

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
кафедра автоматики

«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри

«__» _____ 2026 р.

Кваліфікаційна робота

на здобуття рівня вищої освіти
бакалавр

на тему Модернізація системи керування
електроприводом конвеєру

Виконав: студент 4317ст3 групи

(підпис) **Сергій КУРОВ**

Керівник роботи:

(посада, науковий ступінь, вчене звання) **К.Т.Н., доцент, зав. каф. автоматики**
Іван БІЛЮК

(підпис)

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

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

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

«__» _____ 2026 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття рівня вищої освіти бакалавр**

Студенту Курову Сергію Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема кваліфікаційної роботи Модернізація системи керування
електроприводом
конвеєра

Керівник кваліфікаційної роботи Білюк І. С., к.т.н., доент., зав. каф.
автоматики

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «__» _____ 2026 року №__

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи 09 червня 2026 р.

3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи _____

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

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

Електронна презентація

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання на кваліфікаційну роботу «15» вересня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Видача завдання на КР	15.09.2025 р.	
2	Рубіжний контроль. Чернові варіанти розділів та розширеного змісту ПЗ	10.02.2026 р.	
3	Рубіжний контроль. Готовий розширений зміст ПЗ, спецрозділів, 1-3 розділи ПЗ. Розрахунки.	27.03.2026 р.	
4	Рубіжний контроль. Чернетка повної пояснювальної записки, презентації та доповіді.	08.05.2026 р.	
5	Кафедральний захист. Готова, зшита ПЗ, підписана студентом, керівником. Готова презентація та доповідь укр. мовою.	05.06.2026 р.	
6	Подання документів на захист.	09.06.2026 р.	
7	Захист кваліфікаційної роботи	15.06–27.06. 2026 р.	

Здобувач

(підпис)

Сергій КУРОВ

(прізвище та ініціали)

Керівник
кваліфікаційної роботи

(підпис)

Іван БІЛЮК

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1. Загальні відомості про механізм та вимоги до електроприводу.....	9
1.1 Загальні відомості про конвеєри.....	9
1.1.1. Стрічковий конвеєр.....	9
1.1.2 Ланцюгові конвеєри.....	15
1.1.3 Пластинчасті конвеєри.....	16
1.1.4 Скребкові конвеєри.....	18
1.2 Перевантажувач мінеральних добрив.....	19
2. Аналіз автоматизованого електропривода.....	23
2.1 Аналіз процесу конвеєрного транспорту як об'єкта автоматизації.....	23
2.2 Області застосування частотних перетворювачів.....	29
2.3 Вибір перетворювача частоти.....	30
2.4. Опис перетворювача Micromaster 420.....	31
2.5. Аксесуари до перетворювача.....	37
2.5.1. Фільтри електромагнітної сумісності.....	37
2.5.2. Панель оператора (BOP).....	38
2.5.3. Програми запуску в експлуатацію.....	39
3. Розробка математичної моделі електроприводу конвеєра.....	40
3.1 Побудова математичної моделі асинхронного двигуна при керуванні частотою й напругою статора.....	41
3.2 Розробка структурної схеми системи керування електроприводом конвеєру.....	51
4. Аналіз динамічних властивостей електроприводу конвеєра.....	60
5. Охорона праці.....	68
5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників, що впливають на людину для установки з автоматизованим електроприводом.....	68
5.2. Розрахунок захисного заземлення для електроустановки з	

автоматизованим електроприводом.....	71
5.3 Розробка заходів по забезпеченню безпечної експлуатації електроустановок.....	74
5.4 Заходи безпеки при роботі з мінеральними добривами.....	76
Висновки.....	79
Список використаної літератури	88

АНОТАЦІЯ

Метою кваліфікаційної роботи є розробка системи керування електроприводом перевантажувача мінеральних добрив.

Розглянуті особливості роботи перевантажувача мінеральних добрив, виконано розрахунок потужності електропривода, здатного забезпечити необхідні технологічні показники установки.

У роботі проведено синтез системи автоматичного керування, а також розрахунок параметрів електропривода. Для керування асинхронним двигуном було обрано частотний перетворювач MICROMASTER 420. Розроблена математична модель системи керування швидкістю електроприводу. Досліджено динаміку розробленої системи керування.

Для забезпечення безпеки й зручності роботи персоналу були розглянуті такі питання охорони праці, як електробезпечність виробничого приміщення.

Ключові слова: система керування, конвеєр, електропривод, математична модель, динамічні властивості.

ABSTRACT

The purpose of the qualification work is to develop a control system for the electric drive of the mineral fertilizer reloader. Features of work of the loader of mineral fertilizers are considered, calculation of power of the electric drive capable to provide necessary technological indicators of installation is executed.

The synthesis of the automatic control system, as well as the calculation of the parameters of the electric drive are carried out in the work. The MICROMASTER 420 frequency converter was chosen to control the induction motor. A mathematical model of the electric drive speed control system was developed. The dynamics of the developed control system is investigated.

To ensure the safety and convenience of staff, such issues of labor protection as electrical safety of the production premises were considered.

Keywords: control system, conveyor, electric drive, mathematical model, dynamic properties.

ВСТУП

Автоматизований електропривод є електромеханічною системою, електрична і механічна частини якої знаходяться в постійній взаємодії. Окремі елементи електропривода являють собою різноманітні перетворювачі енергії (механічні, електричні, електромеханічні, напівпровідникові), а також різноманітні накопичувачі механічної, електричної, електромагнітної і теплової енергії, зв'язані між собою механічними, електричними або магнітними зв'язками. При сталих процесах відбувається безупинне рівномірне перетворення енергії і передача її від одного перетворювача до іншого. При цьому вихідна напруга перетворювача, струм, момент та швидкість обертання двигуна, температура обмоток, тобто всі координати електроприводу є постійними, або сталими. Напрямок перетворення енергії залежить від режиму електроприводу. В режимі двигуна відбувається перетворення електричної енергії мережі в механічну енергію на валу двигуна або механізму, тобто виконується робота по подоланню сил і моментів опору. Вважаємо, що в цьому режимі робота та, відповідно, потужність двигуна мають позитивні знаки. Сили і моменти можна розглядати як керуючі впливи, наприклад, момент двигуна або збурюючі впливи, як, наприклад, момент механізму. В режимі гальмування відбувається перетворення енергії в протилежному напрямі: відбирання механічної енергії від механізму і перетворення її в електричну енергію. Двигун в цьому режимі працює як генератор електричної енергії, а його роботу та потужність умовно позначають негативним знаком. В деяких випадках, наприклад при імпульсних способах керування, струми, напруги та швидкості мають постійні коливання біля сталої середньої величини. Такі режими умовно вважають сталими і вони отримали назву квазісталих режимів. В динамічних або перехідних процесах це перетворення відбувається при зміні координат на певному відрізку часу, коли, крім роботи по подоланню сил і моментів опору, накопичувачі енергії акумулюють або віддають свою енергію або обмінюються нею. Після закінчення

перехідного процесу електропривод знов починає працювати в сталому режимі, але вже при інших значеннях координат. При вивченні механіки електроприводу враховується зміна лише механічної енергії, що перетворюється або накопичується в механічних частинах електродвигуна, передавального пристрою і робочої машини. Отже, механіка електропривода вивчає взаємодії сил і моментів, що діють в електроприводі в сталих та перехідних процесах.

У теперішній час автоматизований електропривод є основою комплексної механізації та автоматизації промислових процесів. Автоматизація дозволяє звільнити значну кількість обслуговуючого персоналу від постійних чергувань, під час яких у деяких випадках за зміну відбувається усього декілька переключень. Введення автоматичного контролю сприяє покращенню якості обслуговування основного технологічного процесу.

На підприємствах останній час з'явилась тенденція модернізації систем управління старого обладнання. Системи управління застаріли, а механічні частини обладнання залишаються на достатнім рівні. Нове обладнання коштує дуже дорого, а модернізація старого є єдиним виходом в цієї ситуації.

В дипломному проекті розглядається питання заміни старої системи керування електроприводом механізму дозування мінеральних добрив новою. В даному випадку залишаються механічні частини дозатора і проводиться заміна системи керування електроприводу більш сучасно. Сучасна електронна промисловість має великий потенціал нових розробок в галузі автоматизованих систем керування електроприводами. При уніфікації створення автоматизованих систем останній час отримало перевагу створення комплектних автоматизованих приводів. Тим самим підвищуються показники технологічного обладнання. З'являються нові можливості з'єднання чи керування дозатора за допомогою ЕОМ.

Для виконання даної модернізації з початку проводиться аналіз старої системи керування. Потім на підставі зробленого аналізу з'ясовуються початкові данні для проектування. Проводиться аналіз сучасних систем керування з

урахуванням отриманих початкових даних. Обравши нову систему керування, проводиться аналіз обраної САК на відповідність умовам роботи обладнання.

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО МЕХАНІЗМ ТА ВИМОГИ ДО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

1.1 Загальні відомості про конвеєри

Конвеєр – машина безперервної дії, призначена для транспортування насипних і мінеральних (штучних) вантажів – корисної копалини, породи, закладальних матеріалів і інших.

Основні типи конвеєрів: гвинтові, роликові, гравітаційні, стрічкові, стрічково-канатні, стрічково-ланцюгові, скребкові, вібраційні, пластинчасті та ін. До конвеєрів належать також елеватори та ескалатори.

Основні елементи конвеєра: тяговий, вантажний або тягово-вантажний органи; опорні і направляючі елементи; конвеєрний постав, привод

Найбільш поширеними механізмами безперервного транспорту є конвеєри різних типів, конструкція яких визначається головним чином характером переміщуваних вантажів, вагою і швидкістю їх руху. Сипкі вантажі переміщуються стрічковими конвеєрами, штучні – пластинчастими, роликовими і підвісними. Серед конвеєрів промислових підприємств частіше за інших можна зустріти стрічкові і підвісні ланцюгові конвеєри: перші – на металургійних заводах, гірських розробках, паливоподачах електростанцій, в будівельній і харчовій промисловості, другі – на машинобудівних заводах, а також в хімічних, фарбувальних і інших цехах.

1.1.1. Стрічковий конвеєр.

Стрічковий конвеєр – транспортуючий пристрій безперервної дії з робочим органом у вигляді стрічки.

Конвеєри класифікуються за наступними ознаками:

- за призначенням – загального призначення, що застосовуються на поверхні шахт, збагачувальних фабриках і т.п.; підземні; для відкритих робіт;

- спеціальні* (для навантажувальних машин, магістральні конвеєри й ін.);
- за видом вантажів — для звичайних сипучих вантажів; для скельних шматкових вантажів;
 - за видом несучої гілки — з верхньою несучою гілкою; підземні стрічкові конвеєри з нижньою несучою гілкою; із двома несучими гілками;
 - за положенням холостої гілки — з нормальним розташуванням, коли холоста гілка опирається на ролики брудною стороною; з поверненим розташуванням, коли холоста гілка перевертається на обох кінцях конвеєра й опирається на ролики чистою стороною;
 - за формою поперечного перерізу несучої гілки — із плоскою стрічкою, з жолобчастою стрічкою;
 - за видом траси конвеєра — прямолінійні; криволінійні в профілі; криволінійні в плані.

Кут нахилу обмежується силами тертя між стрічкою й матеріалом, що транспортується. При гладких стрічках він становить 18-22°, а при спеціальних підвищується на 5—15°.

Довжина конвеєра залежить від міцності матеріалу, з якого виготовлена стрічка, і становить для горизонтальних конвеєрів від 300-400 м (бавовняна стрічка) до 3-5 км(тросова стрічка). Довжина похилих конвеєрів в 3-5 разів менше.

Продуктивність конвеєрів до 1000 т/ч, кар'єрних до 20000 т/ч. Конвеєр у плані прямолінійний, але можна допустити невеликі скривлення в профілі, конвеєр може бути криволінійним. Можливе транспортування практично всіх насипних вантажів гірничих підприємств, за винятком досить липких.

Переваги: висока продуктивність; можливість транспортування як по горизонталі, так і під кутом нагору або вниз; порівняно невелика енергоємність і більша довжина в одному агрегаті; можливість автоматизації.

