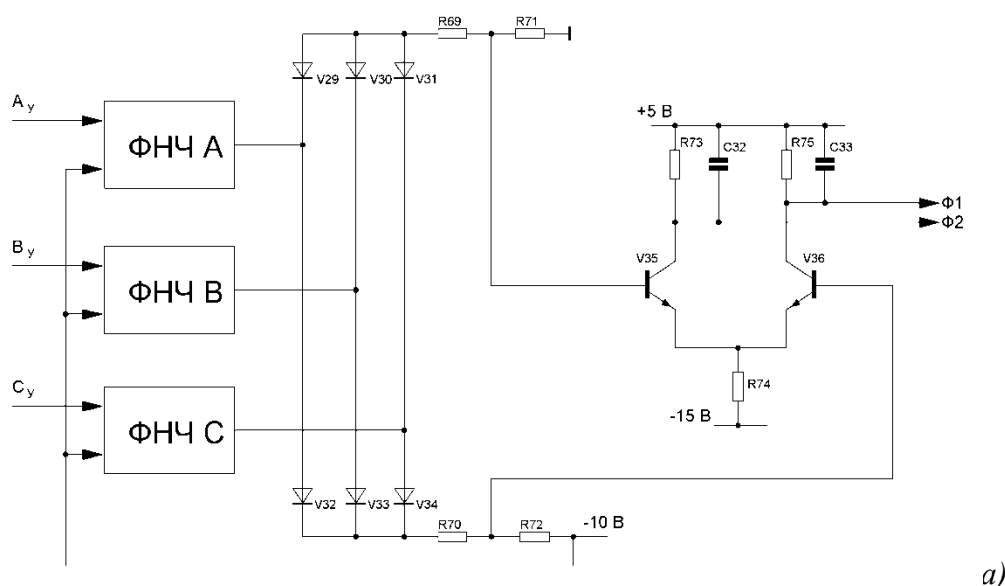
Дешифратор заборонених комбінацій (000 й 111) при неправильній роботі схеми синхронізації забороняє проходження тактової частоти 500 кГц у схему формувача сигналів керування інвертором.

Схема формувача сигналів керування інвертором формує сигнали КА1 і КА2 (фази А) таким чином, що мінімальна тривалість включеного стану ключа напівмоста інвертора не менш 25 мкс, а виключеного - не менш 55 мкс. Схема

Перемикання ключів здійснюється через 39 мкс після надходження сигналу низького рівня на D-вхід тригера Т1 (контрольна крапка КТ21). Ця затримка виконана з використанням мікросхем лічильників 4Е и 3Е. Елемент 2У - це суматор по модулю 2. На його виході формується сигнал логічного нуля при збігу сигналів на обох входах, тобто на елементі 2У здійснюється контроль неправильних станів тригера 2Е. Практично він здійснює контроль часу паузи (15 мкс).

Під час паузи сигнали КА1 і КА2 мають величину 5,8 В, а під час роботи ключів - 2,7 В. Зміна рівня напруги забезпечується елементами V46, V47, V40, V41, R77, R78.

Схема формування завдання потоку наведена на рисунку 2.6.



б)

Рисунок 2.6 – Схема формувача завдання потоку (а) і залежність сигналів Ф1 і Ф2 від частоти обертання вала двигуна (б)

Завдання потоку здійснюється за допомогою сигналів $\Phi 1$ і $\Phi 2$. Сигнали керування A_y , B_y , C_y надходять на фільтри низької частоти (ФНЧ), які виробляють синусоїдальні сигнали, що змінюються щодо рівня – 5 В від 0 до 10 В та частотою, рівною подвоєній частоті обертання поля статора двигуна. Амплітуда сигналів на виходах фільтрів ФНЧ залежить від шпаруватості сигналів A_y , B_y і C_y й пропорційна напрузі на фазах двигуна.

Позитивний і негативний виходи випрямляча на діодах V29...V34 управляють диференціальним підсилювачем на транзисторах V35 й V36, що формує сигнали керування струмом порушення $\Phi 1$ і $\Phi 2$.

Діаграма основних сигналів регулятора струму наведена на рисунку 2.7.

Регулятор швидкості РСЗ використовується в приводі подачі. Він призначений для формування сигналів завдання фазних струмів фаз А та В, для контролю функціонування контуру регулювання швидкості й виробітки сигналів «перегрів двигуна» й «перевищення моменту» на валу двигуна. Функціональна схема блоку наведена на рисунку 2.8.

Підсилювач регулятора швидкості (ОП D1, D2) виконаний за схемою ПІ-регулятора, що виробляє сигнал завдання моменту U_q . Постійна часу інтегрування регулятора $T_{\text{и}} = (R3 + R6)C9$ обрана так, що при подачі сигналу завдання стрибкоподібне перерегулювання не перевищує 15%. При підключенні до двигуна механізму подачі перерегулювання зменшується за рахунок збільшення моменту інерції, наведеного до вала двигуна.

Коефіцієнт пропорційного посилення дорівнює: $K_{\text{п}} = \frac{R12}{R3 + R6}$.

Сигнал U_q визначається виразом: $U_q = \frac{(U_{\text{пит}} - U_{\text{вых}} D_1) R17}{R17 + R16}$.

Рівень сигналу U_q визначає завдання моменту на валу двигуна. Максимальному моменту відповідає $U_q = \pm 5\text{В}$. Обмеження виконується діодним обмежувачем V2...V9. Повторювач на ОП D2 служить для узгодження ПІ-регулятора з наступними схемами[3].

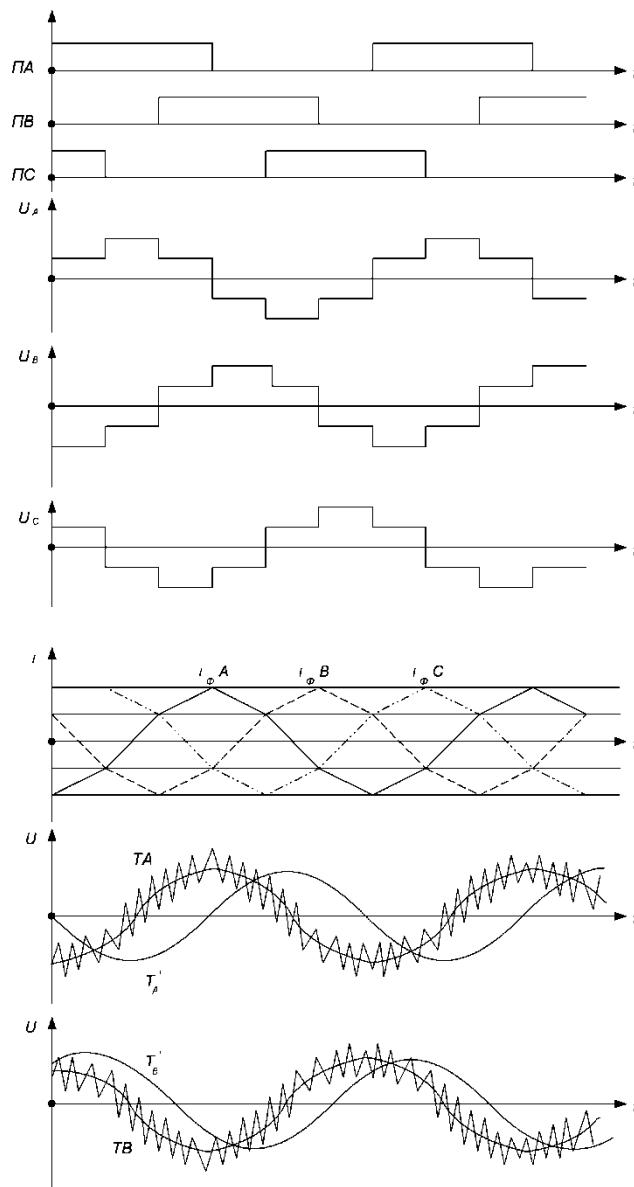


Рисунок 2.7 – Часові діаграми роботи регулятора струму РТ8

За допомогою ключа на польовому транзисторі V5 виключається інтегральна похибка в сигналі U_q . Вимірювальний прилад PU контролює величину заданого моменту. Відхиленню стрілки до цифри «1» відповідає номінальне значення моменту. При перевищенні рівня 2,5 В на виході Пі-регулятора (D1) на час більше 200 мс спрацьовує компаратор D3, розташований у схемі ФБЛ. Видається сигнал блокування ФБ у блок автоматики АП5, а також загоряється світлодіод V26 на блоці РС3.

амплітудою, рівної U_q . Зворотний зв'язок здійснюється через ОП D9.

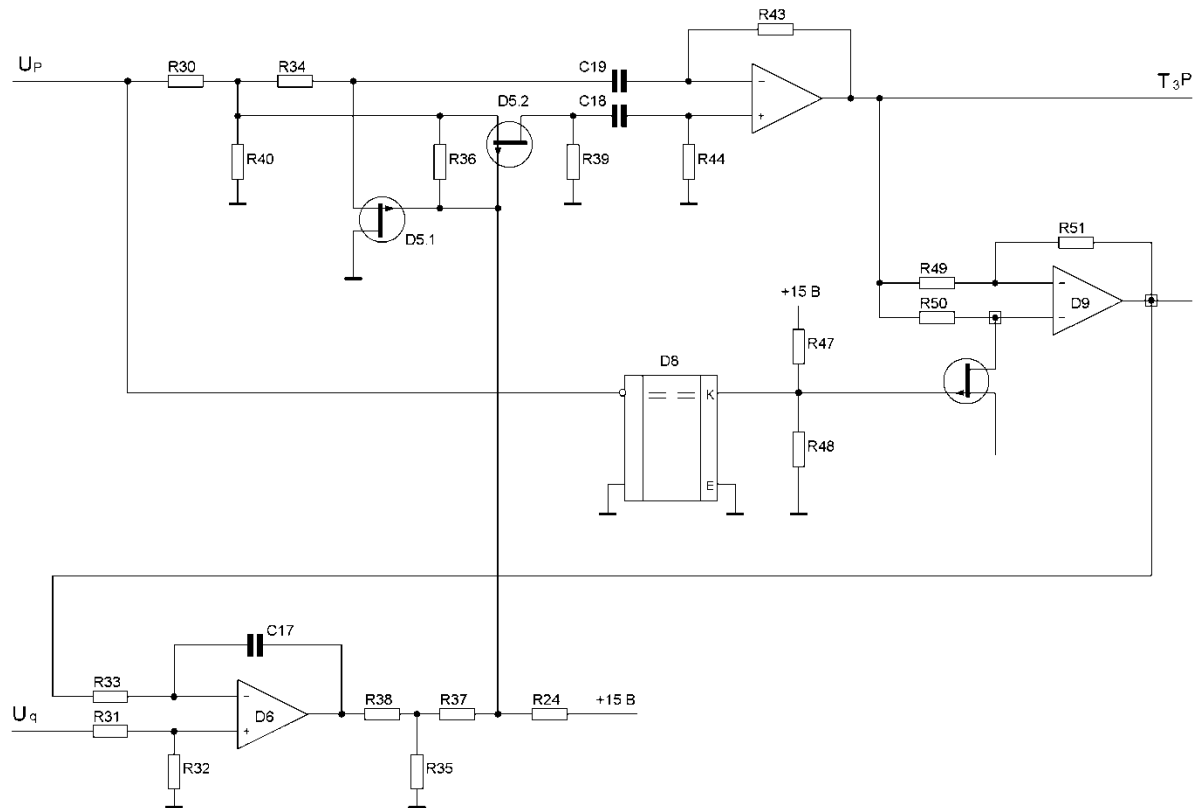


Рисунок 2.9 – Схема формувача струму ротора ФТР.

На схемі позначено: Φ_{cp} -формував струму ротора; ТК1 - температурний коректор; ІФП - імпульсно-фазовий перетворювач; ФД1, ФД2 - фазові детектори; РУ - вимірювальний стрілочний прилад; ФБЛ- формувач сигналів блокування, R_t - вбудований у двигун терморезистор.

До входу, що не інвертує, D9 підключений ключ V12, провідність каналу якого керується компаратором D8. Моменти підключення зворотного зв'язку визначаються сигналом U_p . Спрацьовування компаратора D8 переводить ОП D6 у режим інвертування напруги. Виділена різниця між U_q і сигналом T_{3p} служить для корекції амплітуди сигналу T_{3c} .

Часові діаграми роботи ФТР наведені на рисунку 2.10.[1]

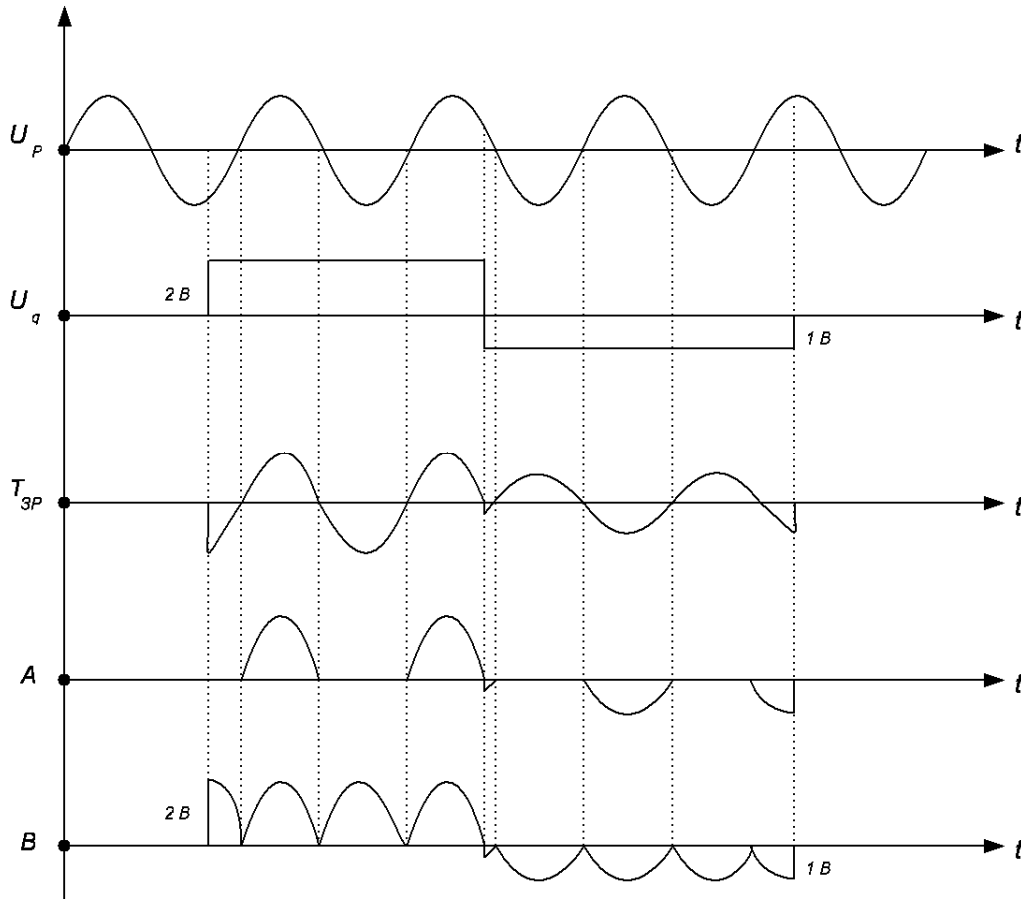


Рисунок 2.10 – Часові діаграми роботи ФТР

Друга складова сигналу T_{3c} — завдання потоку (струму порушення) — формується в регуляторі потоку РП (D4.1 й D4.2) за допомогою допоміжних сигналів $\Phi 1$ і $\Phi 2$. Амплітуда цієї складової залежить від еквівалентної провідності Т-подібного ланцюга $\gamma(U_d)$, включеного на вході підсилювача D14(R28, D4.1, D4.2) і функцією, що є, сигналу U_d та амплітуди сигналу $U_B=8,4V$ ($U_B = \sin I \Phi B$). Таким чином, амплітуда сигналу T_{3c} буде представлена виразом:

$$A_{T_{3c}} = \sqrt{A_B^2 + A_p^2} \quad (2.1)$$

де $A_p = U_q(R70/R68)$ і $A_B = U_e \gamma(U_d)R70$.

Сигнали завдання фазних струмів $T3A$ и $T3Y$ одержують за допомогою фазових детекторів ФД1 і ФД2. Сигнал $T3Y$ зміщують відносно $T3A$ на 120 ел. градусів. Обидва сигнали мають синусоїдальну форму із частотою, що визначається вираженням

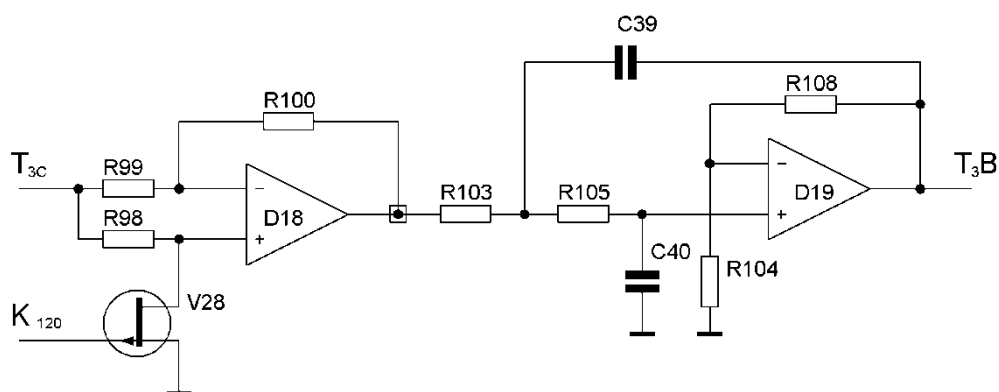
$$f = pf_{об} \pm f_c,$$

де p — число пар полюсів асинхронного двигуна; $f_{об}$ — частота обертання ротора; f_c — частота ковзання.

Схема фазового детектора наведена на рисунку 2.11. На вхід детектора подається сигнал T_{3c} частотою 2 кГц і сигнал ДО₁₂₀, частота якого — 2 кГц $\pm$ ($pf_{об} \pm f_c$), а шпаруватість дорівнює 2.

Фазовий детектор складається з фазочутливого випрямляча D18 і активного фільтра низької частоти D19. Сигнал ДО₁₂₀ керує ключем V28. На виході D18 формується напруга, постійна складова якої змінюється за синусоїдальним законом із частотою $pf_{об} \pm f_c$. Активний фільтр на D19 виділяє синусоїдальну складову, придушуючи високочастотну складову вихідного сигналу «а».

Сигнал, що містить частоту ковзання f_k , формується у вигляді імпульсної послідовності частотою $f_0 \pm f_k$ шляхом перетворення сигналу U_q у широтно-імпульсний сигнал і регулювання цим сигналом середньої кількості додаткових імпульсів, підсумованих з імпульсами опорної частоти f_0 .



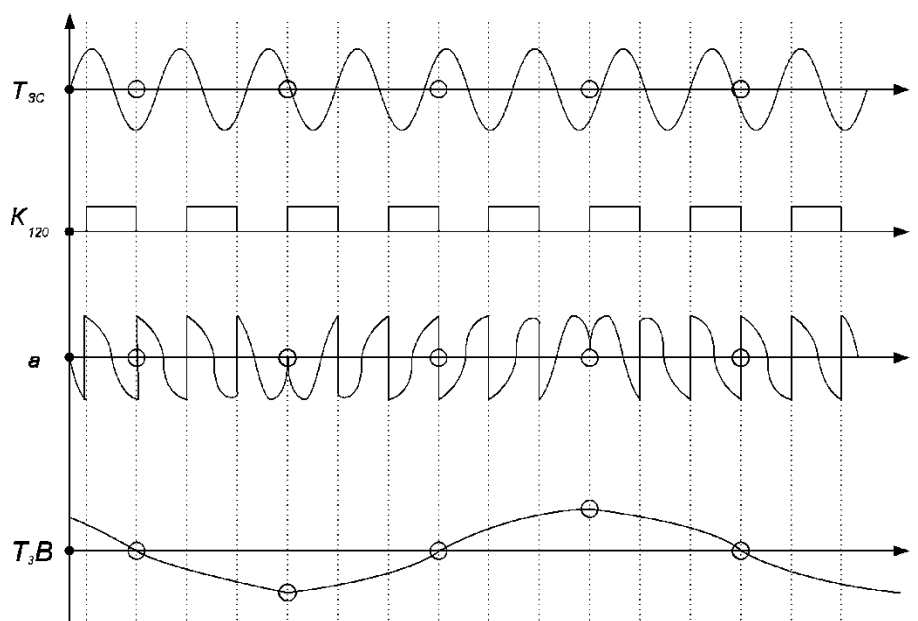


Рисунок 2.11 – Схема фазового детектора ФД (а) і часові діаграми роботи ФД (б)

При зміні температури обмотки ротора частота ковзання повинна пропорційно змінюватися. У режимах з ослабленням потоку, частота f_c повинна залежати від відношення сигналів U_q/U_d - при цьому момент, що розвиває двигун, буде змінюватися пропорційно U_d . Такі режими виникають при зниженнях напруги в мережі змінного струму, а також при частотах обертання вала двигуна близьких до 1500 1/хв.

Для двигунів з напругою живлення 220/380В амплітудне значення лінійної напруги при включенні в зірку стає близьким до напруги ланки постійного струму, тому регулювання в області більших частот обертання повинне супроводжуватися пропорційним зниженням потоку.

Формувач частоти ковзання ФЧК (рисунок 2.16) перетворює U_q у широтно-імпульсний сигнал, шпаруватість якого є інформаційним параметром. В імпульсно-фазовому перетворювачі виділяється частота ковзання f_c .

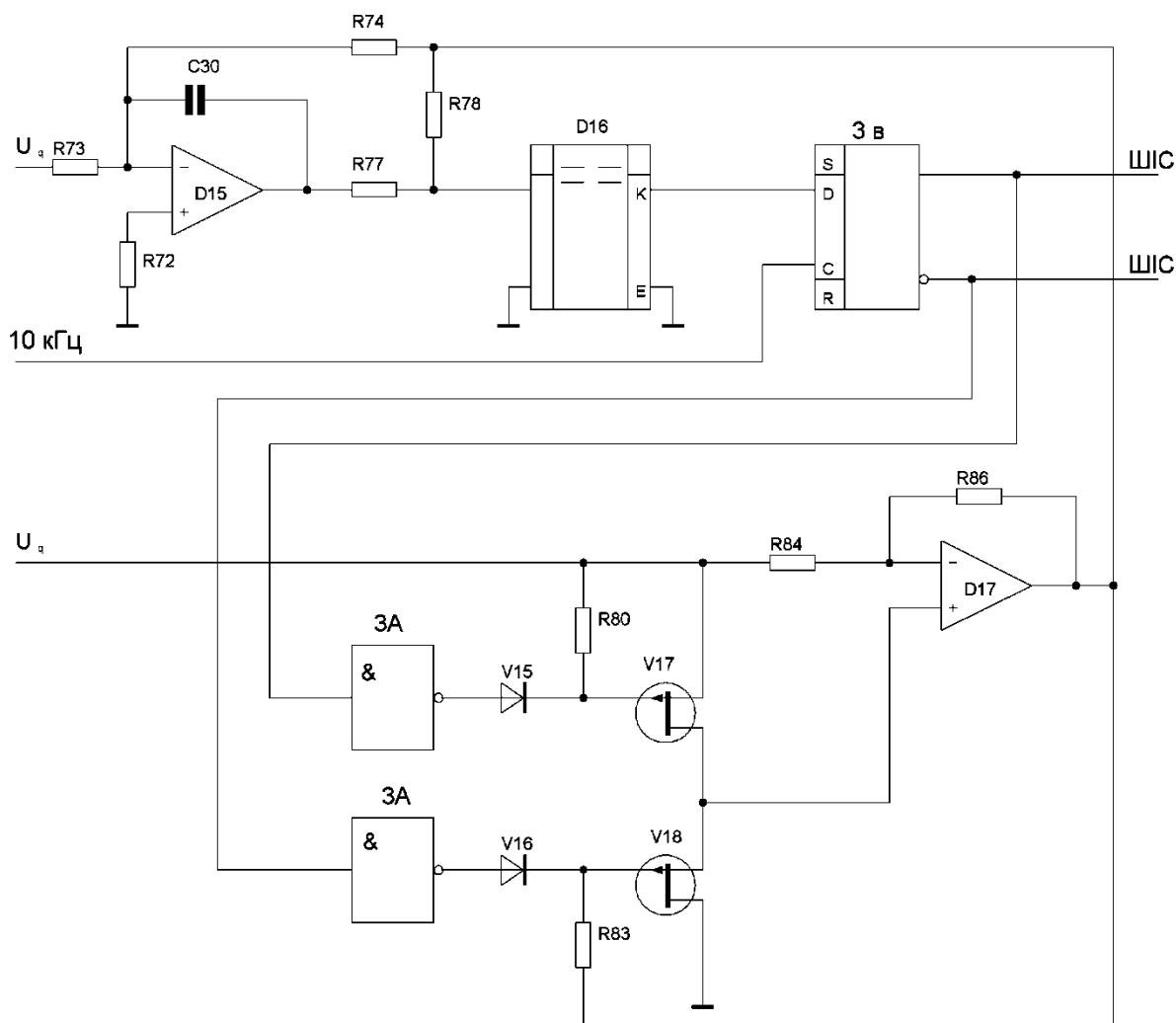


Рисунок 2.12 – Перетворювач напруги в широтноімпульсні сигнали

ФЧК складається з інтегратора D15, компаратора D16, тригера-синхронізатора 3В і пристрою множення напруги на знак (V17, V18, D17).

При $U_q = 0$ сигнал ШІС має частоту 1,7 кГц зі шпаруватістю 2. При позитивному значенні U_q величина шпаруватості зменшується, а при негативному — збільшується. Період сигналу ШІС пропорційний співвідношенню $(4R74 \cdot R77 \cdot C30)/R78$, тобто він не залежить від величин U_0 й U_q . Ці сигнали пов'язані із тривалістю імпульсу T співвідношенням

$$U_q/U_0 = \tau/T = -0,5, \text{ де } T - \text{період ШІС.}$$

Тригер 3В використовується для синхронізації фронтів широтно-імпульсного сигналу імпульсами 10 кГц.

Сформований сигнал ШІС надходить на схему синхронізації, де

При $I = 20^\circ$ $U_0 = 2,36\text{В}$, при $t = 120^\circ$ $U_0 = 1,65\text{ В}$, $U_d = 1,65\text{ В}$ і не залежить від температури.

Складова U_d формується фільтром низької частоти D11 шляхом вирахування сигналів T_{3z} й T_{3p} за допомогою фазочутливого випрямляча (D10, V15).

Сигнал перегріву двигуна ПД формується шляхом порівняння уставки й сигналу з датчика температури ДТ1, розташованого в статорі двигуна. При температурі вище 150°С компаратор D13 спрацьовує.

Сигнал ПД використовується в блоці автоматики АП5 для формування сигналу «перегрів двигунів комплекту» - ПДК. Поява цього сигналу викликає вимикання привода.

Блок перетворення фази в імпульси ФІ11. Як датчик положення використовується обертовий трансформатор, вбудований у двигун. Живлення датчика здійснюється синусоїдальними напругами, які формуються в блоці АП5.

Фазове зрушення між живлячими напругами дорівнює 90 ел. градусів. Вихідна напруга датчика також має синусоїдальну форму зі змінною амплітудою й фазою, що залежать від кута повороту вала.

Спосіб виміру переміщення полягає у вимірі зміни фази за період вихідного сигналу датчика. Отримані зміни фази підсумовуються у блоці ФІ11 для одержання повного кута повороту вала двигуна. Принцип виміру пояснюється рисунком 2.14. Оскільки фазове зрушення $\Delta\varphi$ можна представити і як часове зрушення ДТ, де останній характеризує величину переміщення механізму від вихідного. У блоці ФІ11 здійснюється вимір різниці періодів вихідного сигналу і живлячої напруги $\Delta T_i = T_{Bi} - T_{Pi}$.

При $T_{Bi} > T_{Pi}$ буде один напрямок руху, а при $T_{Bi} < T_{Pi}$ — зворотний. Випадок $T_{Bi} = T_{Pi}$ відповідає зупинці двигуна.

Величина ΔT_i також характеризує швидкість переміщення, а її знак —

напрямок переміщення.

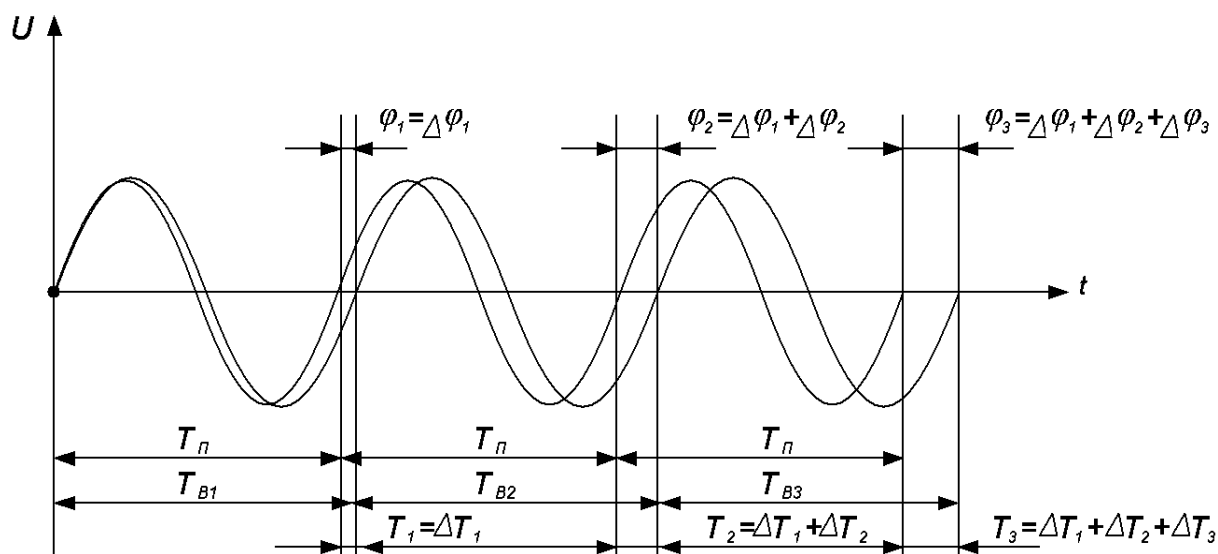


Рисунок 2.14 – Діаграма зміни фази й періоду вихідного сигналу фазообертача при обертанні ротора

Структурна схема блоку ФІ11 представлена на рисунку 2.19. Сигнал $f_{\text{с}}$ з датчика надходить на схему формувача безперервної фази ФФН (рисунок 2.20,а). ФФН перетворює синусоїдальний сигнал $f_{\text{с}}$ у дискретний ФН. Схема виконана на двох компараторах D6 й D7, які керують роботою тригера Т. Уставки спрацьовування компараторів різні. D6 перемикається при переході $f_{\text{с}}$ через нуль, а D7 при перевищенні напруги зсуву -2,4 В (рисунок 2.20,б).