Недоліки: неможливість транспортування при кутах нахилу більше 18-22°, а також при сильно скривленій трасі; порівняно малий термін служби роликів і стрічки й висока їх вартість; залежність роботи від кліматичних умов (для

конвеєрів відкритих розробок); необхідність попереднього дроблення великорозмірного матеріалу. У вугільних шахтах вони широко застосовуються для транспортування вантажів по похилим і горизонтальним виробіткам, на рудних шахтах поки тільки в похилих стовбурах. На поверхні шахт і на збагачувальних фабриках це головний вид транспорту. На кар'єрах стрічкові конвеєри застосовуються дуже широко, із всіх видів транспорту стрічкові конвеєри найбільш перспективні.

Стрічковий конвеєр є найбільш поширеним типом конвеєрів, він може служити для переміщення насипних або штучних вантажів. Застосовується на промислових виробництвах, в копальнях і шахтах, в сільському господарстві.

Вантаж переміщається по стрічці в горизонтальній площині або під кутом до 30° до горизонту.

Часто конвеєрна стрічка є однією з частин транспортуючого пристрою. Наприклад зернонавантажувач застосовується на механізованому струмі для збору зернової маси з майданчика має щіткові шкрябання, далі зерно піднімається норією і потрапляє на стрічковий конвеєр, який закидає зерно в кузов вантажного автомобіля.

Стрічкові конвеєри широко використовуються в металургійній, гірничодобувній і інших видах промисловості. Їх використовують для транспортування насипних і штучних вантажів, як на невеликі відстані, так і на великі відстані. Простота і надійність їх конструкції забезпечує їх роботу в перебігу довгого часу. Стрічкові конвеєри можна використовувати, як в закритих, так і на відкритих ділянках, що пояснює їх широке використання в промисловості. Конвеєри відносяться до машин безперервного типу дії і характеризуються безперервним переміщенням вантажів по заданій трасі без зупинки для завантаження або розвантаження. Переміщуваний насипний вантаж укладається суцільним шаром на несучому елементі машини – стрічці або окремими порціями. Штучні вантажі також переміщаються безперервним потоком в заданій послідовності один за іншим. Завдяки безперервності переміщення вантажу, відсутності зупинок для завантаження і розвантаження, і поєднанню робочого, і

зворотного рухів вантажонесучого елемента машини безперервної дії мають високу продуктивність, що дуже важливе для сучасних підприємств з великими вантажопотоками.

Стрічкові конвеєри застосовують для переміщення в горизонтальному і полого похилому напрямках всіляких насипних і штучних вантажів, а також для між операційного транспортування виробів при поточковому виробництві. Вони набули широкого поширення у всіх галузях промисловості і є основними агрегатами механізації транспорту в ливарних цехах (подача і розподіл землі і прибирання відходів), на томливо подачах електростанцій, підземного і наземного транспорту вугілля і породи у вуглевидобувній промисловості, руди, коксу і флюсів в металургії, будівельних матеріалів і корисних копалини в кар'єрах, мінеральних добрив зерна в зерносховищах, піску і каменя на будівництві каналів і гідроелектростанцій і ін.

Стрічкові конвеєри служать складовими частинами таких складних машин, як роторні екскаватори, перевантажувальні і відвальні мости, навантажувально-розвантажувальні машини і тому подібне. Великого поширення стрічкові конвеєри набули завдяки можливості здобуття високої продуктивності (до 30000 т/ч), великій довжині транспортування (до 3-4 км. в одному конвеєрі і до 100 км. в системі з декількох конвеєрів), простоти конструкції і експлуатації і високої надійності роботи.

По розташуванню на місцевості стрічкові конвеєри розділяють на стаціонарні і рухливі (що розглядаються в цій главі), пересувних і переносних, переставних (для кар'єрів відкритих розробок) і надводних, плаваючих на понтонах.

По конструкції і призначенню розрізняють стрічкові конвеєри загального призначення (ДСТУ 22644-77-ДСТУ 22647-77) і спеціальні: підземні, для харчової, мукомельно-круп'яної і комбікормової промисловості і поточкового виробництва в приладобудівній, радіотехнічній і легкій промисловості.

За типом стрічкові конвеєри бувають з прогумованою, сталеву цілісно прокатною і дотяною стрічкою. Найбільшого поширення набули конвеєри з

прогумованою стрічкою. По конструкції прогумованої стрічки, опорних ходових пристроїв і передачі тягового зусилля розрізняють стрічкові конвеєри, в яких стрічка є вантажонесучим і тяговим елементом (основний тип), стрічково-канатні і стрічково-ланцюгові, в яких стрічка служить лише вантажонесучим елементом, а тяговим елементом є два канати або один ланцюг.

Конвеєри з різними видами стрічок можуть мати по контуру однакові траси, проте радіуси поворотів і кути нахилу p для кожного виду стрічок будуть різними. Кут нахилу конвеєра до горизонту залежить від коефіцієнта тертя вантажу, що транспортується, об стрічку при русі (а отже, від матеріалу і характеру поверхні стрічки), форми профілю стрічки (плоска або жолобчаста), кута природного укосу насипного вантажу, способу завантаження і швидкості руху стрічки.

Для забезпечення стійкого нерухомого положення вантажу на стрічці без його подовжнього сповзання вниз кут нахилу конвеєра має бути приблизно на $10\text{—}15^\circ$ менше кута тертя вантажу об стрічку у спокої. Такий запас необхідний, тому що із-за провисання стрічки кут її підйому в роликкоопір виходить більшим, ніж загальний геометричний кут нахилу конвеєра. Крім того, стрічка на роликкоопорах струшується із-за неминучого биття роликів, що сприяє сповзанню вантажу вниз. Струшування буде тим інтенсивніше, чим більше швидкість стрічки і грубіше виготовлені опорні ролики. Безперервне рівномірне завантаження забезпечує більший кут нахилу, чим періодичне завантаження з перервами потоку вантажу.

На різних підприємствах ці конвеєри знайшли широке вживання, оскільки дозволяють транспортувати практично будь-які види вантажів (окрім рідких) в горизонтальному і похилому напрямках, реалізувати всілякі схеми транспортних операцій. Широке використання стрічкових конвеєрів (рис. 1.1) пов'язане з тим, що вони прості по конструкції і в експлуатації, надійні в роботі, економічні, мають широкий діапазон продуктивності.

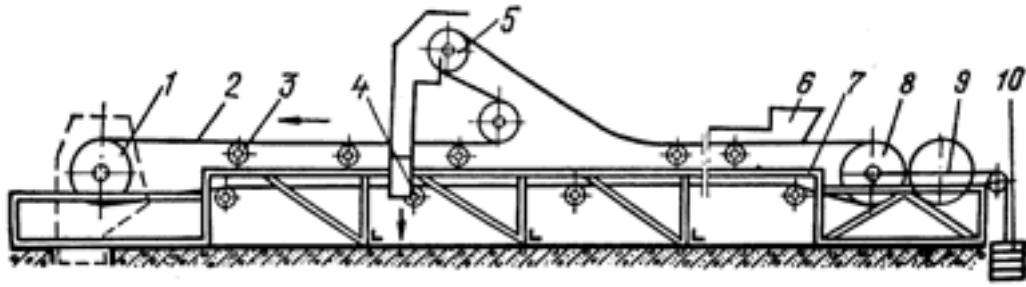


Рисунок 1.1 – Стрічковий конвеєр:

1 – приводний барабан; 2 – робоча гілка стрічки; 3 – жолобчаста роликів опора; 4 – пряма роликів опора; 5 – розвантажувальний візок; 6 – завантажувальний пристрій; 7 – станина; 8 – натяжний барабан; 9 – сталевий трос; 10 – вантаж.

Будь який стрічковий конвеєр складається із замкнутого тягового елементу (стрічки), що є одночасно і робочим елементом, який переміщується по стаціонарних роликів опорах і огинає направляючі пристрої. Верхня гілка стрічки 2, на якій розташований вантаж (зазвичай її називають *робочою гілкою*), рухається по стаціонарних жолобчастих роликів опорах 3. Нижня частина стрічки (зазвичай її називають *неодруженою*) рухається, спираючись на прямі роликів опори 4. Стрічка приводиться в рух від приводного барабана 1, зв'язаного через передавальний механізм з електродвигуном.

Рух стрічки здійснюється за рахунок сили тертя між приводним барабаном і стрічкою, яка виникає при забезпеченні достатнього попереднього натягнення тягового елементу. У показаному на рисунку конвеєрі використано горизонтальний вантажний натягач, що складається з натяжного барабана 8, зв'язаного сталевим тросом 9 з набором вантажів 10.

Роликів опори, привідне і натяжні пристрої кріплять до станини 7, виготовленою із сталевого профілю (куточок, швелер). Грузнув на стрічку поступає через пристрій 6 і може бути вивантажений з транспортера в будь-якій крапці за допомогою розвантажувального візка 5. Така схема стрічкового конвеєра досить характерна для цього різновиду машин безперервного транспорту.

1.1.2. Ланцюгові конвеєри

Ланцюгові конвеєри призначені для транспортування сипких і штучних вантажів. Тяговим елементом служать ланцюги, вантажонесучим – настили, ковши, лотки, полиці і тому подібне. Наявність ланцюгів, як тяговий елемент обмежує швидкість їх (зазвичай $v < 1,0$ м/с), але дозволяє мати велику довжину транспортування при значній продуктивності.

Основними перевагами ланцюгових конвеєрів в порівнянні із стрічковими є можливість переміщення гарячих (пластинчасті конвеєри, скребкові конвеєри) вантажів, що порошать (скребкові конвеєри), крупнокускових (пластинчасті конвеєри, ковшові конвеєри), при великих кутах нахилу траси або навіть у вертикальному напрямі, робота у важчих умовах.

По вигляду робочих і грузонесучих органів ланцюгові конвеєри підрозділяють на пластинчасті конвеєри, скребкові конвеєри, люлечніє конвеєри, поличні конвеєри, ковшові конвеєри і підвісні конвеєри.

1.1.3. Пластинчасті конвеєри

Для транспортування різних насипних і штучних вантажів в горизонтальному і похилому напрямках застосовують пластинчастий конвеєр.

Конвеєри класифікують за такими ознаками:

1. За призначенням:
 - підземні (для вугільних і для рудних шахт);
 - загального призначення (для поверхні шахт і збагачувальних фабрик);
2. По виду траси в плані:
 - прямолінійні;
 - згинальні;
3. За формою пластин в поздовжньому перерізі:
 - з гладкими пластинами;
 - з хвилястими пластинами;

- з поперечними перегородками;
4. За формою поперечного перерізу:
- без бортів;
 - з нерухомими бортами;
 - з рухомими бортами;

Горизонтальний пластинчастий конвеєр (рис.1.2) складається з двох тягових пластинчастих ланцюгів 2, до яких кріплять металеві пластини 3 наздогнала, забезпечені бортами. Ланцюги із закріпленням на них настилом забезпечені ходовими катками 4, які переміщуються по подовжніх направляючих шинах 5. Вони спираються на станину 6 і жорстко з нею пов'язані. На кінцях станини закріплені привідні зірочки 1, сполучені муфтами з редуктором 11 і електродвигуном 12, і натяжні зірочки 5 з гвинтовим натягачем 9.

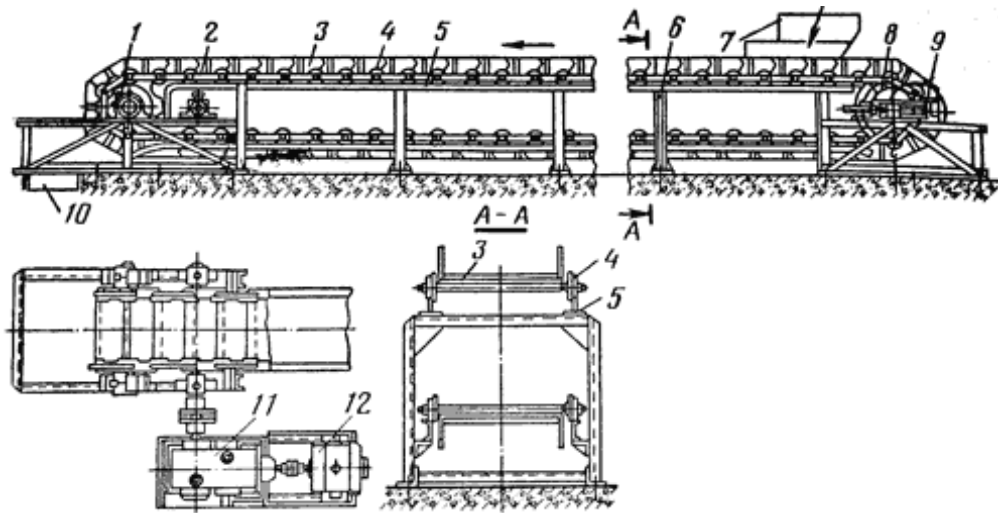


Рисунок 1.2 – Пластинчастий конвеєр: 1 – привідна зірочка; 2 – ланцюг; 3 – пластина; 4 – каток; 5 – шина напрямної; 6 – станина; 7 – завантажувальна воронка; 8 – натяжна зірочка; 9 – натягач; 10 – розвантажувальна воронка; 11 – редуктор; 12 – електродвигун.

Конвеєр завантажують через воронку 7, а розвантажують через кінцеву зірочку і воронку 10.

Настил виконує роль вантажонесучого елементу. Визначає в конструктивного виконання настилу є вигляд вантажу, підмета транспортування.

Залежно від конструкції настилу ходової частини встановлюють наступні типи конвеєрів (рис. 1.3)

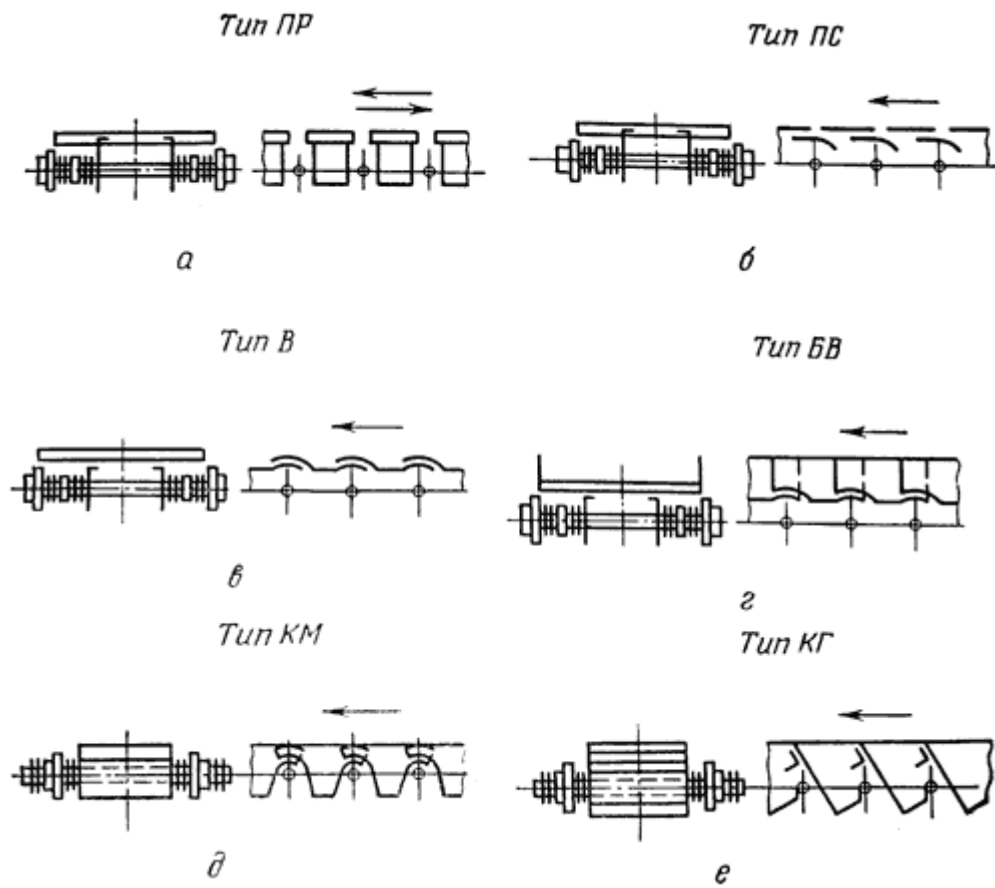


Рисунок 1.3 – Основні типи пластинчастих конвеєрів: а – плоский розімкнений; б – плоский замкнутий; в – безбортової хвилястий; г – бортовий хвилястий; д – коробчатий дрібний; е – коробчатий глибокий.

Конвеєри кожного типу виготовляють в двох виконань: з ходовою частиною з катками і з ходовою частиною без катків; катки (опорні ролики) є елементом конструкції.

Тяговим елементом пластинчастих конвеєрів є, як правило, дві пластинчасті каткові ланцюги. Катки, службовці ходовими опорними пристроями для ланцюга і настилу, встановлюють на підшипниках ковзання або кочення. Катки можуть бути гладкими, з однією або двома ребордами, залежно від типу направляючих шин.

Направляючі шини залежно від величини навантажень виготовляють з куточків, швелерів, рейок. Конструкція зірочок або блоків визначається виглядом

тягового елемента. Як натягачі в пластинчастих конвеєрах використовують гвинтові або пружинно-гвинтові пристрої, які зазвичай ставлять на кінцевих зірочках. Причому в двохланцюгових конвеєрах одну з кінцевих зірочок насаджують на вал без шпонки, що забезпечує її самовстановлення за положенням шарнірів ланцюга.

Привід пластинчастого конвеєра складається із зірочок, редуктора і електродвигуна. Привідні зірочки конвеєрів мають 5 - 8 зубів. До переваг пластинчастих конвеєрів відносять можливість транспортування великошматкових і гарячих вантажів, забезпечення великої продуктивності і значних відстаней транспортування по всіляких трасах, включаючи крутонахилі ділянки (з кутом нахилу до 60°).

До недоліків відносять велику масу, складність експлуатації за значного числа шарнірів ланцюгів, і катків, і порівняльну дорожнечу тягового елемента з настилом. Основні параметри і розміри конвеєрів (ширина наздогнала, висота бортів, швидкість ходової частини і номінальна продуктивність) регламентуються ДСТУ 22281—76.

1.1.4. Скребкові конвеєри

Під поняттям скребкові конвеєри мається на увазі група машин безперервної дії з тяговим елементом, відмітною ознакою яких є робочий орган, виконаний у вигляді скребка. Скребкові конвеєри, зазвичай класифікують за цією ознакою і з його обліком їх підрозділяють на конвеєри:

- з суцільними високими шкрябаннями (висота скребка приблизно дорівнює висоті жолоба, в якому переміщається вантаж);
- із зануреними шкрябаннями.

До конвеєрів із зануреними шкрябаннями відносять конвеєри з суцільними низькими шкрябаннями, з контурними шкрябаннями, трубчасті.

Сфера застосування скребкових конвеєрів досить широка. Їх використовують на підприємствах харчової і зернопереробної промисловості, у

вугільних шахтах, хімічній промисловості для транспортування сипких і кускових вантажів. Можливість виготовлення герметичного жолоба дозволяє застосовувати їх для транспортування вантажів.

До переваг скребкових конвеєрів відносять простоту конструкції, герметичність жолобів, можливість завантаження і вивантаження в будь-якій точці горизонтальної або похилої ділянки траси. Недоліками є порівняно швидкий знос шарнірів ланцюга і жолоба, підвищена потужність приводу унаслідок тертя вантажу і скребків об жолоб, стирання часток вантажу, що транспортується.

1.2 Перевантажувач мінеральних добрив

Перевантажувач мінеральних добрив загальний вигляд якого наведений на рис.1.4.

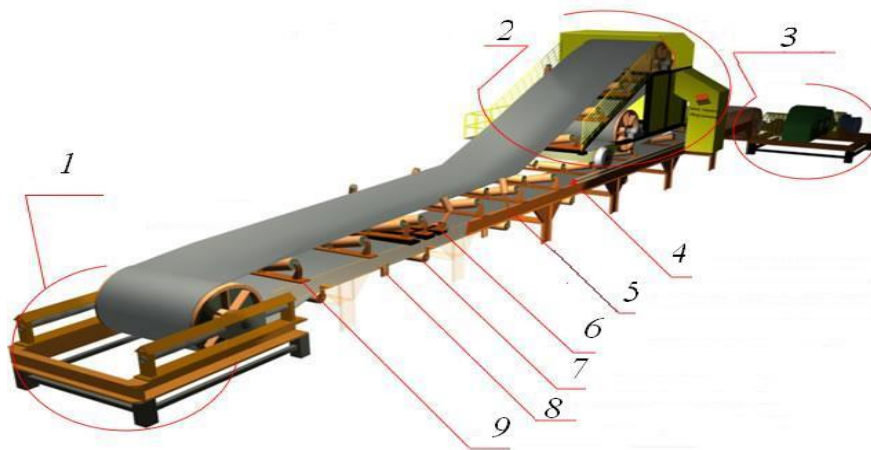


Рисунок 1.4 – Загальний вигляд перевантажувача мінеральних добрив:

- 1 – станція натяжна; 2 – візок розвантажувальний; 3 – електропривод;
- 4 – опорні металоконструкції; 5 – роликоопорні дефлекторні верхні;
- 6 – роликоопорні центруючі верхі; 7 – роликоопорні плоскі нижні;
- 8 – роликоопорні дефлекторні нижні; 9 – роликоопорні верхі жолобчасті.

Застосовується для перевантаження добрив: штучні (мінеральні) добрива, - вироби однієї з галузей хімічної промисловості, що містять поживні елементи, потрібні для сільського господарства. Застосування штучних добрив сприяє

збільшенню врожайности с.-г. культур, покращенню якості продукції та спричиняється до підвищення стійкості рослин у несприятливих кліматичних умовах.

Технічні характеристики перевантажувача мінеральних добрив приведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики перевантажувача мінеральних добрив

Показники	Одиниця виміру	Величина
1	2	3
Ширина стрічки	мм	800
Довжина конвеєра: - Номінальна, між центрами барбанів - Між центрами барабанів по горизонталі	мм	6360 6060
Швидкість руху стрічки	м/сек	2
Продуктивність	т/год	3000
Висота підйому	м	2
Виконання електроустаткування	Загальнопромислове	-
Електродвигун: -тип -потужність, кВт	Асинхронний кВт	3

У якості базової системи керування асинхронним електроприводом перевантажувача мінеральних добрив використовувалася релейно-контакторна система керування (РКСК), принципова схема якої наведена на рис. 1.5.