У режимі контролю транзистори V17, V15 відключають компаратори, і формування ФН здійснюється від контрольних сигналів ФК1 і ФК2.

Позитивний фронт сигналу ФН керує формувачем стробів, що виробляє три рознесених у часі строба: СЗ, 34, 35. За допомогою стробів синхронізуються всі вузли блоку ФІ11, здійснюється початкова установка, запис та інші операції в елементах пам'яті блоку.

Сигнал ФН ділиться на 2 для одержання сигналів керування лічильниками і синхронізується частотою 32 мГц. Вимір переміщення проводиться за допомогою лічильників Сч1 і Сч2.

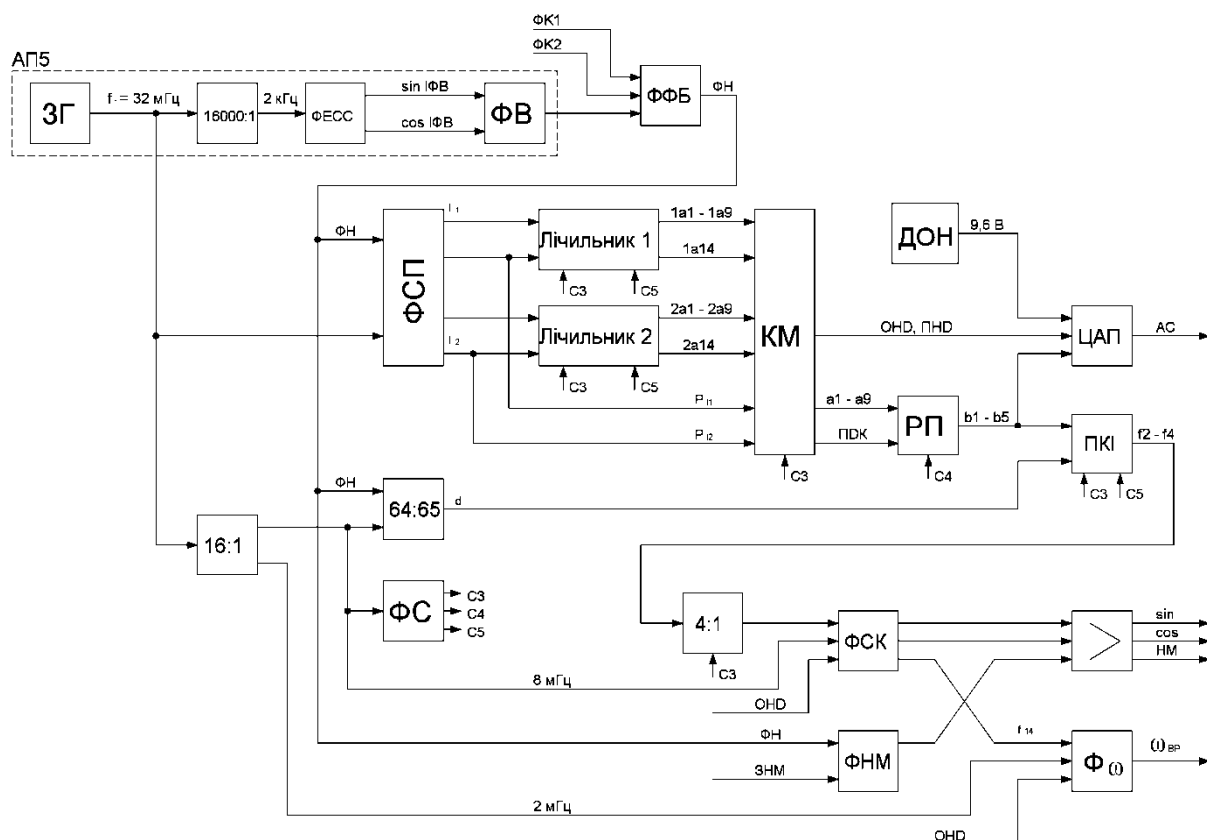


Рисунок 2.15 – Структурна схема блоку ФІ11.

ФФН - формувач безперервної фази; ФСП - формувач сигналів переміщення; КМ - комутатор; РП - регістр переміщення; ПКІ - перетворювач кодів у послідовність імпульсів; ДОН - джерело опорної напруги; ЦАП - цифроаналоговий перетворювач; ФС - формувач стробів; ФО - фазообертач; ФЕСС - формувач еталонних синусоїдальних сигналів; ФСК- формувач сигналів $\sin$ й $\cos$; ФНМ - формувач сигналу нуль-мітки; Φ_{ω} - формувач сигналу $\omega_{об}$; 64: 35, 4:1, 16:1-ділники з відповідними коефіцієнтами розподілу.

Використання двох лічильників викликано необхідністю фіксувати переміщення в кожному періоді вихідного сигналу.

Вихід лічильників - двійковий, що необхідно для керування цифроаналоговим перетворювачем (ЦАП). Однак переповнення лічильників повинне відбуватися при числі рахункових імпульсів, кратному десяти, виходячи

з необхідної величини дискретності. Для приведення двійкового рахунку $214 = 16384$ до обсягу 1600 виконується початкова установка лічильника в число $384 = 16384 - 1600$. Такий обсяг лічильника дозволяє вимірювати фазу вихідного сигналу датчика переміщень із великою точністю. Дискретність вимірів переміщення дорівнює періоду частоти заповнення лічильника.

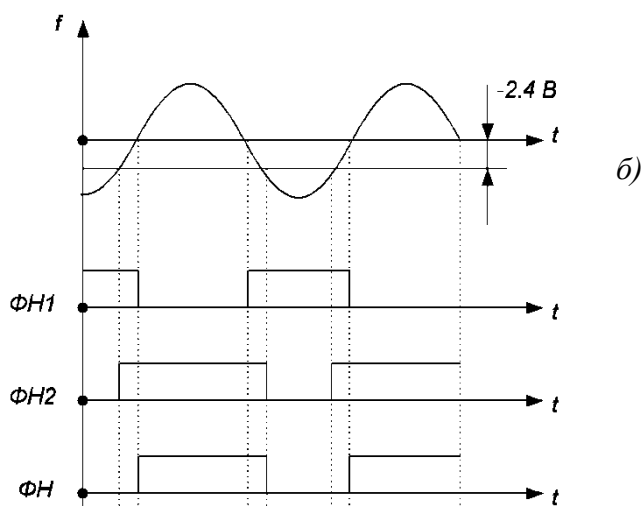
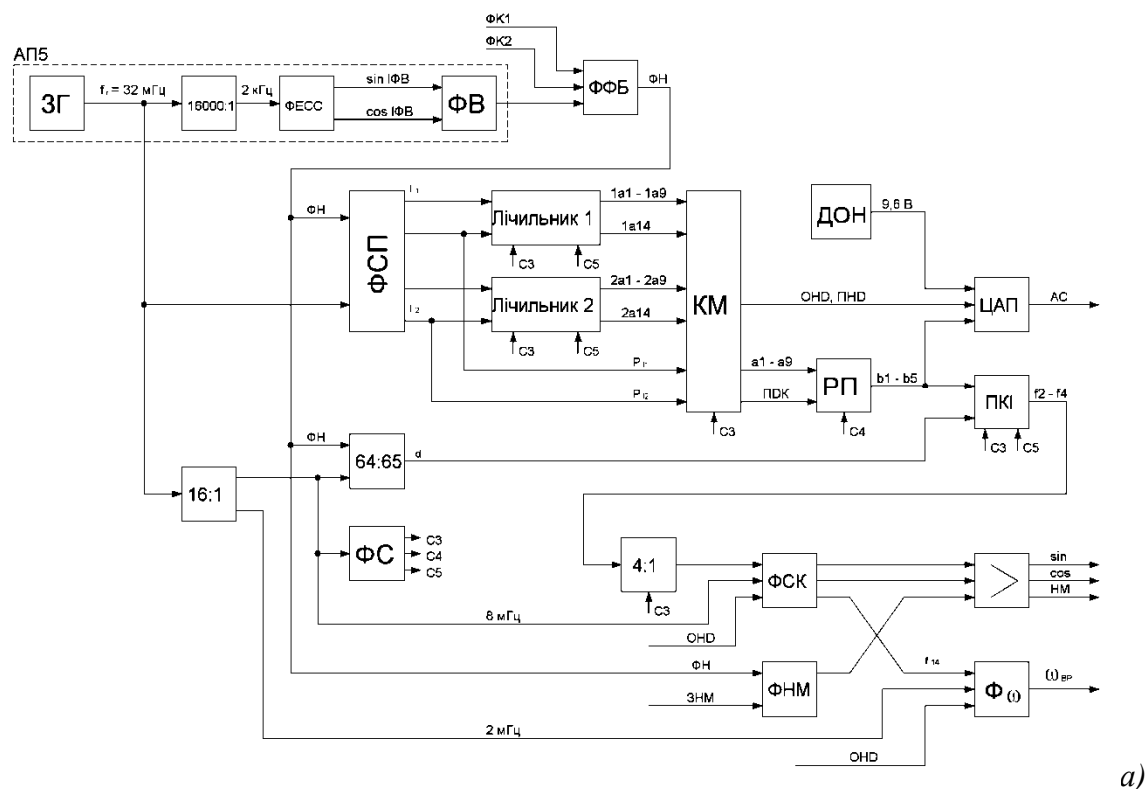


Рисунок 2.16 – Формувач сигналу безперервної фази ФФН: а - принципова схема;
б - діаграма формування сигналу ФН

Так як порівняння періоду f_b здійснюється із частотою $f_n = 2$ кГц, то у

випадку відсутності руху за період вихідного сигналу лічильник встигає заповнитися і повернутися в нульовий стан. При обертанні в одному напрямку ($f_{\epsilon} < f_n$) лічильник переповниться й порахує додаткову кількість імпульсів, пропорційну переміщенню в даному періоді. При зворотному напрямку обертання ($f_{\epsilon} > f_n$) лічильник не заповниться до половини, а отже, не дорахує кількість імпульсів, пропорційна переміщенню в даному періоді. Стан старшого розряду лічильника характеризує напрямок руху вала ротора.

Робота лічильників здійснюється в такий спосіб. Якщо лічильник Сч1 заповнюється в даному періоді, то Сч2 передає через комутатор КМ код переміщення, отриманий у попередньому періоді вихідного сигналу датчика f_{ϵ} .

Робота комутатора КМ управляється сигналами дозволу роботи лічильників Рел і Рел2. У КМ здійснюється аналіз старшого розряду лічильника 1a14 (2a14), і у випадку негативного напрямку руху видається сигнал ОНД. Крім цього, код, отриманий з лічильника, інвертується й видається разом із сигналом РДК у регістр переміщення РП. Із РП отриманий код передається в «перетворювач коду в кількість імпульсів» (ПКІ) і ЦАП протягом періоду вихідного сигналу f_{ϵ} . Якщо код, переданий із КМ у РП, надходить інвертованим, то в РП до молодшого розряду додається 1 (для одержання додаткового коду). Код РП перетворюється цифроаналоговим перетворювачем у постійну напругу (АС). Отриманий аналоговий сигнал АС використовується в регуляторі швидкості РСЗ для формування сигналу U_q .

Перетворювач ПКІ виконаний на лічильниках зі змінним коефіцієнтом розподілу ДО155ИЕ8. Отриманий із РП код використовується для установки коефіцієнтів розподілу лічильників. Частота заповнення лічильників надходить зі спеціального дільника 64:35. Такий коефіцієнт розподілу обраний, щоб закінчити цикл відліку 2048 імпульсів за час трохи менше 0,5 мс. Запуск і зупинка перетворювача здійснюються високочастотним тригером. На виході перетворювача виходить послідовність імпульсів, що впливають через різні проміжки часу (тобто є згущення й розрідження). Для згладжування

нерівномірності на виході перетворювача включений дільник на 4, а кількість імпульсів, видавана перетворювачем, збільшено в 4 рази.

Код з виходу дільника на 4 надходить на схему формування сигналів $\sin$ й $\cos$ (ФСК). ФСК виконаний на основі лічильника, керування яким здійснюється сигналами напрямку руху (ОНД, ПНД). Сигнал $\sin$ виходить безпосередньо з виходу лічильника, а сигнал $\cos$ зміщується на одну дискрету переміщення спеціальною схемою. Обсяг лічильника визначає кількість дискретних сигналів, видаваних у пристрій ЧПУ за один оберт вала двигуна. Обсяг залежить від виконання привода. Можливі варіанти на 4000 й 8000 дискрет. Отримані сигнали $\sin$ й $\cos$ через вихідні підсилювачі подаються в УЧПУ для замикання контуру по положенню. Сигнал нуль-мітка НМ, необхідний для УЧПУ, формується у формувачі ФНМ при збігу сигналів ФН і ЗНМ (зона нуль-мітки).

Імпульс ЗНМ виробляється у блоці АП5 і має фіксоване зрушення відносно f_n . Наявність сигналу НМ індукується світлодіодом V3.

Параметри сигналів $\sin$, $\cos$ і НМ аналогічні сигналам, що виробляються імпульсно-кодovими датчиками, наприклад типу ВЕ-178.

З виходу лічильника ФСК знімається сигнал, формований у формувачі імпульсного сигналу $\omega_{об}(\Phi_{\omega})$, послідовність імпульсів, що представляють у деякому масштабі імпульси переміщення, і сигнал напрямку руху. За один оберт вала двигуна видається 2000 імпульсів. Напрямок руху визначається моментом формування імпульсів. При позитивному напрямку руху імпульси видаються на позитивному фронті сигналу з виходу лічильника, а при зворотному напрямку руху - на негативному фронті вищевказаного сигналу.

Цикл роботи блоку починається з моменту переходу вихідного сигналу датчика f_b через нуль від негативного значення до позитивного. При цьому починається заповнення одного лічильника Сч1, встановленого у вихідний стан у попередньому періоді. Формувач строба виробляє строби СЗ, 34, 35. Стробом СЗ у комутатор КМ із лічильника записується сигнал напрямку руху. Відбувається установка в нульовий стан дільника 4:1 і ПКІ.

Строб 34, якщо є сигнал РДК, додає в регістр переміщень РП одиницю до коду, отриманому від комутатора КМ. По стробу 35 дозволяється робота ПКИ й виробляється установка в нульовий стан лічильника Сч2.

У режимі сигнатурного контролю в блоці ФІ11 відбувається контроль цифрової частини блоку сигналами ФК1 і ФК2. Працездатність компараторів D6, D7 у ФФН і ЦАП при сигнатурному контролі не контролюється.

Транзисторне інвертування (рисунок 2.17) є трифазною мостовою схемою, призначеною для комутації обмоток асинхронного двигуна; він виконаний на трьох транзисторних перемикачах типа КС12.