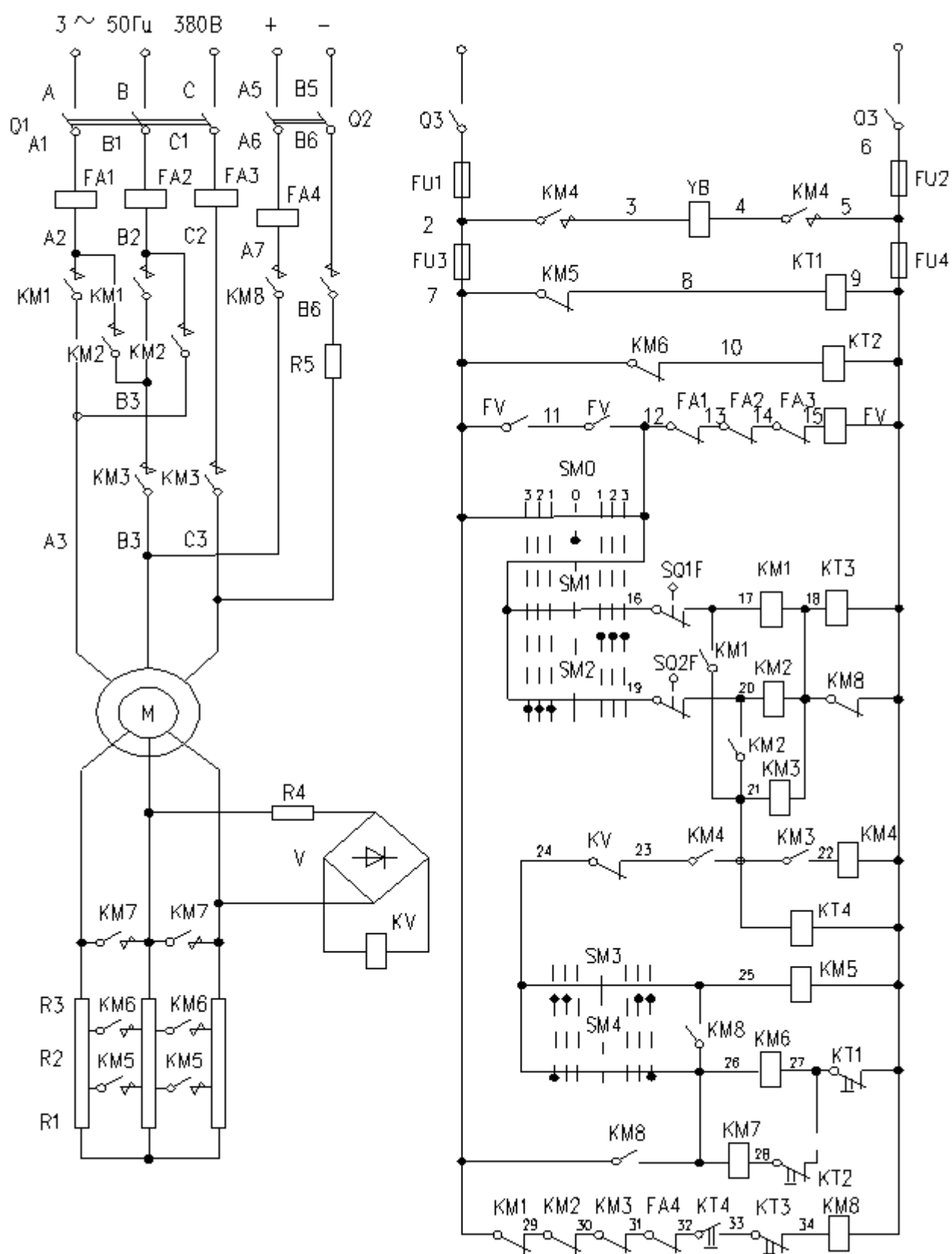


Рисунок 1.5 – Принципова схема РКСК

Ця система дозволяє автоматизувати наступні операції: ввімкнення та відключення двигуна; вибір напрямку та швидкості обертання; пуск та гальмування двигуна; створення часових пауз при русі; захисне відключення двигуна та зупинка механізму.

Перевагами РКСК є: наявність гальванічних розв'язок ланцюгів; значна комутаційна потужність; висока стійкість до перешкод; можливість використання одного джерела живлення для силових та керуючих ланцюгів.

Недоліки РКСК: контактна комутація, що вимагає відповідного догляду за апаратурою та скорочує термін її роботи; обмежена швидкодія; високі малогабаритні показники та енергоспоживання.

Враховуючи вище перераховані недоліки базової системи керування асинхронним електроприводом перевантажувача мінеральних добрив, було прийняте рішення замінити її на сучасну на базі частотного перетворювача.

2 АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

2.1 Аналіз процесу конвеєрного транспорту як об'єкта автоматизації

Процес конвеєрного транспорту добрив – це технологічний процес переміщення маси матеріалів, а в деяких випадках і людей за допомогою конвеєрів. Для переміщення вантажу на великі відстані використовуються конвеєрні лінії, що складаються з двох і більше конвеєрів.

Сучасні конвеєрні лінії по перевантаженню добрив характеризуються значною протяжністю (десятки кілометрів) і розгалуженістю транспортних магістралей, можливістю змінювати свої параметри: довжину, топологію і т.п. В цих умовах конвеєрна лінія може бути не розгалуженою і розгалуженою. Під неразветвленною конвеєрною лінією розуміють однопоточну лінію, в якій вантаж на кожен конвеєр надходить тільки з одного попереднього конвеєра, а під розгалуженою – багатопоточною лінією, що складається з відгалужень і збірної частини. Для розгалужених конвеєрних ліній потрібне узгодження режимів роботи основних – магістральних конвеєрів з дільничними. Такі конвеєри можуть

бути обладнані одним приводним електродвигуном або кількома потужними електродвигунами. Сумарна потужність електродвигунів дільничних конвеєрів становить 300-500 кВт, а магістральних – кілька тисяч кіловат, тому транспортна конвеєрна система є основним споживачем електроенергії. Частка енергоспоживання конвеєрного транспорту становить порядку 20% загального споживання електроенергії. Тому потрібно забезпечення роботи конвеєрних установок в енергозберігаючих режимах.

Рівень автоматизації конвеєрних установок визначається ступенем автоматизації функцій управління, застосовуваними технічними засобами і типом структури системи управління.

Автоматизовані системи управління (АСУ) конвеєрних установок виконують наступні функції: автоматизацію пуску і зупину груп електродвигунів з центрального щита управління, контроль вступу в роботу кожної машини, контроль стану механізмів всіх машин групи, виконання окремих допоміжних операцій при безперервному русі вантажів (облік, дозування, регулювання продуктивності і т. п.), автоматизацію операцій завантаження, розвантаження та розподілу вантажів по заданих пунктам-адресами за допомогою систем автоматичного адресування вантажів, контроль заповнення бункерів і видачі вантажів у залежності від їх заповнення.

За типом структур АСУ конвеєрними установками діляться на системи централізованого та децентралізованого управління, а також системи зі змішаною структурою, причому всі три типи структур можуть бути однорівневими і багаторівневими.

Для складних АСУ конвеєрними установками доцільно рекомендувати до застосування децентралізовану багаторівневу АСУ.

У структуру АСУ конвеєрними установками входить ряд практично автономних підсистем. Зазвичай виділяють чотири таких підсистеми: технологічного контролю та подання інформації, автоматизованого управління, регулювання, технологічних захистів і блокувань.

Підсистема технологічного контролю та подання інформації виконує: контроль (вимір, подання), сигналізацію, реєстрацію, розрахунок техніко-економічних показників, зв'язок з іншими підсистемами АСУ конвеєрними установками. Інформація про стан конвеєрних установок та їх виконавчих механізмів надходить від датчиків, показчиків положення, від кінцевих і шляхових вимикачів, блок-контактів пускачів, контакторів та функціональної апаратури. Контроль параметрів конвеєрних установок, відомості про яких потрібні оперативному персоналу постійно, дублюється індивідуальними вимірювальними комплектами безперервної дії. Контроль наявності вантажу на стрічці, пластинчатому полотні і т. п. здійснюється з метою запобігання перевантаження робочого органу, а також переповнення пересипних пристроїв в точках перевантаження.

В якості датчиків наявності вантажу в розглянутій підсистемі застосовуються контактні (датчики натискного типу) і безконтактні датчики. В якості безконтактних датчиків використовуються індуктивні, радіоактивні, ємнісні і фотоелектричні датчики. Наявність вантажу на стрічці контролюється за допомогою датчиків, замикаючих електричний ланцюг при відхиленні імпульсного приладу масою переміщуваного вантажу. Імпульсний елемент в окремому випадку може бути виконаний у вигляді лопатки або ролика.

При певній навантаженні провисаюча гілка рухомої стрічки приводить в обертання ротор датчика, включає сигналізацію і відключає електропривод конвеєра. При транспортуванні штучних вантажів, якщо проводиться їх перевантаження з одного конвеєра на інший, здійснюється контроль мінімально допустимих інтервалів між окремими вантажами.

Контроль вантажопотоку на стрічці конвеєра може бути здійснений при використанні співісно розташованих джерел і приймачів радіоактивних випромінювань. Сигнал радіоактивного випромінювання, рівень якого залежить від товщини шару матеріалу на лийте, перетвориться і надходить на пристрій індикації, а потім на сервомотор, керуючий засувкою бункера. Одночасно сигнал

з перетворювача подається на інтегруючий пристрій, який показує кількість вантажу, що транспортується.

Контроль бігу стрічки може здійснюватися за допомогою апарату АКС-1, принцип дії якого ґрунтується на перекочування контролюючого ролика по неробочій стороні стрічки. За відсутності стрічки над роликом важіль під дією вантажу повертається і відключає пускач останнього. Для контролю бігу стрічки можуть також застосовуватися безконтактні, наприклад фотоелектричні датчики, які виконуються у вигляді фотоелементів із зовнішнім фотоефектом, фотоопіру або фотоелемента із замикаючим шаром.

Контроль пробуксовки і обриву стрічки проводиться апаратом, який реагує також на розрив стрічки, порушення цілості роликів опор і роботи двигунів. Принцип роботи апарату полягає у визначенні часу обороту важеля закріпленого на осі веденого барабана конвеєра. При збільшенні часу обороту важеля, що може бути викликано тільки пробуксовкою стрічки, подається сигнал на відключення подає і буксує конвеєрів.

Контроль руху тягових органів здійснюється за допомогою реле швидкості, які поділяються на механічні (динамічні, відцентрові, динамічні інерційні, гідравлічні) і електричні (індуктивні і тахогенераторні).

На стрічковому конвеєрі місце установки реле швидкості можна обрати довільно, так як швидкість стрічки по довжині конвеєра при будь-якому режимі не змінюється (зазвичай його ставлять на валу хвостового барабана).

Місце встановлення реле швидкості на довжині конвеєрах істотно впливає на надійність підсистеми технологічного контролю (найбільш небезпечним є розрив на приводний зірочці), тому реле швидкості встановлюється на холостий гільки після приводу.

Контроль місць перевантаження здійснюється за допомогою сигналізаторів завалів перевантажувальних пунктів, робота яких ґрунтується на відхиленні рухомого елемента, наприклад, до лотка датчика, який відключає двигун конвеєра, що подає.

Контроль ступеня заповнення бункерних установок здійснюється установкою датчиків верхнього і нижнього рівня матеріалу, що дозволяє автоматично відключати двигун завантажувального конвеєра при переповненні бункера і двигун конвеєра, на який проводиться розвантаження, за відсутності матеріалу в бункері.

Датчики шляхової автоматики визначають постійний зв'язок ланцюга, що рухається, візків, підвісок і окремих механізмів конвеєра з підсистемою технологічного контролю.

Рухомий елемент тим чи іншим способом (найчастіше механічним контактом) впливає на щуп датчика, який передає сигнал безпосередньо в датчик, наприклад, в контактний або безконтактний кінцевий вимикач.

Датчики шляхової автоматики забезпечують правильну роботу передавальних пристроїв, контролюють взаємне розташування візків з підвісками і виконують інші подібні операції при роботі конвеєра. Наприклад, в сучасних конвеєрах використовують в основному три уніфікованих типа датчиків візки, штовхача і вільного штовхача. У датчиках шляхової автоматики сучасних конструкцій власне датчиком служить індуктивний датчик з безконтактним перемикачем.

Підсистема технологічного контролю і представлення інформації повинна бути забезпечена двосторонньої звукової оперативної та попереджувальною сигналізацією, зокрема, пуску конвеєра повинна передувати звукова сигналізація.

Підсистема автоматизованого управління конвеєрними установками виконує наступні функції: послідовний пуск двигунів конвеєрної лінії у порядку, зворотному напрямку вантажопотоку, з необхідною витримкою між включеннями, останов всієї лінії з центрального щита управління і кожного конвеєра з місця установки, місцевий пуск кожного конвеєра (з відключенням блокувань) в обох напрямках при налагодженні, регулюванні та випробуванні лінії, автоматичне приведення схеми управління в положення вимкнено за відсутності напруги.

Зазвичай пускову кнопку ставлять на центральному щиті управління, а кнопки «Стоп» розташовують у кількох місцях кожного окремого виробничого приміщення, в перехідних галереях, у приводних механізмів, на ділянці завантаження і розвантаження для швидкої аварійної зупинки конвеєра і запобігання нещасних випадків. При аварійній зупинці одного конвеєра в потокової лінії негайно зупиняються всі попередні конвеєри.

В разі автоматичного адресування вантажів при використанні конвеєрних установок пов'язано з вирішенням наступних завдань: з сортуванням тарно-штучних вантажів по певних секцій складу, стелажів, штабелів, підвісним шляхах, транспортним засобам, розподілом сипучих вантажів по бункерах, силосах або штабелям, з видачею сипучих і штучних вантажів в заданій послідовності з штабелів, стелажів, бункерів, силосів, акумулюючих секцій різних конвеєрів в певні точки складу, на конвеєр, транспортний засіб і т. д.

При автоматичному адресуванні тарно-штучних вантажів застосовуються два способи: децентралізований, коли адресоносія є самі вантажі, і централізований, коли маршрут прямування вантажів задається на пульті управління.

Принцип дії систем децентралізованого адресування ґрунтується на збігу програми, нанесеної на адресоносія, і налаштованого на цю програму приймального (зчитувального) пристрою. У таких системах виконавчі елементи (приводи стрілочних переводів, штовхувачі роликів, ланцюгових конвеєрів) отримують команди безпосередньо від адресується об'єкта.

Основними типами систем децентралізованого адресування штучних вантажів є електромеханічне з шипами або штирями, фотоелектричне, електромеханічне флажковий, оптичне, електромагнітне.

Підсистема регулювання виконує наступні функції: отримання інформації про поточний значенні регульованих параметрів, порівняння поточних значень регульованих параметрів із заданими значеннями, формування закону регулювання, видачу регулюючих впливів, обмін інформацією з іншими підсистемами. Наприклад, система автоматичного регулювання продуктивності

конвеєрної установки організовується на основі інформації, одержуваної від датчиків, які вимірюють швидкість руху вантажу, лінійну навантаження, і впливає на становище шибера, на швидкість живильників.

Підсистема захистів і блокувань визначає мінімізацію економічних втрат на відновлення працездатності обладнання конвеєрних установок. Своє призначення підсистема захистів і блокувань виконує шляхом запобігання або усунення ситуацій, що призводять до порушення технологічного процесу або до пошкодження обладнання. Особливу роль відіграє надійне функціонування блокувань для складання систем конвеєрних установок в період проведення пускозупинних операцій.

Конвеєрні установки обладнуються блокуваннями, які відключають привід конвеєра при пробуксовці стрічки, поперечному і поздовжньому пориві стрічки, сході стрічки в бік понад встановлених допусків, підвищенні температури барабанів або інших механізмів конвеєра понад допустиму величини.

2.2. Області застосування частотних перетворювачів

На базі частотних перетворювачів можуть бути реалізовані системи регулювання швидкості наступних об'єктів [4]:

- насосів води в системах водо- і теплопостачання, допоміжного устаткування котельних, ТЕС, ТЕЦ і котлоагрегатів;
- насоси в технологічних лініях збагачувальних фабрик;
- рольганги, конвеєри, транспортери і інші транспортні засоби;
- дозатори і живильники;
- ліфтове устаткування;
- дробарки, млини, мішалки, екструдери;
- центрифуги різних типів;
- лінії виробництва плівки, картону і інших стрічкових матеріалів;
- устаткування прокатних станів і інших металургійних агрегатів;
- приводи бурових верстатів, електробурів, бурового устаткування;

- електроприводи верстатного устаткування;
- високооборотні механізми (шпинделі шліфувальних верстатів і т.п.);
- екскаваторне устаткування;
- устаткування крана;
- механізми силових маніпуляторів і тому подібне.

Економія електроенергії при використанні регульованого електроприводу в середньому складає 50-75 % від потужності, споживаної при РКСК.

Застосування частотних перетворювачів, крім економії електроенергії, дає ряд додаткових переваг, а саме:

- плавний пуск і зупинка двигуна виключає шкідливу дію перехідних процесів в технологічному устаткуванні;
- пуск двигуна здійснюється при струмах, обмежених на рівні номінального значення, що підвищує довговічність двигуна, знижує вимоги до потужності живлячої мережі і потужності комутуючої апаратури;
- можлива модернізація технологічних агрегатів без заміни основного устаткування і практично без перерв в його роботі.

Системи управління на базі частотних перетворювачів можуть мати будь-які технологічно необхідні функції, реалізація яких можлива як за рахунок вбудованих в перетворювачі програмованих контролерів, так і додаткових контролерів, що функціонують спільно з перетворювачами.

2.3. Вибір перетворювача частоти

Дуже важливо зробити правильний вибір перетворювача. Від нього залежатиме ефективність і ресурс роботи перетворювача частоти і всього електроприводу в цілому [4].

В першу чергу при виборі моделі перетворювача частоти слід виходити з конкретного завдання, яке повинен вирішувати електропривод, типу і потужності електродвигуна, що підключається, точності і діапазону регулювання швидкості,

точності підтримки моменту обертання на валу двигуна, часу, відведеного для розгону і гальмування, тривалості включення і кількості включень в годині.

Так само, можна враховувати конструктивні особливості перетворювача, такі як розміри, форма, можливість щільної установки, можливість винесення пульта управління та ін.

При роботі із стандартним асинхронним двигуном перетворювач слід вибирати з відповідною потужністю. Якщо потрібний великий пусковий момент або короткий час розгону/уповільнення, вибирають перетворювач на ступінь вище стандартного.

При виборі перетворювача для роботи із спеціальними двигунами (двигуни з гальмами, потужні двигуни, з втяжним ротором, синхронні двигуни, високошвидкісні і так далі) слід керуватися, перш за все, номінальним струмом перетворювача, який повинен бути більше номінального струму двигуна, а також особливостями настройки параметрів перетворювача.

Для системи керування асинхронним електроприводом перевантажувача мінеральних добрив застосуємо частотний перетворювач MICROMASTER 420, загальний вигляд якого представлено на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Частотний перетворювач MICROMASTER 420

2.4. Опис перетворювача MICROMASTER 420

Основні характеристики частотного перетворювача MICROMASTER 420 наведено у таблиці 2.1.

Перетворювач MICROMASTER 420 може використовуватися для вирішення численних завдань, що вимагають застосування приводів із змінюваними швидкостями обертання. Понад усе він підходить для використання у насосах, вентиляторах і транспортерах.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики частотного перетворювача MICROMASTER 420

Основна сфера застосування	Перетворювач призначений для регулювання швидкості обертання стандартних приводів і рішення завдань автоматизації технологічного процесу. Основна сфера застосування: конвеєри, пакувальні машини, насоси, вентилятори.
Діапазон потужності	0,12 кВт ... 11 кВт
Напруга живлячої мережі	1 АС 200 В ... 240 В 3 АС 200 В ... 240 В 3 АС 380 В ... 480 В
Закони керування	• лінійна залежність U/f; • програмована залежність U/f; • пряме керування потоком (FCC)
Технологічний регулятор	Вбудований ПІ - регулятор
Цифрові і аналогові входи	3 цифрових, 1 аналоговий
Вихід	1 релейний, 1 аналоговий

Інтерфейс	Краще всього підходить для вирішення завдань автоматизації з контролерами SIMATIC S7 - 200, SIMATIC S7 – 300/400 (TIA) або SIMOTION
Додаткові можливості	• BICO- технологія

Перетворювач відрізняється високою продуктивністю і комфортабельним використанням. Великий діапазон напруги живлячої мережі дозволяє використовувати його в будь-якій частині світу.

MICROMASTER 420 має модульну конструкцію. Пульт керування і комунікаційні модулі можуть бути замінені без застосування якого-небудь інструменту.

Основні особливості:

- просте введення в експлуатацію;
- особливо гнучка конфігурація завдяки модульній конструкції;
- три цифрових входи;
- один аналоговий вхід (від 0 до 10 В), може бути використаний як 4-й цифровий вхід;
- один аналоговий вихід (від 0 мА до 20 мА);
- один релейний вихід (DC 30В/5А, омичне навантаження AC 250В/2А, індуктивне навантаження);
- безшумна робота двигуна завдяки високій частоті ШІМ;
- захист двигуна і перетворювача.

Механічні параметри MICROMASTER 420:

- модульне виконання;
- робоча температура - 10°C.. +50 °C;
- компактний корпус завдяки високій питомій потужності;
- просте підключення;
- знімна панель оператора.

Силові параметри MICROMASTER 420:

- новітня технологія IGBT;
- цифрове мікропроцесорне керування;
- пряме керування потоком двигуна (FCC), для поліпшення динамічних характеристик і оптимального управління двигуном;
- U/f – керування лінійне та квадратичне;
- компенсація ковзання;
- автоматичний повторний запуск при зникненні напруги в мережі або порушеннях режиму роботи;
- просте регулювання процесу завдяки вбудованому ПІ – регуляторі;
- час розгону і гальмування в межах від 0 ... 650 сек;
- згладжування кривої пуску;
- швидкодіюче струмообмеження (FCL) для безаварійної роботи;
- швидкодіюче опитування цифрових входів, що репродукується;
- точне введення заданого значення завдяки 10-бітовому аналоговому входу;
- комбіноване гальмування для контрольованої швидкої зупинки;
- 4 частоти пропускання проти резонансу;

Функції захисту та перевантажувальна здатність:

- 1,5 – й номінальний вихідний струм протягом 60 с, кожні 5 хвилин.;
- захист від перенапруження і зниженої напруги;
- захист від перегрівання перетворювача;
- захист двигуна за допомогою підключення РТС терморезистора;
- захисне заземлення;
- захист від короткого замикання;
- тепловий захист двигуна;
- захист від блокування двигуна;
- захист від зміни параметрів;

Схема підключення частотного перетворювача MICROMASTER 420 наведено на рис. 2.2.

Технічні характеристики частотного перетворювача MICROMASTER 420 представлено у таблиці 2.2.