У кожному блоці КС12 розташовано два силові перемикачі, включені по схемі складового транзистора (Дарлінгтона) і забезпечуючих комутацію струмів до 20 А при напрузі живлення до 675 В.

Живлення інвертування здійснюється від ланки постійного струму, як яке використовується високовольтне джерело живлення напругою 540 В.

Магнітозв'язані дроселі L1.1 і L1.2 призначені для обмеження імпульсів зворотного струму через включені стрічно-паралельно силовим транзисторам поворотні діоди V24 і V32. Дроселі шунтовані ланцюжками R15, V25 і R16, V33 відповідно, що забезпечує нерозривність струму при комутації силових транзисторів.

Конденсатор С6 захищає транзистори від перенапружень.

Управління роботою силових перемикачів здійснюється схемами управління U1 і U2, включаючими стрічно-паралельні оптронні розв'язки V6, компаратори D1 і підсилювачі. Роботою схем U1 і U2 управляють сигнали КА1 і КА2 (фаза А), що поступають від регулятора струму (РТ8). Живлення схем U1 і U2 здійснюється від джерела вторинної напруги, що перетворює напругу прямокутної форми частотою $f = 800$ Гц в постійну напругу. Діод V13 замикає негативний зворотний зв'язок по напрузі насичення транзисторів, що забезпечує їх роботу в активній зоні, збільшуючи швидкодію і зменшуючи теплові втрати.

Амплітуда струму у фазі обмежена напругою високовольтного джерела і індуктивністю розсіювання фази двигуна.

Стан силових перемикачів контролюється світлодіодами.

Передбачений захист інвертування від імпульсних перевантажень і аварійних режимів. Захист по струму виконаний шляхом вимірювання струму

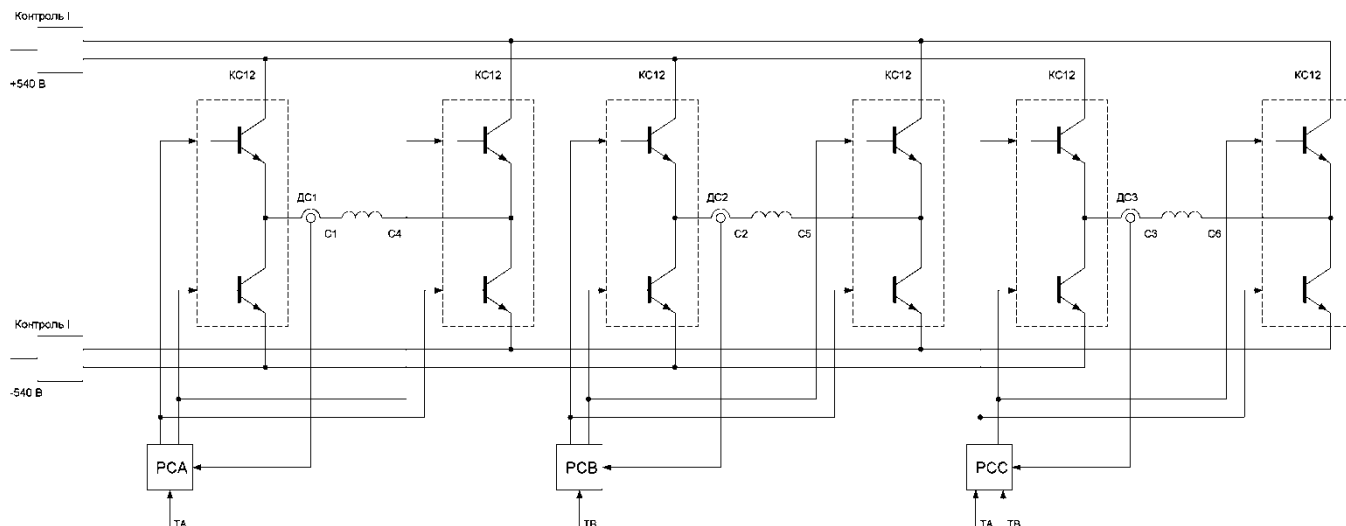


Рисунок 2.17 – Транзисторний інвертор двигуна

інвертування в ланцюгах +540 В і -540 В і порівняння його з максимально допустимою величиною в блоці контролю струмів КТ7.

Аварійний сигнал АТ включає схему аварійного струмообмеження в блоці регулятора струму РТ8. Формується сигнал блокування вихідних імпульсів управління інвертуванням (Б).

2.2 Налагодження привода

При введенні в експлуатацію електропривод «Размер 2М-5-21» не вимагає якого-небудь налаштування, тому що не має елементів регулювання. Обрані схемотехнічні рішення дозволяють робити заміну елементів, що вийшли з ладу в процесі експлуатації, без підбору режимів їхньої роботи.

Пошук несправностей починається із зовнішнього огляду. Спрацьовування елементів контролю індуються світлодіодами, причому відключення привода,

викликане спрацьовуванням захистів, не відключає світлодіод, індукуючий причину відмови.

Після виявлення несправного блоку необхідно скористатися сигнатурним контролем для локалізації несправного елемента у блоці.

Сигнатурний контроль здійснює перевірку функціонування тільки цифрової частини блоку, тому у випадку, якщо не буде виявлена несправність шляхом сигнатурного контролю, необхідно за допомогою осцилографа провести перевірку аналогових вузлів блоку. Осцилограми в контрольних точках повинні відповідати наведеним в описі привода.

Сигнатурний контроль здійснюється за допомогою сигнатурного аналізатора СА7 спільно із щупом ІЩ5.

Сигнатурний аналізатор видає еталонні сигнали, що імітують робочі сигнали блоку, що перевіряє. Рівні сигналів відповідають ТТЛ-логіці.

Метод сигнатурного аналізу полягає у вимірі дискретно в часі тривалості кожного логічного стану елемента, що перевіряє, у послідовності великої довжини за обмежений проміжок часу з перетворенням результату виміру за певним законом у паралельний чотирьохрозрядний код (сигнатуру), що характеризує дану послідовність.

Порівнюючи сигнатуру вихідного сигналу з еталонної (приводиться в спеціальних таблицях), можна зробити висновок про правильність роботи елемента, що перевіряє. У таблицях сигнатури приводяться коди для всіх задіяних у схемі виводів цифрових мікросхем. При відповідності сигнатури на входах елемента, що перевіряє, і невідповідності сигнатури на його виході можна зробити висновок про його несправності.

Зустрічаються несправності привода, які залежать від зовнішніх сигналів.

Щоб виключити їх, при перевірці привода використовується автономне керування приводом від налагоджувального пульта ПН8.

За допомогою цього пульта можливе оперативне керування приводами подачі і головним приводом, при цьому є можливість вибирати в широкому діапазоні швидкість переміщення.

З пульта наладчика при необхідності можна заблокувати сигнали про несправності блоків електропривода. Можливий контроль функціонування привода по одній координаті (при відсутності блоків інших координат).

Робота сигнатурного контролю пояснюється рисунку 2.21.

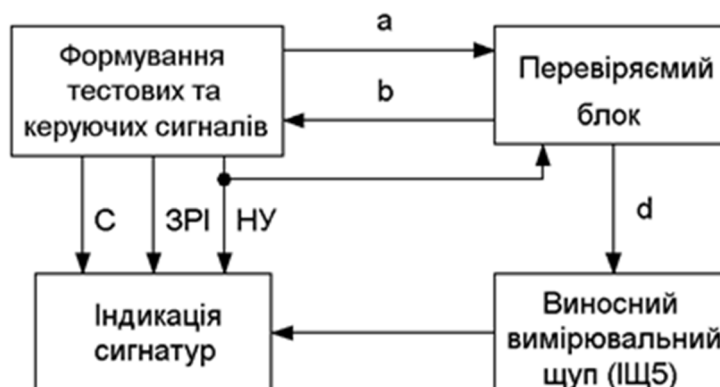


Рисунок 2.21 – Схема зв'язків перевіряємого блоку при сигнатурному контролі.

Тут: а - тестові сигнали; b - код вибору блоку; с - синхроімпульси; d - сигнал із, що перевіряє точки схеми блоку.

Блок, що перевіряє, встановлюється на перехідну плату, яка має два паралельно включених рознімання під кутом 90°. В одне рознімання вставляється блок, що перевіряє, в іншій - плата сигнатурного контролю із щупом ІЩ5.

Перевірка працездатності блоку починається з перевірки сигнатур, наведених у табл. 1 для цього блоку [3]. Якщо хоча б один код не збіжиться, то переходять до перевірки сигнатур табл. 2. Для цього на принциповій схемі блоку знаходять елемент, вихід якого формує неправильний код сигнатури.

У приводі прийняте позначення цифрових елементів за допомогою координатної сітки, наприклад 2L. де L позначає порядковий номер на вертикалі блоку, а 2 - по горизонталі. У таблиці знаходять елемент саме по цих кодах.

Якщо при перевірці входів елемента всі сигнатури збігаються, то цей елемент несправний (на виході невірна сигнатура) і потрібно його замінити. У випадку, коли на входах є невірні сигнатури, переходять до перевірки елементів, з яких вони надходять.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПРИВОДУ ПОДАЧ ВЕРСТАТА

3.1 Розробка математичної моделі системи керування

При частотно-струмовому керуванні АД живеться від перетворювача частоти (ПЧС) струму, що працює в режимі джерела. Подібний перетворювач може бути реалізований на основі автономного інвертора струму (рисунок 3.1, *а*), до складу якого входять керований випрямляч КВ, що забезпечує за рахунок негативного зворотного зв'язку по струму навантаження (датчик струму ДС і регулятор струму РС) спільно з фільтруючим дроселем Др режим керованого джерела постійного струму, і інвертор струму ІС, що виконує функцію формування необхідної частоти вихідного струму. Реалізація ПЧС можлива і на основі перетворювачів частоти з безпосереднім зв'язком БПЧ (рисунок 3.1, *б*), в яких для кожної з вентильних груп є внутрішній контур регулювання струму, а частота вихідного струму БПЧ задається генератором частоти ГЧ. Контур регулювання струму ПЧС, як правило, астатичний, і параметри його ПІ-регулятора визначають так само, як і для ПІ-регулятор струму в електроприводах постійного струму.

Відмітною особливістю ПЧС є можливість двостороннього обміну енергією між мережею, що живить його, і двигуном з нереверсивним КВ за рахунок зміни напрямку протито-ЕДС інвертора і збереження напрямку в ньому випрямленого струму.

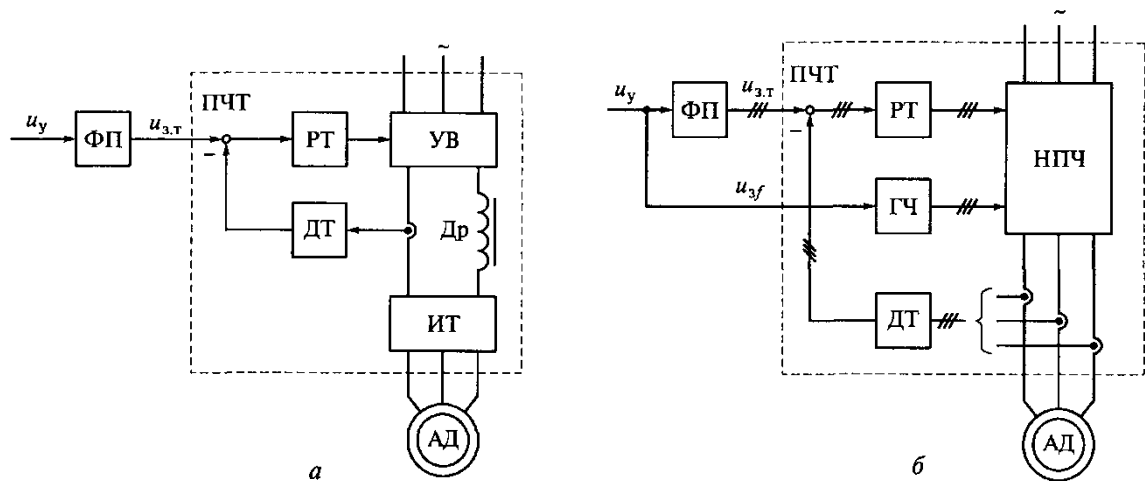


Рисунок 3.1 – Функціональні схеми систем ПЧ—АД при живленні від джерел струму на основі автономного інвертора (а) і перетворювача частоти з безпосереднім зв'язком (б)

Керування двигуном відбувається за допомогою сигналів завдання вихідного струму u_{3c} частоти u_{3f} перетворювача ПЧС. Два сигнали, у свою чергу, залежать від сигналу керування u_k .

При живленні АД від джерела струму унаслідок розмагнічуючої дії струму ротора магнітний потік АД помітно змінюється при зміні абсолютного ковзання. В наслідок цього для стабілізації магнітного потоку АД при зміні його навантаження в канал завдання струму ПЧС вводиться функціональний перетворювач ФП, що визначає завдання струму статора I_l у функції абсолютного ковзання s_a . Залежність $I_l = F(s_a)$ і пропорційна нею залежність $u_{3c} = \Phi(u_k)$ є нелінійними функціями (рисунок 3.2), які на робочих ділянках механічних характеристик АД відповідають умові $I_l^2 \cong s_a$. характеристики цих залежностей симетричні щодо осі струму, що визначається симетрією механічних характеристик АД в руховому і генераторному режимах його роботи.

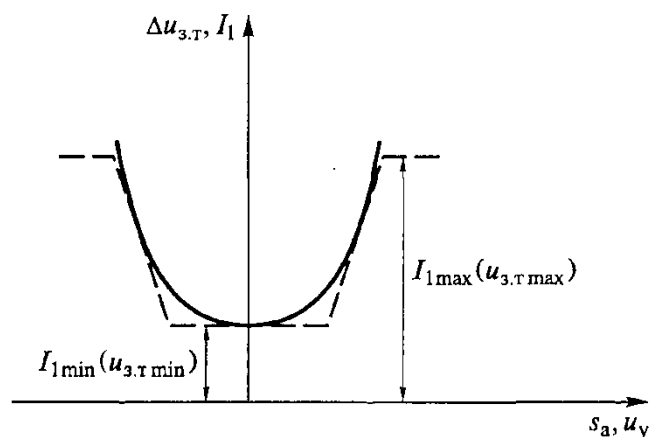


Рисунок 3.2 – Залежність струму статора від абсолютного ковзання АД

При технічній реалізації ФП користуються лінійною апроксимацією залежності $I_l = F(s_a)$ (штрихова лінія на рисунок 3.2). на рисунку значення $I_{l \max}$ та $u_{з.т \max}$ визначають максимально допустимий струм статора і сигнал його завдання, а $I_{l \min}$ та $u_{з.т \min}$ — струм холостого ходу АД і сигнал його завдання.

Позитивні властивості АД при його живленні від ПЧС, такі як незалежність електромагнітного моменту АД від частоти і можливість при заданому струмі статора і абсолютному ковзанні, рівному критичному, забезпечити більший момент, чим при живленні від джерела напруги, можуть бути реалізовані лише в замкнутій системі, контролюючій абсолютне ковзання і струм двигуна у функції навантаження. На рисунку 3.3 наведена функціональна схема такої системи частотно-струмового керування АД. Джерело струму реалізоване на основі керованого випрямляча КВ, струм навантаження I_n якого задається вихідною напругою u_{PC} регулятора струму РС, пропорційним різниці напруги $u_{зс}$ на виході ФП і u_{oc} датчика струму ДС. Стабілізація швидкості АД забезпечується за рахунок регулятора швидкості РШ, на вході якого порівнюється напруга завдання швидкості $u_{зш}$ зворотного зв'язку $u_{ош}$ виходу тахогенератора ТГ. унікальність схеми в тому, що тут автоматично формуються сигнали, пропорційні ковзанню і завданню синхронній швидкості АД.

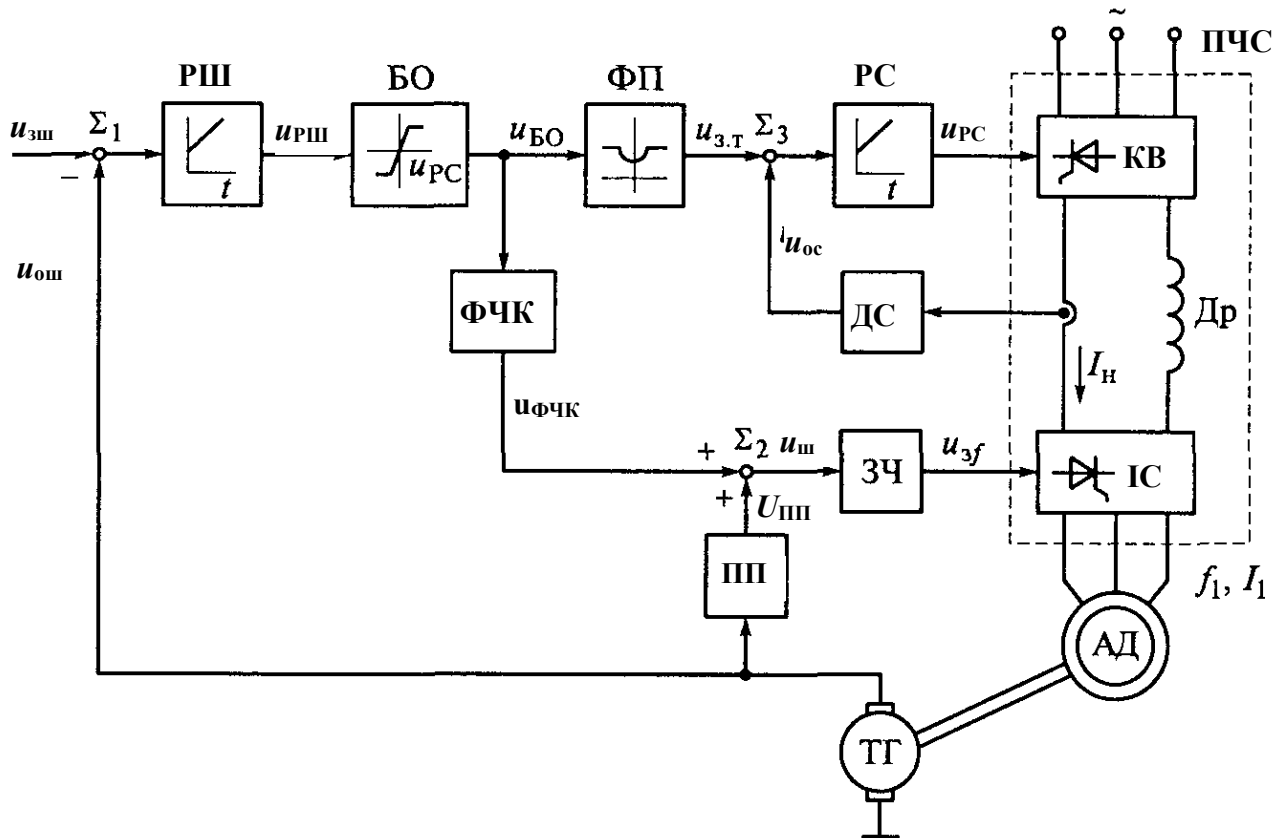


Рисунок 3.3 – Функціональна схема замкнутої системи

ПЧ—АД з частотно-струмовим керуванням

Сигнал, пропорційний s_a , формується на виході РШ, оскільки $u_{зш}$ пропорційно завданню швидкості ω_{03} ідеального холостого ходу АД, а $u_{ош}$ — поточній швидкості ротора ω , тобто $u_{РШ} \cong (u_{зш} - u_{ош}) \cong (\omega_{03} - \omega) = s_a \omega_{0ном}$. Якщо передавальний коефіцієнт формувача частоти ковзання ФЧК вибрати так, щоб з урахуванням його вихідний сигнал $u_{ФЧК}$ був пропорційний $(\omega_{03} - \omega)$, то після підсумовування цього сигналу з вихідним сигналом $u_{ПП}$ погоджувального пристрою ПП, пропорційним поточному значенню ω , на виході суматора Σ_2 пристрою завдання частоти ЗЧ інвертору струму ІС перетворювача ПЧС буде вироблений сигнал

$$u_c = u_{ФЧК} + u_{ПП} = \omega_{03}.$$

Як наслідок на виході ЗЧ буде сигнал завдання частоти вихідного струму ПЧС $u_{зф} \cong u_{зш} \cong \omega_{03}$, що визначає завдання синхронній швидкості АД.

Як що електромагнітний момент двигуна пропорційний квадрату струму обмотки ($M \cong I_1^2$) статора, який, в наслідок, пропорційний абсолютному ковзанню, вихідний сигнал РШ пропорційний s_a і є сигналом завдання електромагнітного моменту АД. Тому вихідною напругою $u_{Б0}$ блоку обмеження БО на виході РШ можна впливати і на обмеження максимального моменту АД.

До пуску двигуна ($u_{зш} = 0$, $u_{РШ} = 0$) сигнал завдання частоти перетворювача $u_{zf} = 0$ і за рахунок характеристики ФП в АД задається постійний струм, що забезпечує потік намагнічення і режим динамічного гальмування АД. Із збільшенням $u_{зш}$ зростає сигнал завдання частоти, струм статора стає змінним із заданою частотою і двигун починає обертання під дією максимального моменту, встановленого сигналом $u_{зш}$. Збільшення швидкості відбуватиметься до тих пір, поки не порівняються сигнали завдання і зворотного зв'язку за швидкістю двигуна. Після цього вихідний сигнал РШ за відсутності статичного навантаження на валу АД знов встановиться рівним нулю, але за рахунок позитивного зворотного зв'язку за швидкістю вже при $u_{zf} \neq 0$. Потік холостого ходу АД при цьому створюватиметься змінним струмом $I_{\min}$ (див. рисунок 3.2).

Для побудови структурної схеми електроприводу, показаного на рисунок 3.3, визначимо передавальні функції його окремих ланок і умови, при яких момент АД однозначно залежатиме від абсолютного ковзання.

Передавальна функція між заданою швидкістю ідеального холостого ходу АД $\omega_{0з}$ і сигналом завдання частоти на вході ПЧС u_{zf} визначається співвідношенням

$$W_f(p) = \Delta\omega_{0з}/\Delta u_{zf} = 2\pi k_f/p_{\pi}, \quad (3.1)$$

де k_f — передавальний коефіцієнт ПЧС, $k_f = \Delta f_z/\Delta u_{zf} = f_{ном}/u_{zfном}$.

$$\Delta u_{zf} = k_{зч}(k_{фчк}\Delta u_{РС} + k_{ПП}k_{ош}\Delta\omega), \quad (3.2)$$

де $k_{зч}$, $k_{фчк}$, $k_{ПП}$, $k_{ош}$ — передавальні коефіцієнти пристроїв ЗЧ, ФЧК, ПП і ланцюга зворотного зв'язку за швидкістю АД.

При живленні АД від джерела струму його передавальна функція щодо змін електромагнітного моменту і різниці змін заданій швидкості ідеального холостого ходу і поточного значення швидкості

$$W_M(p) = \Delta M / (\Delta \omega_{03} - \Delta \omega) = \beta_T / (T_{\text{ет}} p + 1)$$

Тут β_T — жорсткість механічної характеристики, визначувана по формулі $\beta_T = 2M_{\text{кт}} / (\omega_{0\text{ном}} s_{\text{кт}})$, де $M_{\text{кт}}$ і $s_{\text{кт}}$ — відповідно критичний момент і критичне ковзання АД при живленні його від джерела струму; $T_{\text{ет}}$ — еквівалентна електромагнітна постійна часу, визначувана по формулі $T_{\text{ет}} = 1 / \omega_{0\text{ел.ном}} s_{\text{кт}}$.

Оскільки критичне ковзання АД при живленні від джерела струму помітно менше, ніж при живленні від джерела напруги, то, отже, $\beta \ll \beta_T$, $T_e \ll T_{\text{ет}}$. Фізично це пов'язано з помітною зміною магнітного потоку АД при зміні його навантаження і, відповідно, більшою інерційністю електромеханічного перетворення енергії в АД при його живленні від джерела струму.

З урахуванням виразів (3.1), (3.2) можна записати

$$\begin{aligned} (\Delta \omega_{03} - \Delta \omega) &= (2\pi k_f / p_n) k_{3\text{ч}} (k_{\text{фчс}} \Delta u_{\text{рш}} + k_{\text{пп}} k_{\text{ош}} \Delta \omega) - \Delta \omega = \\ &= (2\pi k_f / p_n) k_{3\text{ч}} k_{\text{фчс}} \Delta u_{\text{рш}} + (2\pi k_f / p_n) k_{\text{пп}} k_{\text{ош}} \Delta \omega \end{aligned}$$

так при виборі передавальних коефіцієнтів функціональних пристроїв електроприводу отримаємо:

$$(\Delta \omega_{03} - \Delta \omega) = k_M \Delta u_{\text{рш}}$$

де $k_M = (2\pi k_f / p_n) k_{3\text{ч}} k_{\text{фчс}}$.

Звідси передавальна функція АД між зміною електромагнітного моменту АД і зміною сигналу на виході РС

$$W_M(p) = k_M \beta_T / (T_{\text{ет}} p + 1). \quad (3.3)$$

Відповідна виразу (3.3) структурна схема лінеаризованої системи з частотно-струмовим керуванням представлена на рисунок 3.4. Тут $T_{\text{мт}}$ — електромеханічна постійна часу АД при живленні від джерела струму.

Якщо віднести постійну $T_{\text{ет}}$ до малої постійної часу, що не компенсується, то при настроюванні електроприводу на модульний оптимум передавальна функція РС

$$W_{\text{РШ}}(p) = T_{\text{MT}} / (a_{\mu} T_{\mu} k_{\text{ош}} k_{\text{M}}) = k_{\text{РШ}}$$

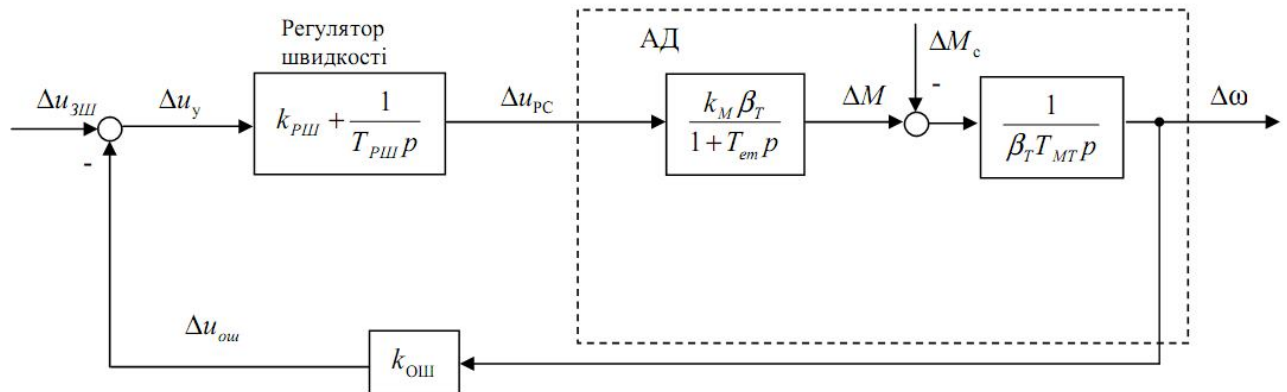


Рисунок 3.4 – Структурна схема системи ПЧ — АД
з частотно-струмовим керуванням

При такої настройці з пропорційним РШ для приводів малої і середньої потужності, а також у зв'язку з тим, що електромеханічна постійна часу АД при живленні від джерела струму помітно менше, ніж при живленні від джерела напруги, значення $k_{\text{РШ}}$ виходять невеликими. У результаті результуюча жорсткість механічної характеристики приводу в замкнутій системі невисока. Вища точність реалізується при настроюванні приводу на симетричний оптимум з ПІ-регулятором швидкості. При цьому постійна часу інтегрування і коефіцієнт передачі пропорційній частині регулятора РШ визначаються так:

$$T_{\text{РШ}} = 2a_{\mu}T_{\mu}/k_{\text{РШ}}; k_{\text{РШ}} = T_{\text{MT}}/(a_{\mu}T_{\mu}k_{\text{ош}}k_{\text{M}}).$$

Механічні характеристики електроприводу по схемі, показаній на рисунок 3.3, подібні до характеристик електроприводу постійного струму з двоконтурною системою підлеглого регулювання струму і швидкості.

3.2 Побудова перехідних процесів системи

Для аналізу динаміки будемо використовувати структурну лінеаризовану структурну схему, представлену на рисунок 3.4.

В базовому варіанті електроприводу використовується двигун серії 4A112M4УЗ, який має наступні характеристики [7]:

Номинальна потужність..... $P_{\text{ном}} = 7,5 \text{ кВт}$

Синхронна частота обертання: $n = 1000 \text{ об/хв}$

Номинальне ковзання: $s_{\text{ном}} = 0,036$

Критичне ковзання: $s_k = 0,25$

Відношення критичного моменту

до номінального: $m_k = 2,2$

Момент інерції валу двигуна: $J_{\text{дв}} = 0,017 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$

Приведений до валу двигуна момент

інерції механізму: $J_{\text{мех}} = 0,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$

Параметри схеми заміщення двигуна (в.о.):

$$X_{\mu\text{н}} := 2.8 \quad R'_2 := 0.041 \quad X'_{2\text{н}} := 0.013$$

ККД двигуна: $\eta = 0,855$

Косинус φ : $\cos \varphi = 0.85$

Розрахуємо значення коефіцієнтів структурної схеми.