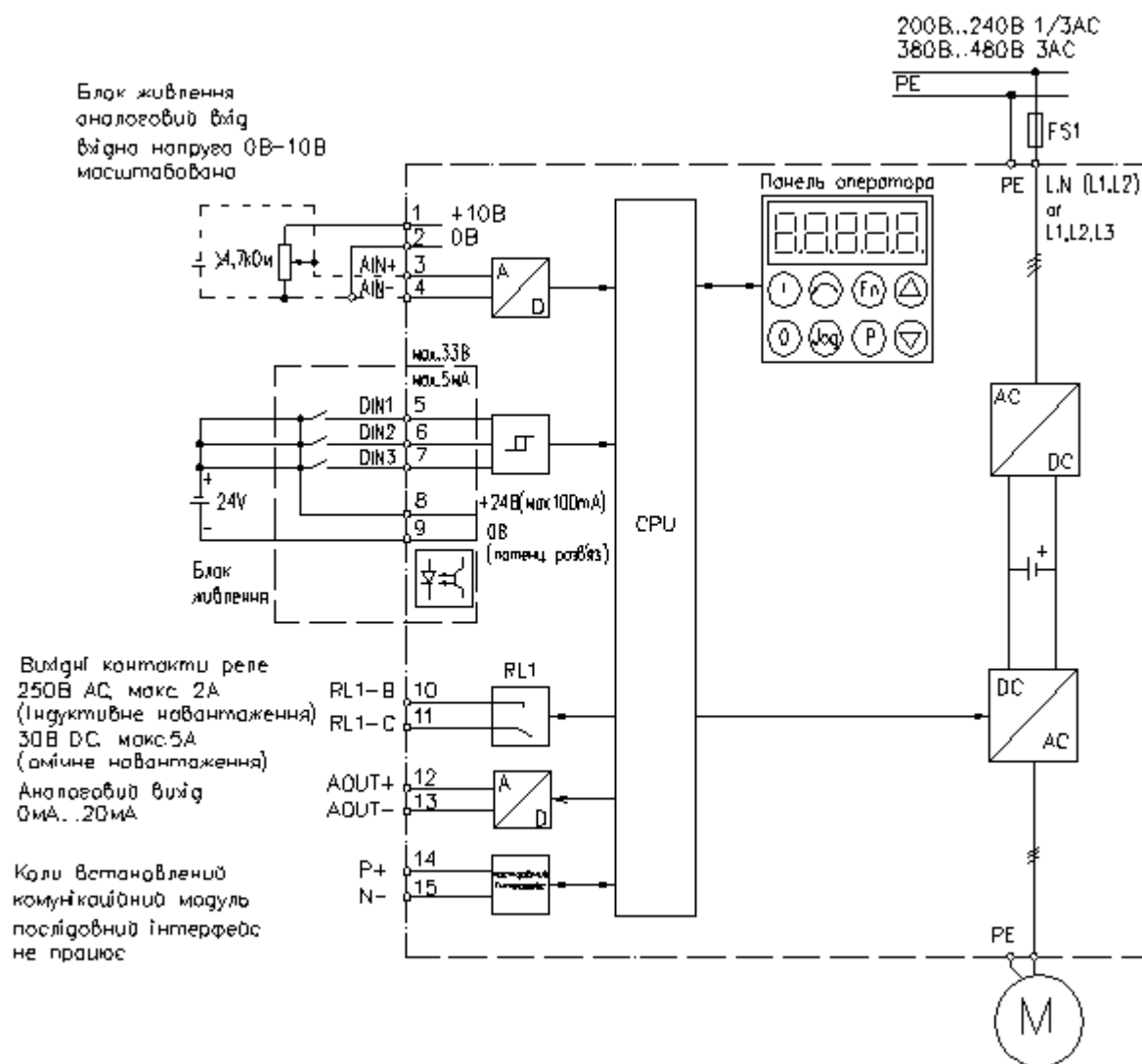


Рисунок 2.2 – Схема підключення частотного перетворювача
MICROMASTER 420

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики частотного перетворювача
MICROMASTER 420

Потужність кВт		Розрахунковий вхідний, А	Розрахунковий вихідний струм, А	Типорозмір корпусу (FS)	Номер MICROMASTER
0,12	0,16	1,1	0,9	A	6SE6420-2UC11-2AA1
0,25	0,33	2,2	1,7	A	6SE6420-2UC12-5AA1
0,37	0,5	3	2,3	A	6SE6420-2UC13-7AA1
0,55	0,75	3,9	3	A	6SE6420-2UC15-5AA1
0,75	1	5,2	3,9	A	6SE6420-2UC17-5AA1
1,1	1,5	7,6	5,5	B	6SE6420-2UC21-1BA1
1,5	2	10,2	7,4	B	6SE6420-2UC21-1BA1
2,2	3	14,1	10,4	B	6SE6420-2UC21-5BA1
3,0	4	18,4	13,6	C	6SE6420-2UC23-0CA1
4,0	5	23,3	17,5	C	6SE6420-2UC24-0CA1
5,5	7,5	28	22	C	6SE6420-2UC25-5CA1
0,37	0,5	1,5	1,2	A	6SE6420-2UD13-7AA1
0,55	0,75	1,9	1,6	A	6SE6420-2UD15-5AA1
0,75	1	2,4	2,1	A	6SE6420-2UD17-5AA1
1,1	1,5	3,7	3,0	A	6SE6420-2UD21-1AA
1,5	2	4,8	4,0	A	6SE6420-2UD21-5AA1
2,2	3	6,5	5,9	B	6SE6420-2UD22-2BA1
3,0	4	8,6	7,7	B	6SE6420-2UD23-0BA1
4,0	5	11,6	10,2	B	6SE6420-2UD24-0BA1
5,5	15,6	15,6	13,2	C	6SE6420-2UD25-5CA1
7,5	22,0	22,0	19,0	C	6SE6420-2UD27-5CA1
11	26,0	32,3	26,0	C	6SE6420-2UD31-5CA1

2.5. Аксесуари до перетворювача

2.5.1. Фільтри електромагнітної сумісності

Фільтр електромагнітної сумісності (ЕМС) класу А для перетворювача, що не має вбудованого фільтру:

- 3 АС 200В ... 240В, типорозмір А та В;
- 3 АС 380В ... 480 В, типорозмір А.

Усі інші перетворювачі можуть поставляються зі вбудованим фільтром ЕМС класу А.

Фільтр ЕМС для перетворювача, що не має вбудованого фільтру:

- 3 АС 200 ... 240 В, типорозмір А і В;
- 3 АС 380 ... 480 В, типорозмір А.

З цим фільтром ЕМС перетворювач відповідає нормам випромінювання EN 55011, клас В.

Додатковий фільтр ЕМС класу В використовується в перетворювачі зі вбудованим ЕМС – фільтром класу А.

З цим фільтром перетворювач відповідає нормам випромінювання EN 55011, клас В.

Фільтр класу В з низьким струмом витоку, це ЕМС - фільтр для перетворювачів 1 АС 200 .. 240 В, типорозмір А і В без вбудованого ЕМС - фільтру класу А.

Завдяки цьому фільтру перетворювач відповідає нормам випромінювання EN 55011, клас В.

Струм витоку для перетворювачів з/без фільтру (вбудованого/зовнішнього) в середньому близько 30 мА. На практиці це значення коливається від 10 до 50 мА.

Конкретне значення струму витоку залежить від типу перетворювача, умов експлуатації і довжини кабелю.

Робота перетворювача з пристроями що мають рівень спрацьовування на струм витоку до 30 мА не гарантується. Проте пристрої мають поріг спрацьовування 300 мА можуть використовуватися з перетворювачами.

Вхідний дросель: Дросель застосовується для зменшення піків напруги. Додатково, вхідний дросель зменшує вплив вищих гармонік з мережі на перетворювач і назад. Якщо мережевий імпеданс $<1\%$, то необхідно використовувати дросель комутації мережі, щоб знизити кидки струму.

Відповідно до EN 61000-3-2 "Обмеження гармонійних складових струмів для пристроїв з вхідним струмом <16 А на фазу" є спеціальні вимоги для перетворювачів потужністю від 250Вт до 550Вт на напругу 1 фаз. 230В, для випадків застосування не в промисловості.

Для пристроїв потужністю 250 .. 370 Вт необхідно використовувати вхідний дросель або отримати дозволи на підключення перетворювача до міської мережі у відповідних служб.

LC-фільтр: Фільтр LC обмежує крутизну наростання напруги і струми перезаряду, які з'являються, як правило, при роботі перетворювача.

Тому можливо використовувати істотно довші екрановані кабелі двигуна при роботі з LC-фільтром і термін служби двигуна досягає тих же значень, як при роботі безпосередньо від мережі.

Фільтри LC можуть застосовуватися з усіма MICROMASTER 420 типорозмірів від А до С.

2.5.2. Панель оператора (BOP)

За допомогою базової панелі оператора (Basic Operator Panel –BOP) можна виробити індивідуальне налаштування параметрів. Значення і одиниці виміру відображаються на 5 – розрядному дисплеї.

Вона може бути встановлена безпосередньо в перетворювач або за допомогою монтажного комплексу вбудована в двері шафи управління.

Комфортна панель оператора (Advanced Panel Operator – AOP) дає можливість вивести блоки параметрів перетворювача або ввести їх перетворювач (Upload/ Download). За допомогою AOP можна запам'ятовувати до 10 різних блоків параметрів. Пропонується індикація текстом на декількох мовах.

З однієї панелі AOP можна управляти через універсальний інтерфейс USS до 30 перетворювачами. Панель може бути встановлена безпосередньо у перетворювач або змонтована на дверях шафи керування.

Модуль PROFIBUS: Потрібний для комплектного зв'язку з шиною PROFIBUS із швидкістю обміну 12 MBaud. Через модуль PROFIBUS можна управляти перетворювачем дистанційно. За допомогою панелі оператора, встановленої в модуль PROFIBUS, можна комбінувати дистанційне керування з управлінням від перетворювача. Модуль PROFIBUS може жити від зовнішнього джерела DC 24 V і тому залишається активним навіть тоді коли перетворювач відключений від мережі. Зв'язок відбувається через 9-полюсний роз'єм Sub – D (поставляється як приналежність).

2.5.3. Програми запуску в експлуатацію

Starter: Програма Starter має графічний інтерфейс і призначена для введення в експлуатацію перетворювачів MICROMASTER 420. Програма Starter призначена Для роботи під Windows NT/2000. Програма дозволяє прочитувати, змінювати, запам'ятовувати, вводити і роздруковувати список параметрів.

Drive Monitor : Програма Drive Monitor є програмою запуску в експлуатацію перетворювачів MICROMASTER 420 і MASTERDRIVES під Windows95/98 і NT/2000.

Обидві програми входять в стандартний комплект постачання до кожного перетворювачу.

3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КОНВЕЄРА

Для того, щоб дослідити автоматичну систему керування, зокрема АСК ЕП, необхідно представити її математичним описом, тобто системою диференціальних рівнянь, що характеризують залежності координат системи від зовнішніх впливів і друг від друга.

Найпоширенішими способами математичного опису є диференціальні рівняння, структурні схеми, що є графічною інтерпретацією диференціальних рівнянь, матричні структурні схеми. Опис системи у вигляді диференціальних рівнянь у нормальній формі Коші дозволяє представити структурну схему системи у вигляді ряду зв'язаних між собою інтегруючих ланок.

Для загальної оцінки показників якості при використанні привода MICROMASTER 420 проведемо побудову й розрахунок математичної моделі системи керування асинхронним двигуном.

3.1 Побудова математичної моделі асинхронного двигуна при керуванні частотою й напругою статора

При дослідженні перехідних процесів у трифазних асинхронних електродвигунах доцільно прийняти наступні допущення, що дозволяють спростити вираз основних параметрів і координат електродвигуна:

- сили намагнічування обмоток двигуна розподілення синусоїдально уздовж окружності повітряного зазору;
- втрати в сталі статора і ротора строго симетричні зі зрушенням осей обмоток на 120° ;
- насичення магнітного кола відсутнє.

Рівняння рівноваги напруг для обмоток трьох фаз статора мають вид:

$$\begin{aligned} u_{1a} &= i_{1a} R_1 + \frac{d\psi_{1a}}{dt} \\ u_{1b} &= i_{1b} R_1 + \frac{d\psi_{1b}}{dt} \\ u_{1c} &= i_{1c} R_1 + \frac{d\psi_{1c}}{dt} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Відповідно для обмоток трьох фаз ротора:

$$\begin{aligned} u'_{2a} &= i'_{2a} R'_2 + \frac{d\psi'_{2a}}{dt} \\ u'_{2b} &= i'_{2b} R'_2 + \frac{d\psi'_{2b}}{dt} \\ u'_{2c} &= i'_{2c} R'_2 + \frac{d\psi'_{2c}}{dt} \end{aligned} \quad (3.2)$$

де $u_{1a}, u_{1b}, u_{1c}, u'_{2a}, u'_{2b}, u'_{2c}$ - миттєві значення фазних напруг статора і ротора двигуна; $i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}, i'_{2a}, i'_{2b}, i'_{2c}$ - миттєві значення фазних струмів статора і ротора; $\psi_{1a}, \psi_{1b}, \psi_{1c}, \psi_{2a}, \psi_{2b}, \psi_{2c}$ - повні потокозчеплення фазних обмоток; R_1, R_2 - активні опори обмоток статора і ротора.

$$\begin{bmatrix} \psi_{1a} \\ \psi_{1b} \\ \psi_{1c} \\ \psi_{2a} \\ \psi_{2b} \\ \psi_{2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 \\ 0 & L_1 & 0 \\ 0 & 0 & L_1 \\ L_{12} \cdot \cos \theta_2 & L_{12} \cdot \cos(\theta_2 - \frac{2\pi}{3}) & L_{12} \cdot \cos(\theta_2 - \frac{4\pi}{3}) \\ L_{12} \cdot \cos(\theta_2 - \frac{4\pi}{3}) & L_{12} \cdot \cos \theta_2 & L_{12} \cdot \cos(\theta_2 - \frac{2\pi}{3}) \\ L_{12} \cdot \cos(\theta_2 - \frac{2\pi}{3}) & L_{12} \cdot \cos(\theta_2 - \frac{4\pi}{3}) & L_{12} \cdot \cos \theta_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \\ i'_{2a} \\ i'_{2b} \\ i'_{2c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L'_1 & 0 & 0 \\ 0 & L'_1 & 0 \\ 0 & 0 & L'_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i'_{2a} \\ i'_{2b} \\ i'_{2c} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

де $L_1 = L_{1a} + L_m, L'_2 = L'_{2c} + L_m$ - повні еквівалентні індуктивності фаз статора і ротора, які складаються від індуктивностей полів розсіювання (L_{1a}, L'_{2c}) і

головного потоку $L_m = \frac{3}{2} L_{12}$, L_{12} - максимальна індуктивність між будь-якою обмоткою статора і будь-якою обмоткою ротора, яка має місце при збігу їх осей; θ_2 - поточний кут між осями обмоток фаз ротора і статора.

Асинхронний електродвигун являє собою систему магніто-зв'язаних обмоток, розташованих на статорі й роторі. При обертанні ротора взаємне положення обмоток статора і ротора безупинно змінюється, відповідно змінюється і взаємна індуктивність між ними. З урахуванням прийнятих допущень можна вважати, що взаємна індуктивність пропорційна косинусу поточного кута між осями обмоток ротора і статора. Повне система рівнянь потокозчеплень в обмотках статора і ротора визначається рівняннями (3.3).

Рівняння (3.3) містить гармонійні коефіцієнти, що створює значні труднощі при дослідженні перехідних процесів. Для того, щоб виключити гармонійні коефіцієнти, використовують перетворення координат. З цією метою реальні змінні статора і ротора замінюються їхніми проекціями на взаємно перпендикулярні осі координат, що обертаються з довільною швидкістю ω_k . Таке перетворення координат відповідає приведенню трифазного електродвигуна до еквівалентного двофазного.

При математичному описі трифазних асинхронних електродвигунів зручно оперувати не миттєвими значеннями струмів рівні i_a , i_b , i_c , то результуючий вектор струму визначається рівнянням:

$$i = \frac{2}{3} (a^0 i_a + a i_b + a^2 i_c) = \frac{2}{3} (i_a + a i_b + a^2 i_c) \quad (3.4)$$

де $a^0 = e^{j0} = 1$; $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$; $a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$

Аналогічно визначаються результуючі вектори напруги

$$u = \frac{2}{3} (u_a + a u_b + a^2 u_c), \quad (3.5)$$

і потокозчеплення:

$$\psi = \frac{2}{3}(\varphi_a + a\varphi_b + a^2\varphi_c), \quad (3.6)$$

Використовуючи вираження результуючих векторів, рівняння (3.1) можна записати у виді одного диференціального рівняння у векторній формі. Для цього перше рівняння з (3.1) збільшується на $\frac{2}{3}a^0$, друге на $\frac{2}{3}a$, третє на $\frac{2}{3}a^2$.

Підсумовуючи отримані добутки, одержимо:

$$\frac{2}{3}(u_{1a} + au_{1b} + a^2u_{1c}) = \frac{2}{3}(i_{1a} + ai_{1b} + a^2i_{1c})R_1 + \frac{2d}{3dt}(\psi_{1a} + a\psi_{1b} + a^2\psi_{1c}), \quad (3.7)$$

або в векторній формі:

$$u_1 = I_1R_1 + \frac{d\psi_1}{dt}. \quad (3.8)$$

Аналогічно векторне рівняння напруг ротора:

$$u'_2 = I'_2R'_2 + \frac{d\psi_2}{dt}. \quad (3.9)$$

У рівняннях (3.8) та (3.9) вектори записані відповідно в системах координат статора й ротора. Для спільного рішення рівнянь їх необхідно привести до однієї системи координат.

При дослідженні перехідних процесів в електродвигунах змінного струму застосовують різні ортогональні системи координат, що відрізняються кутовою швидкістю обертання координатних осей ω_k , наприклад системи, осі яких нерухомі щодо ротора, чи нерухомі щодо статора, чи обертаються із синхронною швидкістю.

Рівняння асинхронного електродвигуна в системі координат, що обертається з довільною швидкістю ω_k , мають вид:

$$\begin{aligned} u_1 &= i_1R_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + j\omega_k\psi_1 \\ u'_2 &= i'_2R'_2 + \frac{d\psi_2}{dt} + j(\omega_k - p_i)\psi_2 \end{aligned}, \quad (3.10)$$

де ω_k - кутова швидкість обертання ротора; p_i - число пар полюсів.

При дослідженні перехідних процесів в асинхронному електродвигуні, який керується частотою і напругою статора, зручно використовувати систему координат, яка обертається зі швидкістю ω_k , і дорівнює кутовій швидкості обертання магнітного поля $\dot{\omega}_0$, яку приведено до числа пар полюсів і дорівнює 1 (зведення до двохполюсного двигуна).

$$\dot{\omega}_0 = \omega_1 = 2\pi f_1, \quad (3.11)$$

де f_1 – частота напруги статора, Гц;

Отже, на основі рівнянь (3.10) можна записати:

$$\begin{aligned} u_1 &= i_1 R_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + j \cdot \omega_1 \cdot \psi_1 \\ u'_2 &= i'_2 R'_2 + \frac{d\psi_2}{dt} + j \cdot s \cdot \omega_1 \cdot \psi_2 \end{aligned}, \quad (3.12)$$

де s – ковзання електродвигуна:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{\omega_1 - p_i \omega}{\omega_1}. \quad (3.13)$$

Потокозчеплення пов'язані зі струмами через індуктивності:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= i_1 L_1 + i_2 L_m \\ \psi_2 &= i_1 L_1 + i'_2 L'_2 \end{aligned}. \quad (3.14)$$

Для визначення електромагнітного моменту асинхронного двигуна використовуємо векторний добуток ψ_1 та i_1 . Тоді:

$$M = \frac{3}{2} p_n (\psi_1 \times i_1), \quad (3.15)$$

або векторний добуток ψ_2 та i'_2 , тоді:

$$M = -\frac{3}{2} p_n (\psi_1 \times i'_2), \quad (3.16)$$

З огляду на рівняння (3.14), можна записати (3.15) та (3.16):

$$M = \frac{3}{2} p_n (i_1 L_1 + i'_2 L_m) \times i_1 = \frac{3}{2} p_n L_m (i'_2 \times i_1), \quad (3.17)$$

$$M = \frac{3}{2} p_n (i_1 L_m + i'_2 L'_2) \times i_1 = \frac{3}{2} p_n L_m (i_1 \times i'_2), \quad (3.18)$$

Ці рівняння мають рацію, тому що векторний добуток двох однаково спрямлених векторів дорівнює нулю.

Для повного опису перехідних процесів в асинхронному двигуні к рівнянням напруг і моментів потрібно додати рівняння:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.19)$$

Отримана система рівнянь електродвигуна є нелінійною, тому рішення її для різних динамічних режимів роботи електродвигуна може бути виконане з використанням обчислювальних машин. При синтезі систем керування асинхронним електродвигуном доцільно використовувати прості й наочні динамічні моделі електродвигуна у вигляді передатних функцій або структурних схем. Така можливість з'являється, якщо розглядати перехідні процеси у відхиленнях щодо початкових координат електродвигуна.

Порівняно проста структурна схема може бути отримана, якщо зневажити активним опором статорного кола, тобто покласти $R_t = 0$. Безумовно, що така зневага накладає певні обмеження на використання одержуваних моделей. Вони цілком застосовні для систем з невеликим діапазоном регулювання швидкості щодо синхронної швидкості, для електродвигунів малої потужності необхідні уточнення структурних схем.

Для подальших досліджень динамічних властивостей асинхронних електродвигунів доцільно результуючі вектори представити у вигляді проекцій на комплексній площині й записати їх через речовини й мнимі частини в наступному виді:

$$\begin{aligned} u_1 &= u_{1a} + ju_{1\beta}; & u'_2 &= u'_{2a} + ju'_{2\beta}; \\ i_1 &= i_{1a} + ji_{1\beta}; & i'_2 &= i'_{2a} + ji'_{2\beta}; \\ \psi_1 &= \psi_{1a} + j\psi_{1\beta}; & \psi'_2 &= \psi'_{2a} + j\psi'_{2\beta}; \end{aligned} \quad (3.20)$$

Сполучивши вектор напруги статора з дійсною віссю координатної системи, тобто поклавши $u_{1\beta} = 0$ одержимо:

$$u_{1a} = \frac{d\psi_{1a}}{dt} - \omega_1 \psi_{1\beta}, \quad (3.21)$$

$$0 = \frac{d\psi_{1\beta}}{dt} + \omega_1 \psi_{1a}, \quad (3.22)$$

$$u'_{2a} = i'_{2a} R'_2 + \frac{d\psi_{2a}}{dt} - s\omega_1 \psi_{2\beta}, \quad (3.23)$$

$$u'_{2\beta} = i'_{2\beta} R'_2 + \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} + s\omega_1 \psi_{2a}, \quad (3.24)$$

Виразивши також електромагнітний момент по рівнянню (3.15) через складові векторів струмів й потокозчеплення:

$$M = \frac{3}{2} p_n (\psi_{1a} + j\psi_{1\beta}) \times (i_{1a} + ji_{1\beta}), \quad (3.25)$$

і застосувавши правило векторного добутку векторів, одержимо абсолютне значення моменту:

$$M = \frac{3}{2} p_n (\psi_{1a} \cdot i_{1\beta} - \psi_{1\beta} \cdot i_{1a}), \quad (3.26)$$

де

$$\begin{aligned} \psi_{1a} &= i_{1a} L_1 + i'_{2a} L_m \\ \psi_{1\beta} &= i_{1\beta} L_1 + i'_{2\beta} L_m \end{aligned} \quad (3.27)$$

Скориставшись вираженням (3.16), можна аналогічно одержати:

$$M = -\frac{3}{2} p_n (\psi_{2a} \cdot i'_{2\beta} - \psi_{2\beta} \cdot i'_{2a}), \quad (3.28)$$

Складові токи ротора можуть бути виражені через складові потокозчеплення в наступному виді:

$$\begin{aligned} i'_{2a} &= \frac{1}{L'_2} (\psi_{2a} - k_1 \cdot \psi_{1a}) \\ i'_{2\beta} &= \frac{1}{L'_2} (\psi_{2\beta} - k_1 \cdot \psi_{1\beta}) \end{aligned}, \quad (3.30)$$

де k_1 - коефіцієнт електромагнітного зв'язку статора;

$$k_1 = \frac{L_m}{L_1}, \quad (3.31)$$

$$L''_2 = L'_2 - \frac{L_m^2}{L_1} \approx L_{1\sigma} + L'_{2\sigma}, \quad (3.32)$$

З обліком (3.14) і (3.31) можна вирази моментів записати у формі, зручній для виводу передатних функцій двигуна:

$$M = -\frac{3}{2} p_n k_1 \psi_1 \times i'_2, \quad (3.33)$$

або

$$M = -\frac{3}{2} p_n k_1 (\psi_{1a} \cdot i'_{1\beta} - \psi_{1\beta} \cdot i'_{2a}), \quad (3.34)$$