Номинальний струм однієї фази двигуна:

$$I_1 := \frac{P_{\text{ном}}}{3 \cdot U_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \quad I_1 = 11.467 \text{ А}$$

Номинальна частота холостого ходу обертання двигуна:

$$\omega_{0\text{ном}} := n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \quad \omega_{0\text{ном}} = 157.08 \text{ с}^{-1}$$

Номинальна частота обертання двигуна:

$$\omega_{\text{ном}} := (1 - s_{\text{ном}}) \cdot \omega_{0\text{ном}} \quad \omega_{\text{ном}} = 151.425 \text{ с}^{-1}$$

Номинальний момент на валу АД:

$$M_{\text{ном}} := 9.570 \frac{P_{\text{ном}}}{n \cdot (1 - s_{\text{ном}})} \quad M_{\text{ном}} = 36.4 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Критичний момент на валу АД:

$$M_K := m_k \cdot M_{\text{НОМ}} \quad M_K = 80.081 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Критичне ковзання при живленні двигуна від джерела струму:

$$s_{\text{КТ}} := \frac{R'_2}{X_{\mu\text{Н}} + X'_{2\text{Н}}} \quad s_{\text{КТ}} = 0.015$$

Критичний момент на валу АД при живленні двигуна від джерела струму:

$$M_{\text{КТ}} := \frac{3 \cdot I_1^2 \cdot X_{\mu\text{Н}}^2}{2 \cdot \omega_{0\text{НОМ}} \cdot (X_{\mu\text{Н}} + X'_{2\text{Н}})} \quad M_{\text{КТ}} = 3.499 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики АД при живленні двигуна від джерела струму:

$$\beta_T := \frac{2 \cdot M_{\text{КТ}}}{\omega_{0\text{НОМ}} \cdot s_{\text{КТ}}} \quad \beta_T = 3.057 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$$

Еквівалентна електромагнітна постійна часу ланцюгів статора і ротора АД при живленні двигуна від джерела струму:

$$T_{\text{ЕТ}} := \frac{1}{\omega_{0\text{ЭЛ.НОМ}} \cdot s_{\text{КТ}}} \quad T_{\text{ЕТ}} = 0.218502 \text{ с}$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості:

$$k_{0.\text{ш}} = u_{3.\text{ш.НОМ}} / \omega_{\text{НОМ}} = 1/151.43 = 0.0066 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

Механічна постійна часу двигуна:

$$T_{\text{МТ}} = (J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}}) / \beta_T = (0.017 + 0.2) / 3.057 = 0.077 \text{ с}.$$

Додаткові постійні часу:

$$k_M := \frac{2 \cdot \pi \cdot k_f}{p_{\text{П}}} \cdot k_{3\text{Ч}} \cdot k_{\text{ФЧК}} \quad k_M = 1.634$$

„де [3]: $k_{3\text{Ч}}=0.8$; $k_{\text{ФЧК}}=0.1$; $k_f=13$ – передавальні коефіцієнти пристроїв ЗЧ, ФЧК і ПЧС; $p_{\text{П}}=4$ – кількість пар полюсів двигуна.

Інтегральна постійна і коефіцієнт передачі пропорційної частини регулятора швидкості при настроюванні електроприводу на модульний оптимум:

$$k_{pш} := \frac{T_{MT}}{a_{\mu} \cdot T_{\mu} \cdot k_{ош} \cdot k_M} \quad k_{pш} = 7.528$$

$$T_{pш} := \frac{2 \cdot a_{\mu} \cdot T_{\mu}}{k_{pш}} \quad T_{pш} = 0.232c$$

,де [6]: $a_{\mu} = 4$; $T_{\mu} \approx T_{ет} = 0,22c$.

Знаючи всі параметри математичної моделі двигуна, а також системи керування зробимо її моделювання з метою оцінки показників якості керування.

Модель електроприводу для аналізу динаміки в середовищі MatLab приведена на рисунку 3.5.

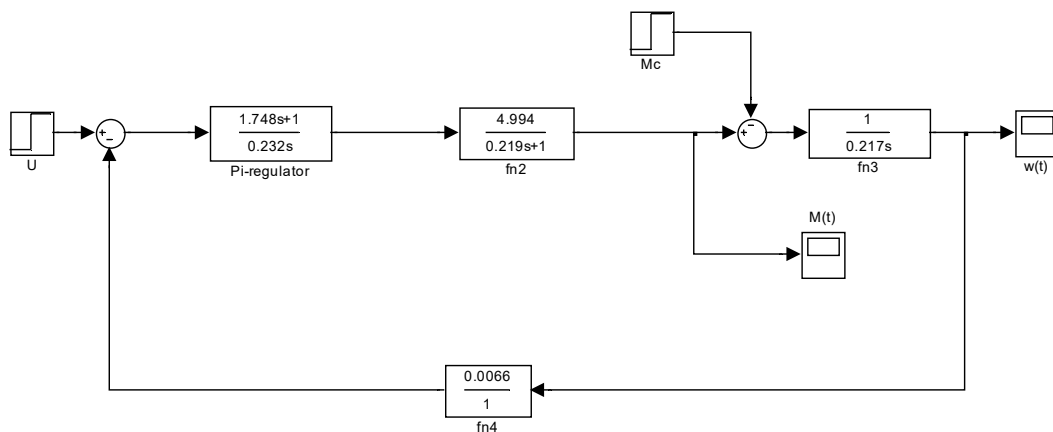


Рисунок 3.5 – Схема електроприводу при частотно-струмовому керуванні

За результатами дослідження отримані перехідні характеристики при пуску двигуна і стрибкоподібній зміні навантаження. Графіки перехідних процесів показані на рисунках 3.4 – 3.7.

З графіків рисунок 3.4 - 3.7 видно, що спроектована система здатна відпрацьовувати будь-які зміни при роботі привода і забезпечувати постійну швидкість обертання за весь період роботи механізму. З отриманих характеристик можна зробити висновок, що система забезпечує показники якості керування нічим не гірше, а по динаміці навіть краще, ніж існуюча система керування двигуном. Таким чином, можна робити заміну існуючої системи на спроектовану.

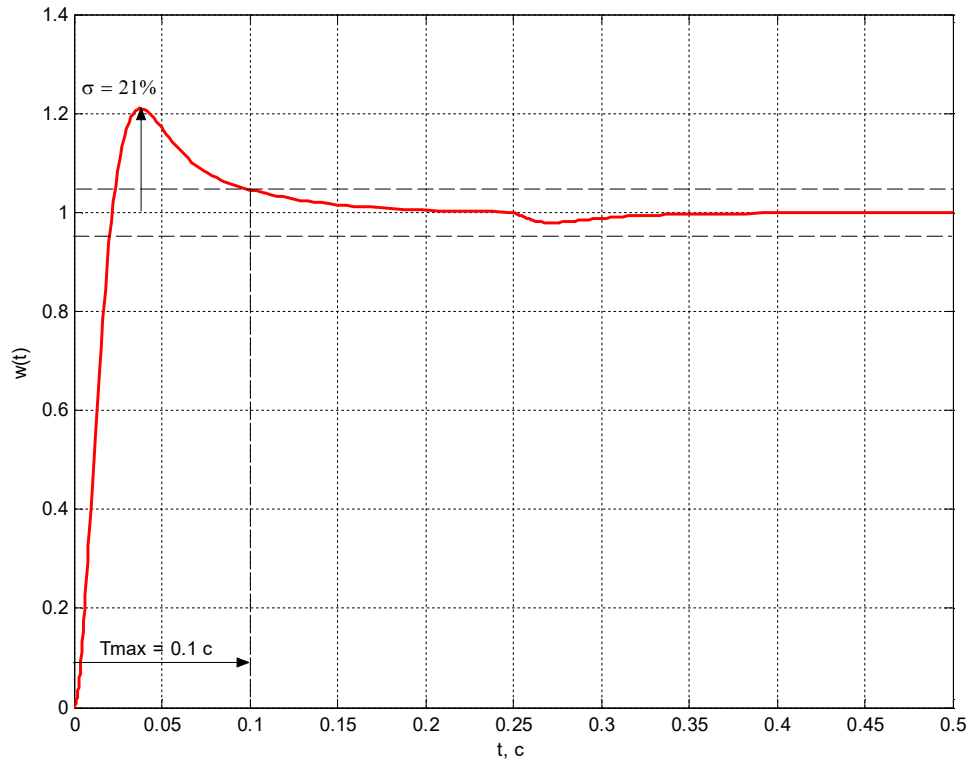


Рисунок 3.4 – Перехідний процес частоти обертання двигуна при стрибкоподібній зміні навантаження на 25% $M_{ном}$

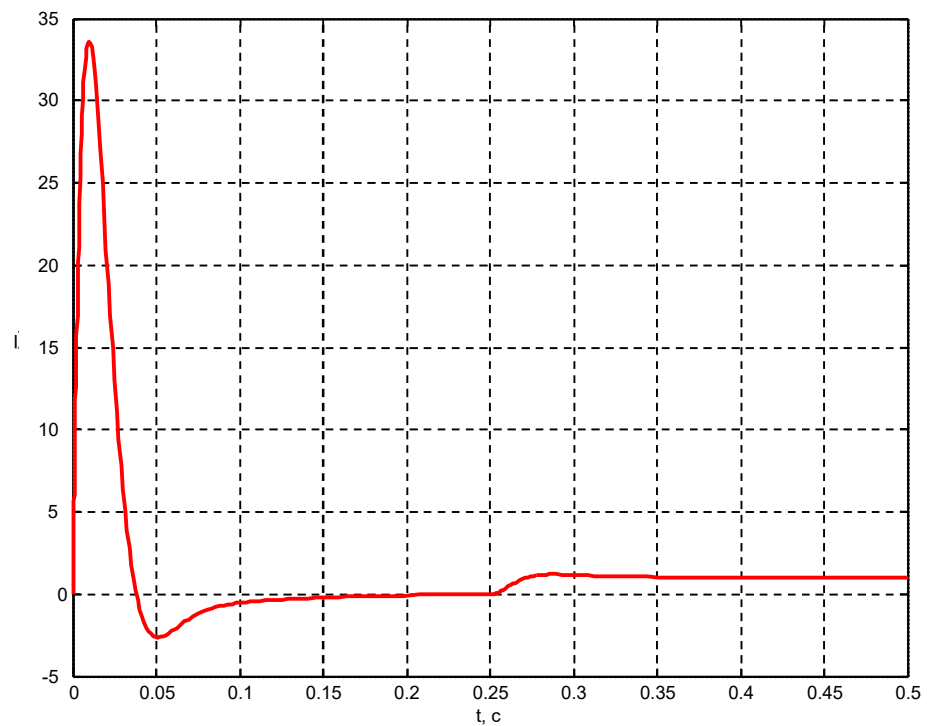


Рисунок 3.5 – Перехідний процес струму якоря при стрибкоподібній зміні навантаження на 25% $M_{ном}$

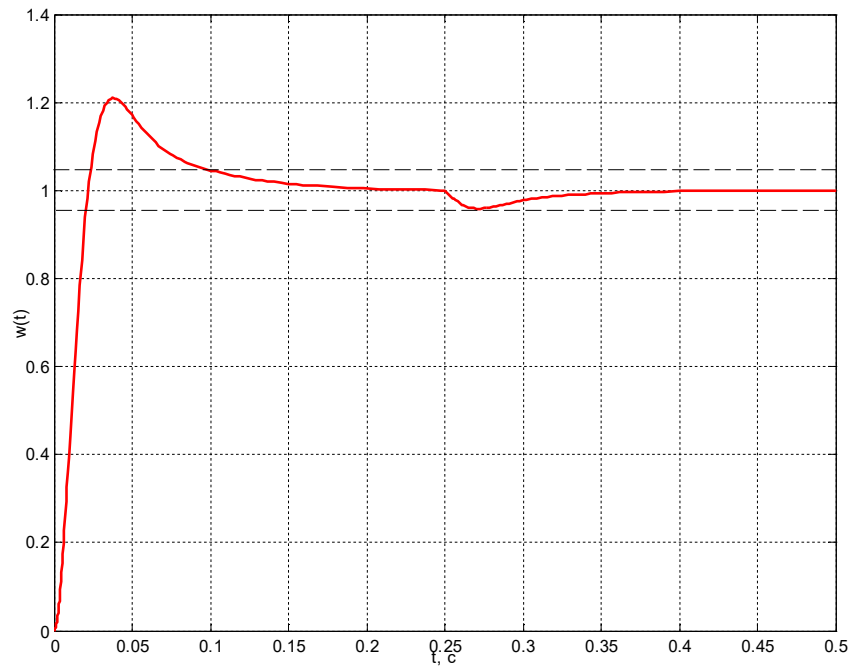


Рисунок 3.6 – Перехідний процес частоти обертання двигуна при стрибкоподібній зміні навантаження на 50% $M_{\text{НОМ}}$

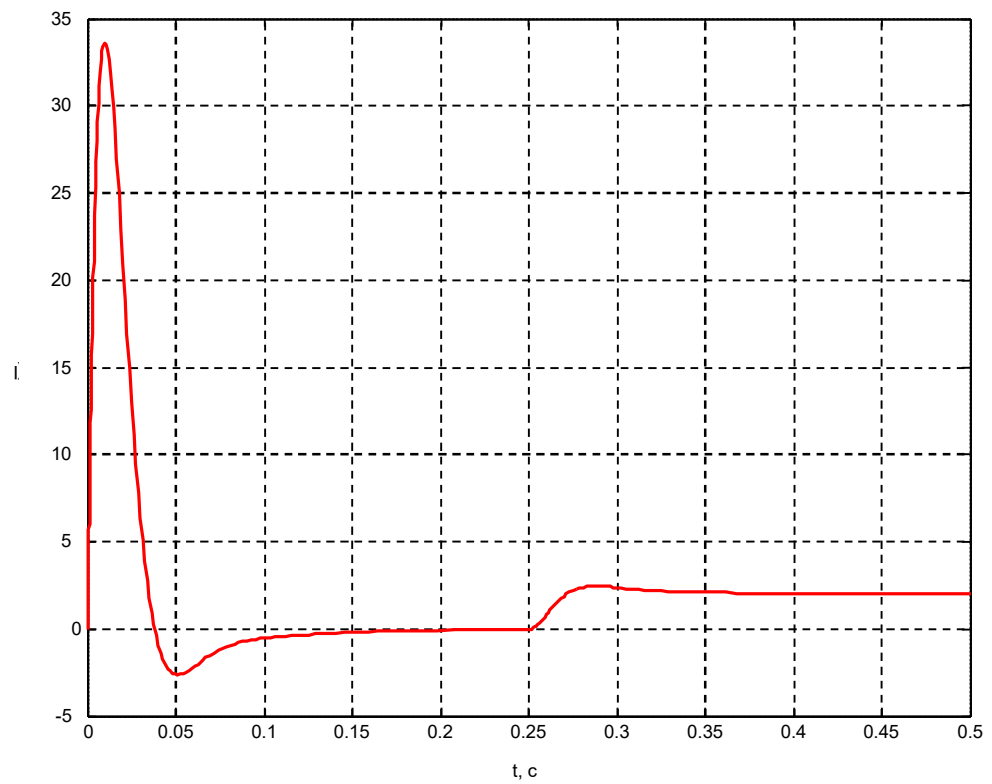


Рисунок 3.7 – Перехідний процес струму якоря при стрибкоподібній зміні навантаження на 50% $M_{\text{НОМ}}$

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці — це система правових, соціально-економічних, організаційно - технічних, санітарно — гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці. Державна політика в галузі охорони праці базується на принципах:

- пріоритету життя і здоров'я працівників відповідно до результатів виробничої діяльності підприємства і, повної відповідальності власника за створення безпечних і нешкідливих умов праці;

- комплексного розв'язання завдань охорони праці на основі національних програм з цих питань та з урахуванням інших напрямів економічної і соціальної політики, досягнень, в галузі науки і техніки та охорони навколишнього середовища;

- соціального захисту працівників, повного відшкодування шкоди особам, які потерпіли від нещасних випадків на виробництві і професійних захворювань;

- встановлення єдиних нормативів з охорони праці для всіх підприємств, незалежно від форм власності і видів їх діяльності;

- використання економічних методів управління охороною праці, проведення політики пільгового оподаткування, що сприяє створенню безпечних і нешкідливих умов праці, участі держави у фінансуванні заходів щодо охорони праці;

- здійснення навчання населення, професійної підготовки і підвищення кваліфікації працівників з питань охорони праці;

- забезпечення координації діяльності державних органів, установ, організацій та громадських об'єднань, що вирішують різні проблеми охорони здоров'я, гігієни та безпеки праці, а також співробітництва і проведення консультацій між власниками та працівниками (їх представниками), між усіма соціальними групами при прийнятті рішень з охорони праці на місцевому та державному рівнях;

- міжнародного співробітництва в галузі охорони праці, використання світового досвіду організацій роботи щодо поліпшення умов і підвищення безпеки праці.

Закон України "Про охорону праці", дія якого розповсюджується на всі підприємства, незалежно від форм власності і принципів господарювання, закріплює право громадян на охорону праці і здоров'я. В законодавстві відображені правила організації охорони праці на підприємствах, сказано про планування і фінансування заходів щодо охорони праці; правила техніки безпеки і виробничої санітарії; правила і норми по спеціальній охороні праці жінок, молоді і людей із зниженою працездатністю; правила, які регулюють діяльність державного нагляду і цивільного контролю у сфері охорони праці, а також правові норми, в яких передбачається відповідальність за порушення законодавства "Про охорону праці".

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів, які впливають на людину при виробництві

До шкідливих і небезпечних чинників відносяться ті чинники, вплив яких на працюючого в певних умовах приводить до захворювань, зниженню працездатності а також до травм або інших раптових погіршень здоров'я. Зведення до мінімуму вірогідності захворювань працюючого з одночасним забезпеченням комфорту при максимальній ефективності праці є першочерговим завданням охорони праці.

До основних небезпечних і шкідливих виробничих чинників при роботі в цеху відносять:

- забруднення повітря;
- шум на виробництві;
- дія виробничих вібрацій на людину;
- виробниче освітлення;
- небезпека поразки електричним струмом.

Негативний вплив пилу виробництва на людину визначається сумарним токсикологічним впливом пилу на різні органи. Найбільшому впливу пилу піддаються органи дихання, шкіра, очі, кров і травний тракт. При вдиханні пилу виникають пневмоконікози, пов'язані з відкладенням пилу в легенях і реакцією тканини на її присутність. Виробничий пил викликає захворювання очей і шкіри - розвиваються кон'юнктивіти, кератокон'юнктивіти й навіть опіки роговиці, що викликають втрату зору. Захворювання шкіри, викликувані контактом з пилом, проявляються у вигляді дерматитів, екзем, різних форм псоріазів, лікування яких займає багато років. Професійні шкірні захворювання часто ускладнюються вторинною інфекцією, що утрудняє їхню діагностику.

У певних обставинах високі рівні шумів можуть згубно позначатися на виконання людиною роботи. Шум приводить до розладу діяльності серця, печінки, до виснаження й перенапрути нервових кліток. Ослаблені клітки нервової системи не можуть досить чітко координувати роботу різних систем організму, звідси виникають порушення їхньої діяльності. Загалом, людина здатна нормально виконувати які-небудь прості, рутинні завдання навіть при таких високих рівнях шуму, як 130 – 140 дБ (робота стрижневого млина знаходиться у цих рамках). При більше високих рівнях шумів, однак, можуть відбуватися порушення в роботі рухового апарата й зору. Проблеми у виконанні складних завдань, особливо якщо необхідні погоджені дії, можуть виникати при рівнях шумів в 95 дБ і вище. А чітке виконання завдань, що вимагають високої точності й уважності, може бути проблематичним навіть при рівнях шумів 80 – 85 дБ. Переривчасті імпульсні шуми є більшою мірою дезорганізуючими, чим постійні шуми. Шуми дратують у меншому ступені, якщо людина здатна контролювати походження шумів.

Вібрація погіршує зорове сприйняття, знижує якість уваги, викликає стомлення, головний біль. Вібрація може прямим шляхом заважати виконанню робочих операцій або побічно негативно впливати на працездатність людини.

Розладу рухової функції, що виникають під впливом вібрації, обумовлені як порушеннями регуляторних впливів центральної нервової системи, так і

безпосередньою поразкою м'язів. Доведено, що спрямованість судинних порушень визначається, у першу чергу, параметрами вібрації, що впливає.

Погане загальне та робоче освітлення погіршує роботу робітників на підприємстві. За таких умов погано проходить візуальний аналіз стану обладнання та його роботи, робітник не зможе швидко зорієнтуватися. Контрастність об'єктів в цеху повинна бути до $> 0,5$. У даному приміщенні, де розташований стрижневий млин, природне освітлення задовольняє усім нормам, але млин працює тільки у темний час доби, тобто штучне освітлення усіх приміщень цеху дуже потрібне: робоче, аварійне, евакуаційне, охоронне, чергове.

Електродвигун встановлений у вологому приміщенні, що відноситься до небезпечних з погляду поразки електричним струмом. Тому велику увагу треба приділити електробезпеці.

Розглянемо дію електричного струму на людину. Проходячи через організм струм надає термічну (опіки окремих ділянок тіла, нагрів судин, нервів), електролітичну (розкладання крові і інших органічних рідин) і біологічну (роздратування і збудження живих тканин організму) дії. Це різноманіття дій електричного струму нерідко приводить до різних травм, які умовно можна звести до двох видів:

- місцеві електричні травми: електричні опіки, електричні знаки, металізація шкіри і електроофтальмія;
- електричний удар – збудження живих тканин організму через котрі проходить електричний струм.

Для забезпечення електробезпеки роботи в цеху необхідно передбачити захисне заземлення – навмисне електричне з'єднання із землею або її еквівалентом металевих частин (через котрі не йде струм) електрообладнання, яке може бути під напругою.

4.2 Заходи щодо техніки безпеки

Для забезпечення нормальної експлуатації свердлильного верстата з ЧПК необхідно виконати наступні міри безпеки:

1. Пасова передача привода головного руху закривається запобіжними кожухами.

2. Зона обробки має рухливе огороження (з листової сталі), що має оглядове вікно з прозорого матеріалу. Верстат оснащений блокуванням, що допускає включення обертання шпинделя тільки в закритому положенні рухливого огороження.

3. Час гальмування шпинделя (після його вимикання при будь-якій частоті обертання) не повинне перевищувати 5 секунд.

4. Органи керування захисними механізованими пристроями мають блокування, що виключає можливість уведення їхній у дію при включеному приводі головного руху.

5. Рукоятки й інші органи керування верстатів постачені надійними фіксаторами, що не допускають мимовільних переміщень органів керування.

6. Вступні вимикачі постачені показником у виді миготливого індикаторного пристрою, що показує стан його контактів.

7. На верстатах мається кнопка “Стоп” (аварійна) із грибоподібним штовхальником збільшеного розміру, установлена на панелі, закріпленої на каретці верстата.

8. На верстатах застосований перемикач “Стоп-подачі” і “Стоп-шпинделя”, що дає можливість операторові при необхідності послідовно зупинити подачу й обертання шпинделя без відключення верстата.

9. Виконати заземлення.

10. Двері електрошафів верстата замкнути спеціальними замками.

Заходи по техніці безпеки.

Поразка людини електричним струмом - результат замикання електричного ланцюга через тіло людини. У зв'язку з великою насиченістю лабораторії автоматики електроустаткуванням, електробезпечність повинна бути забезпечена в першу чергу.

Це досягається наступними заходами:

– напруга на імпульсному генераторі до 2 кВт;

- напруга в мережі обрано 380 В;
- електроустаткування проектується таким чином, щоб цілком виключити можливість зіткнення людини зі струмоведучими частинами;
- все електроустаткування і металеві обгортки кабелів ретельно заземлюються, що забезпечує захист від поразки електричним струмом при порушенні ізоляції, а також є захистом від статичних розрядів;
- для живлення приладу обрана напруга 5В и 12В;
- наявність ізолюючих гумових рукавиць і ручного ізольованого інструмента в обслуговуючого персоналу,

Надійна ізоляція струмоведучих частин - основний технічний фактор у захисті людини від поразки електричним струмом. Опір ізоляції для силової мережі повинний бути не менш 1 МОм, мережі висвітлення 0.5 МОм, мережі слабого струму 0.2 МОм.

Мінімальні рівні шуму регламентуються ДСТ. Рівень шуму згідно ДСТ 12.1.003 - 83 повинний бути не більш 80дБ. З метою зниження шуму в лабораторіях застосовують звукоізоляційні матеріали і звуковбирні покриття.

Рівні вібрації регламентуються ДСТ 12.1. 012 - 78. Вони нормують параметри вібрації, що діють на організм людини. Боротьба з вібрацією невіддільна від боротьби із шумом і є аналогічною їй.

У цеху застосовуються світильники денного висвітлення. При штучному світлі застосовується система комбінованого висвітлення, при якій загальне висвітлення при необхідності доповнюється місцевим.

По санітарних нормах СніП 2-4-79 найменша освітленість у цеху повинна бути не менш 300 Лк на висоті одного метра від статі.

У цеху існує також небезпека виникнення пожежі через високу потужність електроустаткування, можливість коротких замикань. Застосування захисних відключень на струми короткого замикання знижує імовірність виникнення пожежі при аварії електроустаткування.

Вимоги до обслуговуючого персоналу.

1. До роботи з програмування, навчання, налагодження, експлуатації верстата допускаються особи не молодше 18 років, що пройшли медичний огляд і спеціальне навчання по безпечному обслуговуванню верстата зі здачею іспиту.
2. Перед початком роботи повинен бути зроблений спробний цикл роботи верстата на холостому ході.
3. Перед початком роботи повинна бути зроблена тестова перевірка функціонування верстата з ЧПК.
4. Обслуговуючому персоналові забороняється знаходитися в зоні обробки без захисного огороження.
5. Неполадки, аварійні ситуації, що виникли в процесі експлуатації верстата повинні реєструватися оператором або наладчиком.
6. Контроль за дією операторів з дотриманням ними вимог безпеки повинен здійснюватися службою безпеки підприємства.
7. Перш ніж приступити до монтажних і ремонтних робіт, необхідно відключити напругу.
8. Забороняється виконувати роботи по приєднанню і від'єднанню пристроїв без зняття живлення з верстата в групі.

ВИСНОВОК

Основне завдання кваліфікаційної роботи – дослідження та модернізація електропривода подач карусельного верстата.

У відповідності до мети дипломної роботи була проведена наступна робота.

Проведений опис карусельного верстату з ЧПК.

Проведено вибір системи автоматичного керування за способом керування, а також розрахунок параметрів електропривода. Розроблена математична модель системи керування швидкістю електроприводу, розроблена структурна схема та отримані перехідні характеристики.

Проведений аналіз використаного комплектного електропривода «Размер-2М», проведений аналіз його динамічних характеристик, який показав доцільність використання отриманої системи керування.

Використання такої системи автоматичного керування дозволяє:

1. безступінчасте регулювання швидкістю обертання;
2. спрощення механічної частини верстата;
3. підвищення точності обробки деталей;
4. підвищення продуктивності верстата.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Баховець Б. О. Автоматизований електропривод : навч. посібник : у 2 ч. – Рівне : НУВГП, 2010.
2. Radzevich S. P. Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture / Ed. by Stephen P. Radzevich. – 4th Edition. – Boca Raton : CRC Press, 2021. – 1170 p. – ISBN 978-0-367-64902-9.
3. Chapman S. J. Electric Machinery Fundamentals. – 5th Edition. – New York : McGraw-Hill, 2012. – 680 p. – ISBN 978-0-07-352954-7.
4. Sahdev S. K. Electrical Machines. – Cambridge : Cambridge University Press, 2018. – 974 p. – ISBN 978-1-108-43106-4.
5. Лавріненко Ю. М., Марченко О. С., Савченко П. І., Синявський О. Ю., Войтюк Д. Г., Лисенко В. П. Електропривод : підручник / за ред. Ю. М. Лавріненка. – К. : Ліра-К, 2009. – 504 с. – ISBN 978-966-96938-8-4.
6. Toliyat H. A., Kliman G. B. (Eds.). Handbook of Electric Motors. – 2nd Edition. – Boca Raton : CRC Press, 2004. – 832 p. – ISBN 978-0-8247-4105-1.
7. Umans S. D. Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery. – 7th Edition. – New York : McGraw-Hill, 2014. – 721 p. – ISBN 978-0-07-338046-9.
8. Белікова Л. Я., Шевченко В. П. Електричні машини : навч. посібник для студ. вищ. навч. закладів. – О. : Наука і техніка, 2012. – 480 с. – ISBN 978-966-1552-11-0.
9. Ткачук К. Н., Халімовський М. О., Зацарний В. В., Зеркалов Д. В. та ін. Основи охорони праці : підручник / за ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. – 2-ге вид., доп. та перероб. – К. : Основа, 2006. – 448 с.
10. Asanbayev V. Asynchronous Machines: Basic Calculation Elements from Field Equations. – Cham : Springer, 2022. – 452 p. – ISBN 978-3-030-92283-2.
11. McGuire P. M. Conveyors: Application, Selection, and Integration. – 2nd Edition. – Boca Raton : CRC Press, 2024. – 238 p. – ISBN 978-1-032-45118-3.
12. Теплоухов Б. П. Зброя масового ураження та захист від неї : навчальний посібник. – К. : Видавничий дім «СКІФ», 2023. – 101 с. – ISBN 978-966-570-846-9.

ДОДАТОК А

Мультимедійна презентація

Кінематична схема верстата

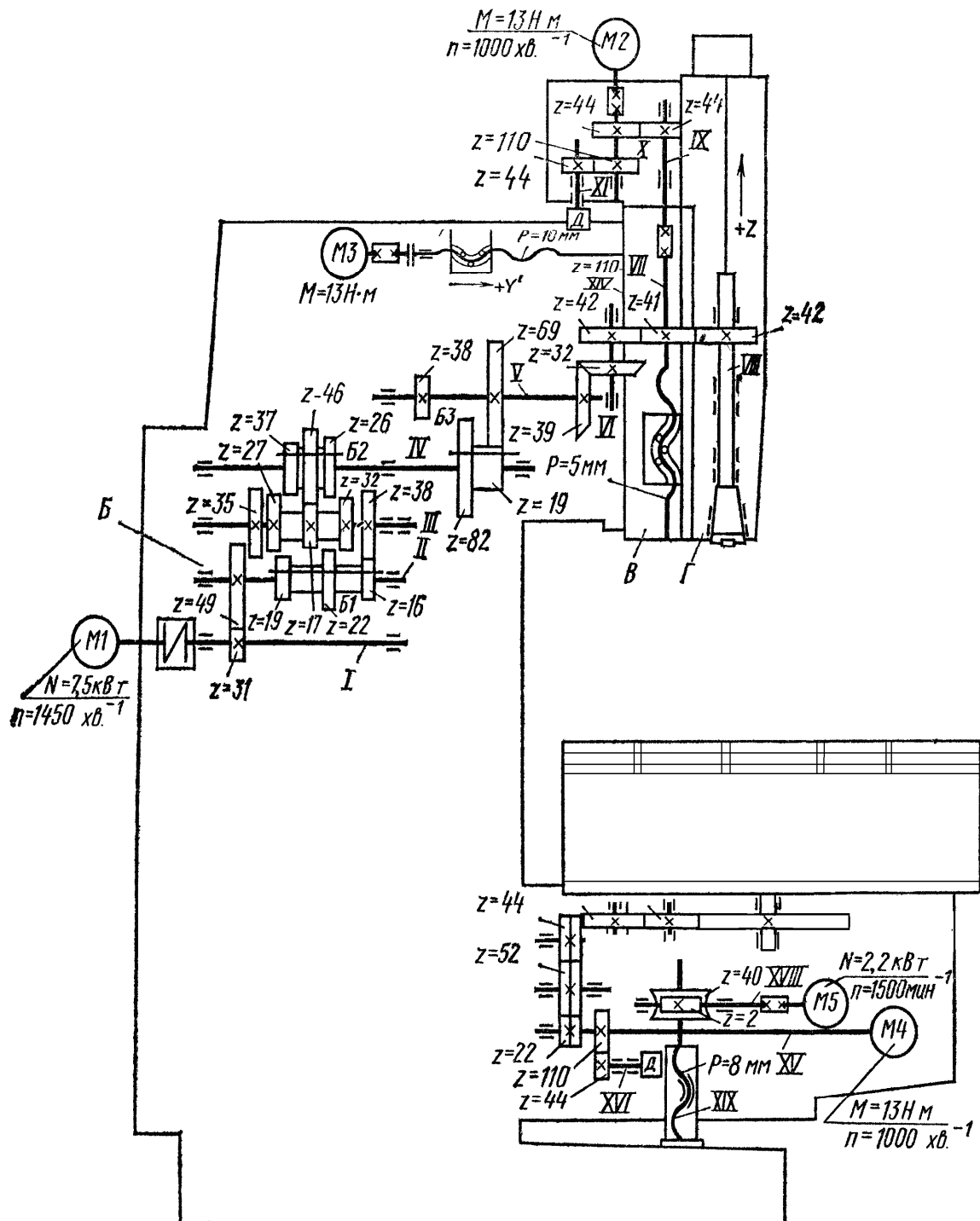


Рисунок А.1 – Слайд 1 мультимедійної презентації

Існуюча схема керування карусельним верстатом

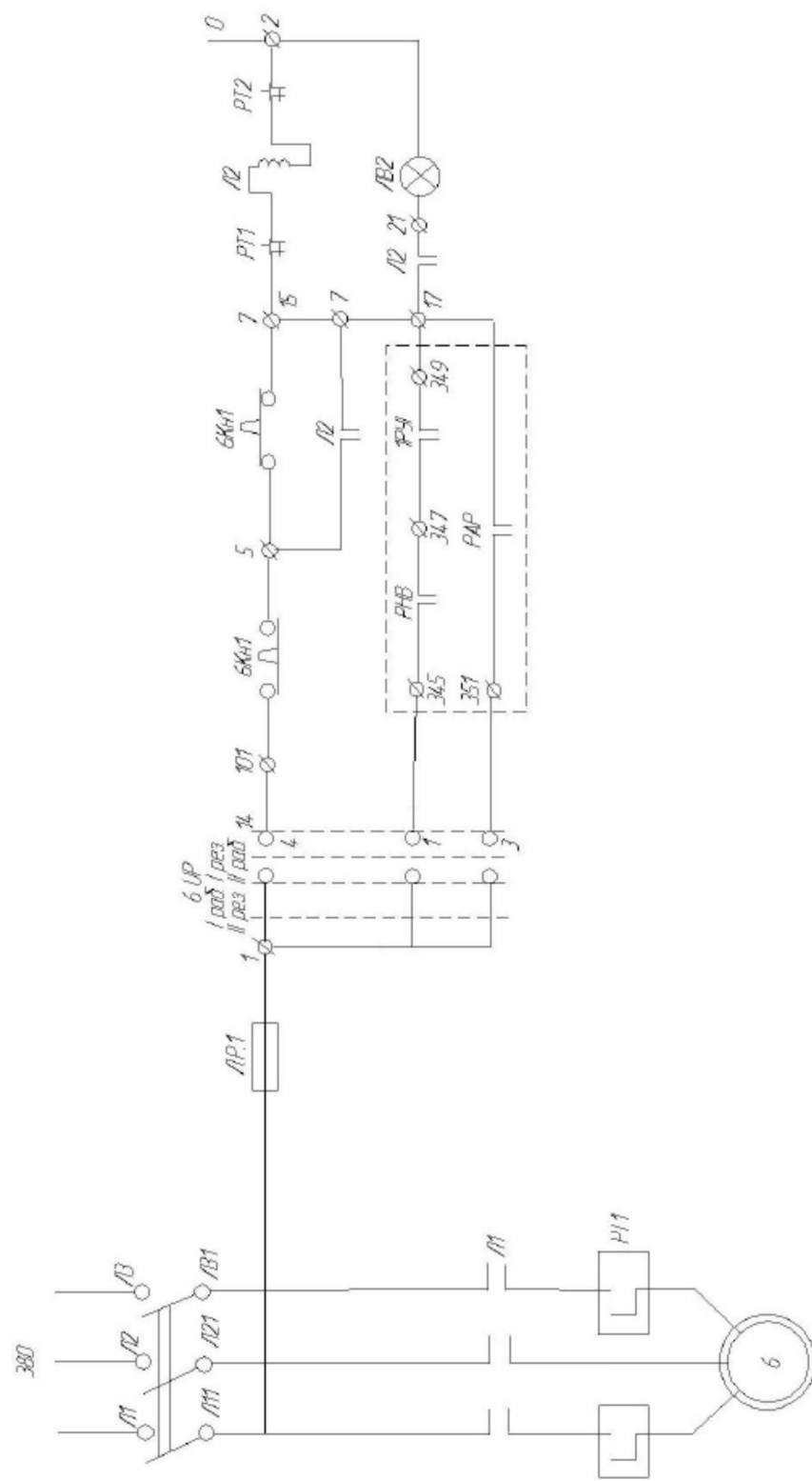


Рисунок А.2 – Слайд 2 мультимедійної презентації

Функциональная схема электропривода при частотно-струмовому керуванні

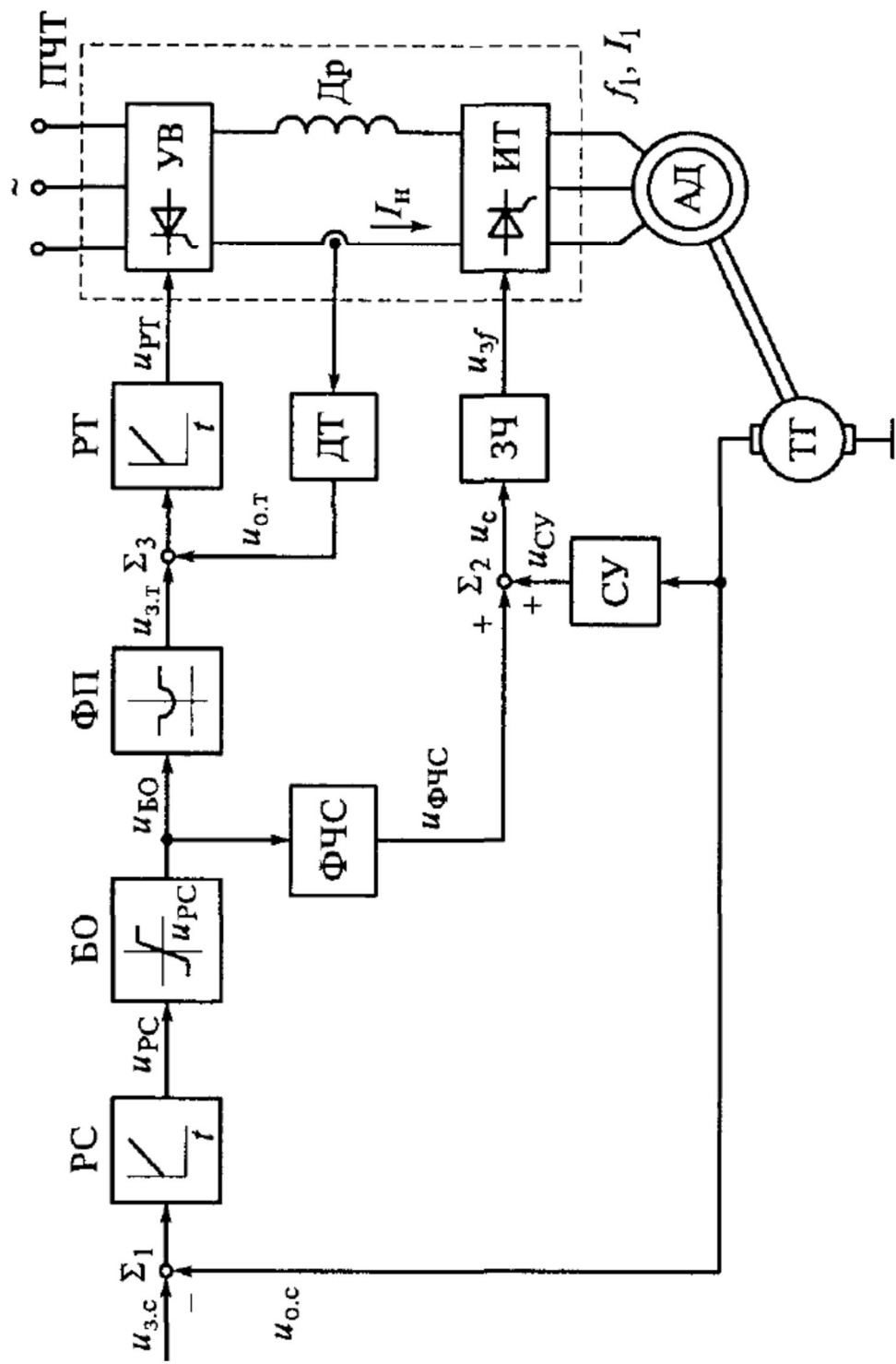


Рисунок А.3 – Слайд 3 мультимедійної презентації

Структурна схема асинхронного электропривода при частотно-струмовому керуванні

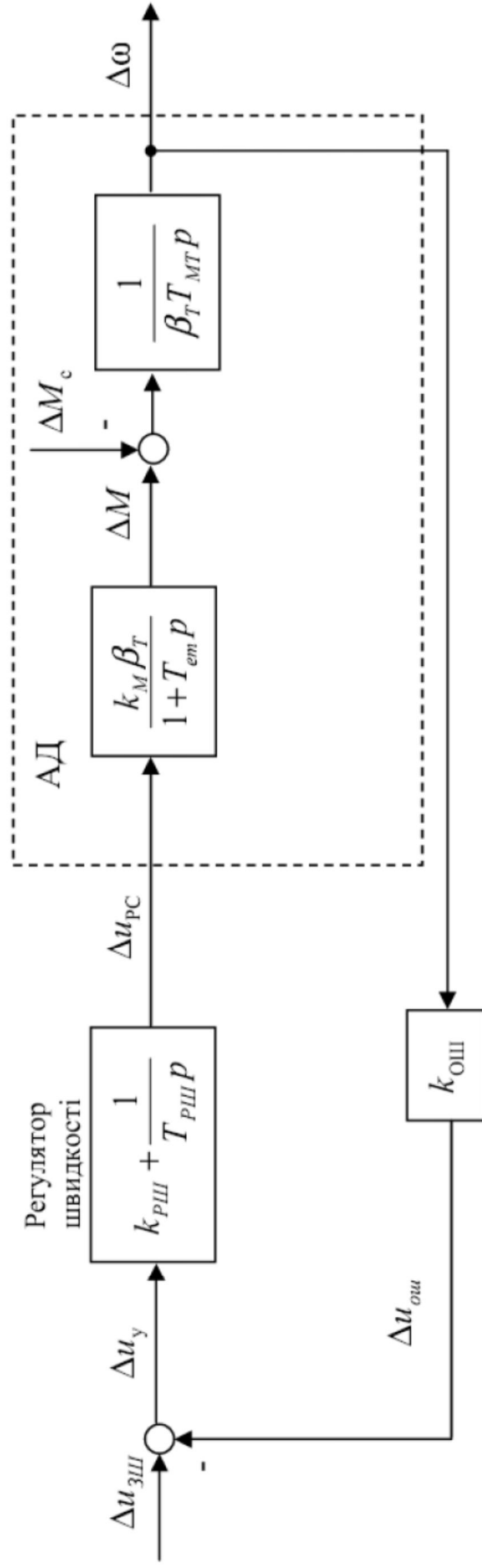
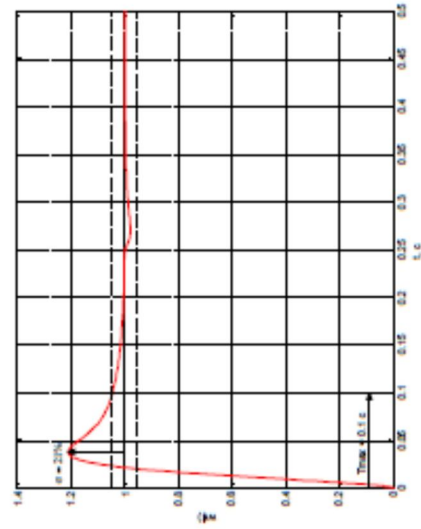


Рисунок А.4 – Слайд 4 мультимедійної презентації

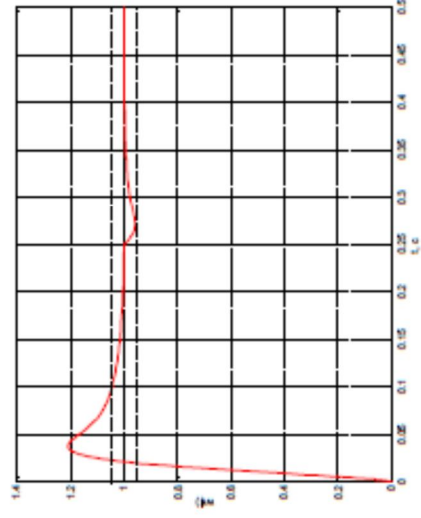
Графіки перехідних процесів приводу подач карусельного верстата

Стрибокподібна зміна навантаження на 25% $M_{ном}$

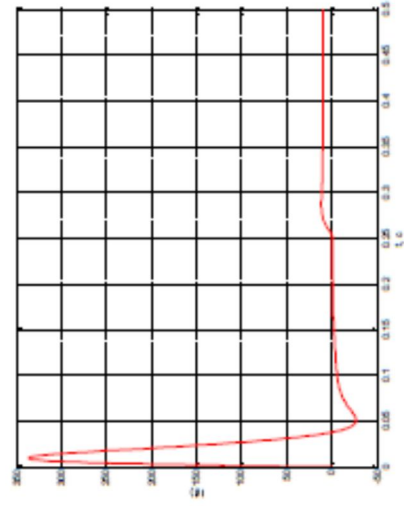


Перехідний процес частоти обертання

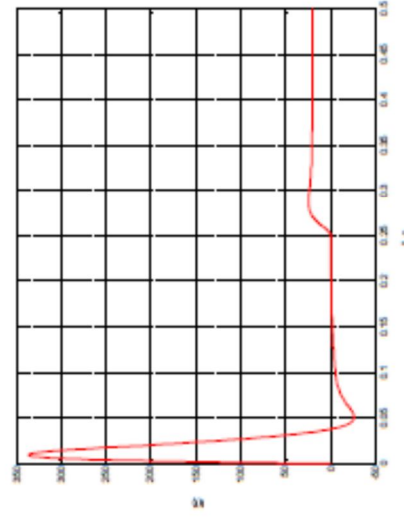
Стрибокподібна зміна навантаження на 50% $M_{ном}$



Перехідний процес частоти обертання



Перехідний процес струму якоря



Перехідний процес струму якоря

Рисунок А.5 – Слайд 5 мультимедійної презентації