Для двигуна з короткозамкненим ротором у рівняннях (3.23), (3.24) $u'_{2a} = u'_{2\beta} = 0$. Виразивши з рівнянь (3.30) ψ_{2a} та $\psi_{2\beta}$ і підставивши їх у рівняння (3.23), (3.24) отримаємо:

$$0 = i'_{2a} R'_2 + L'_2 \frac{di'_{2a}}{dt} - s \omega_1 L''_2 i'_{2\beta} - k_1 s \omega_1 \psi_{1\beta}, \quad (3.35)$$

$$0 = i'_{2\beta} R'_2 + L'_2 \frac{di'_{2\beta}}{dt} + s \omega_1 L''_2 i'_{2a}, \quad (3.36)$$

$$M = \frac{3}{2} p_n k_1 \psi_{1\beta} i'_{2a}, \quad (3.37)$$

Розглядаючи змінні величини в приростах щодо початкових значень $i'_{2a} = I'_{2a} + \Delta i'_{2a}$, $i'_{2\beta} = I'_{2\beta} + \Delta i'_{2\beta}$, $\omega_1 = \Omega_1 + \Delta \omega_1$, $s = S + \Delta i' s$, $M = M_{noch} + \Delta M$, одержимо рівняння для статичного режиму, що зв'язують початкові значення координат:

$$\frac{U_{1a}}{\Omega_1} = -\psi_{1\beta} = const, \quad (3.38)$$

$$0 = I'_{2a} R'_2 - S \Omega_1 L''_2 I'_{2\beta} - k_1 S \Omega_1 \psi_{1\beta}, \quad (3.39)$$

$$0 = I'_{2\beta} R'_2 + S \Omega_2 L''_2 I'_{2a}, \quad (3.40)$$

$$M_{noch} = \frac{3}{2} p_n k_1 \psi_{1\beta} I'_{2a}, \quad (3.41)$$

і рівняння для динамічного режиму, що зв'язують приріст координат:

$$\Delta i'_{2a} (T_{EL} p + 1) = \frac{s}{S_{kp}} \Delta i'_{2\beta} + \left(\frac{i'_{2\beta}}{S_{kp}} + \frac{k_1 \psi_{1\beta} \Omega_1}{R'_2} \right) \Delta s, \quad (3.42)$$

$$\Delta i'_{2\beta}(T_{EL} p + 1) = \frac{s}{S_{kp}} \Delta i_{2a} - \frac{i'_{2a}}{S_{kp}} \Delta s, \quad (3.43)$$

$$\Delta M = \frac{3}{2} p_n k_1 \psi_{1\beta} \Delta i'_{2a}, \quad (3.44)$$

де $T_{EL} = \frac{L_2}{R'_2}$ - електромагнітна постійна часу електродвигуна; $S_{kp} = \frac{R_2}{L''\Omega_1}$ -

критичне ковзання.

На підставі рівнянь (3.38) – (3.44) можна записати передатну функцію:

$$\frac{\Delta M(p)}{\Delta s(p)} = \frac{\frac{3}{2} p_n k_1^2 \frac{U_{1a}^2}{\Omega_1 R'_2} (T_{EL} p + 1) - M_{noch} \frac{s}{S_{kp}^2} (T_{EL} p + 2)}{(T_{EL} p + 1)^2 + \left(\frac{s}{S_{kp}}\right)^2}. \quad (3.45)$$

Вираження $\frac{3}{2} p_n k_1^2 \frac{U_{1a}^2}{\Omega_1 R'_2}$ у першому доданку чисельника (3.45) являє собою значення фіктивного пускового моменту $M_{п.ф.}$ обумовлене в результаті лінеаризації робочої частини механічної характеристики двигуна для прийнятих значень напруги статора Ω_1 :

$$M_{п.ф.} = M_{kp} \frac{2S}{S_{kp}} \Big|_{S=1} = \frac{2M_{kp}}{S_{kp}} = \frac{3}{2} p_n k_1^2 \frac{U_{1a}^2}{\Omega_1 R'_2}, \quad (3.46)$$

де $M_{kp} = \frac{3}{4} p_n k_1^2 \frac{U_{1a}^2 S_{kp}}{\Omega_1 R'_2}$ - критичний момент двигуна.

Момент M_{noch} у другому доданку чисельника (3.45) можна записати з урахуванням прийнятих допущень у вигляді:

$$M_{noch} = \frac{2M_{kp}}{\frac{S}{S_{kp}} + \frac{S_{kp}}{S}}. \quad (3.47)$$

З обліком (3.46) і (3.47) вираження (3.45) прийме наступний вигляд:

$$\frac{\Delta M(p)}{\Delta s(p)} = \frac{M_{п.ф.} \left[(T_{ел} p + 1) - \frac{\left(\frac{s}{S_{kp}}\right)^2}{1 + \left(\frac{s}{S_{kp}}\right)^2} (T_{ел} p + 2) \right]}{(T_{ел} p + 1)^2 + \left(\frac{s}{S_{kp}}\right)^2}. \quad (3.48)$$

Для робочої частини механічної характеристики двигуна можна прийняти:

$$\left(\frac{s}{S_{kp}}\right)^2 \ll 1, \quad (3.49)$$

тоді передатну функцію (3.48) можна записати в спрощеному виді:

$$\frac{\Delta M(p)}{\Delta s(p)} = \frac{M_{п.ф.}}{(T_{ел} p + 1)} \quad (3.50)$$

Представивши залежність ковзання електродвигуна від кутової частоти напруги статора в збільшеннях і виконавши лінеаризацію за умови, що в робочій області $S \ll 1$, одержимо:

$$\Delta s = \frac{\Delta \omega_1 - p_n \Delta \omega}{\Omega_1}. \quad (3.51)$$

Рівняння рівноваги моментів (3.19) може бути записано в збільшеннях у вигляді:

$$\Delta M - \Delta M_o = Jp \Delta \omega \quad (3.52)$$

На підставі отриманих виражень може бути складена структурна схема асинхронного двигуна при керуванні кутовою частотою напруги статора й за умови сталості потокозчеплення статора. Однак, це зручніше зробити, якщо представити координати двигуна в в.о., прийнявши на базові значення координат

їхнього значення в номінальному режимі: $M_{п.ф.н.}, \Omega_{1H}, U_{1aH}, \Omega_{0H} = \frac{\Omega_{1H}}{p_i}$, де

Ω_{0H} - синхронна кутова швидкість двигуна.

$$\text{Тоді} \quad \left[\frac{\Delta \omega}{\Omega_{0H}} \right] = \Delta \bar{\omega}, \quad \left[\frac{\Delta \omega_1}{\Omega_{1H}} \right] = \Delta \bar{\omega}_1, \quad \left[\frac{\Delta M}{M_{П.Ф.Н}} \right] = \Delta \bar{M}, \quad \left[\frac{\Delta M_o}{M_{П.Ф.Н}} \right] = \Delta \bar{M}_o,$$

$$\left[\frac{\Delta u_{1a}}{U_{1aH}} \right] = \Delta u_{1a}.$$

Передаточна функція (3.48) з обліком (3.51) запишеться так:

$$\frac{\Delta \bar{M}(p)}{\Delta \bar{\omega}_1(p) - \Delta \bar{\omega}(p)} = \left(\frac{\gamma}{\nu} \right)^2 \frac{(T_{EL} p + 1) - \frac{(\frac{s}{S_{kp}})^2}{1 + (\frac{s}{S_{kp}})^2} (T_{EL} p + 2)}{(T_{EL} p + 1)^2 + (\frac{s}{S_{kp}})^2}, \quad (3.53)$$

де $\gamma = \frac{U_{1a}}{U_{1aH}}$ - відносна напруга статора; $\nu = \frac{\Omega_1}{\Omega_{1H}}$ - відносна частота напруги статора.

Або в спрощеному виді:

$$\frac{\Delta \bar{M}(p)}{\Delta \bar{\omega}_1(p) - \Delta \bar{\omega}(p)} = \left(\frac{\gamma}{\nu} \right)^2 \frac{1}{T_{EL} p + 1}. \quad (3.54)$$

Відповідно на підставі рівняння (3.52) маємо:

$$\frac{\Delta \bar{M}(p)}{\Delta \bar{\omega}_1(p) - \Delta \bar{\omega}(p)} = \left(\frac{\gamma}{\nu} \right)^2 \frac{1}{T_M p}. \quad (3.55)$$

де $T_M = \frac{J \Omega_{OH}}{M_{П.Ф.Н.}}$ - механічна постійна часу двигуна.

Спрощена структурна схема асинхронного двигуна при керуванні кутовою частотою напруги статора, побудована на підставі виражень (3.54), (3.55), показана на рисунку 3.1.

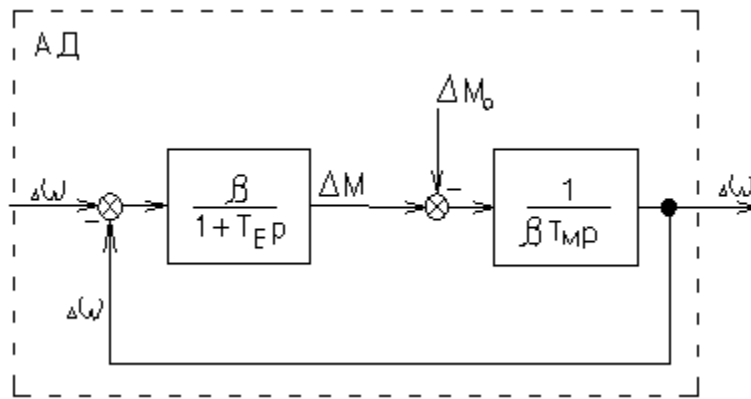


Рисунок 3.1 – Спрощена структурна схема асинхронного двигуна при керуванні кутовою частотою напруги статора

3.2. Розробка структурної схеми системи керування електроприводом конвеєру

Формування необхідних статичних і динамічних властивостей асинхронного частотно-регульованого електроприводу можливе лише в замкнутій системі регулювання його координат. Узагальнена функціональна схема подібної системи (рис. 3.2) окрім АД і керованого перетворювача частоти (ПЧ) містить регулятори Р і датчики Д змінних електроприводу.

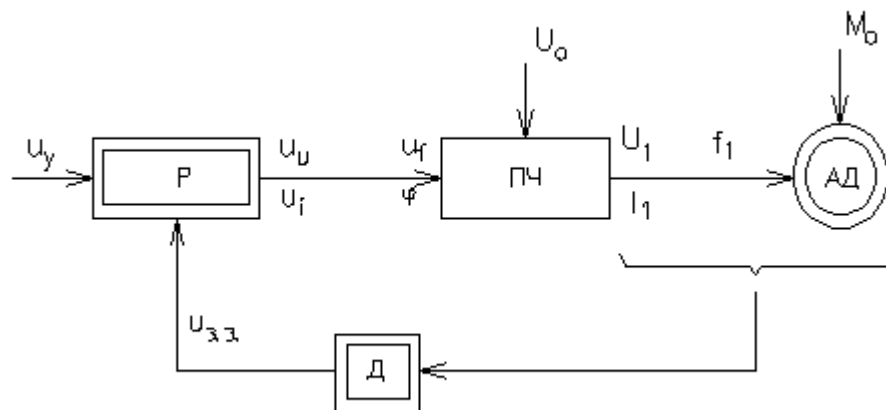


Рисунок 3.2 – Функціональна схема замкнутої системи ПЧ-АД з скалярним керуванням

Керуючими діями U_k на вході регуляторів можуть бути сигнали завдання будь-яких координат електроприводу – швидкості, кута повороту ротора АД,

струму статора, магнітного потоку і тому подібне. Збурюючими діями на електропривод можуть бути моменти сил опору M_o на валу АД або коливання напруги мережі U_o , що живить електропривод. Вхідними сигналами датчиків є змінні АД, доступні для безпосереднього їх вимірювання (частота, напруга і струм статора, швидкість ротора, магнітний потік в повітряному зазорі АД) або визначувані розрахунковим шляхом за допомогою математичної моделі АД (ЕДС, потокозчеплення статора, ротора і т.п.). Вихідні сигнали регуляторів, що залежні від керуючих дій, сигналів зворотних зв'язків $u_{3,3}$ і прийнятих алгоритмів регулювання, є сигналами керування частотою u_f , вихідною напругою u_u і струмом u_i , перетворювача частоти.

Розглянемо прилади замкнутих систем скалярного керування, найбільш поширених в промислових електроприводах.

Варіант функціональної схеми системи частотного керування АД із зворотним зв'язком по струму статора представлений на рис. 3.3. Тут сигнали i_{sa} та i_{sc} пропорційні миттєвим значенням струмів фаз А і С обмоток статора, з виходу датчиків струму ДСа і ДСс поступають у функціональний перетворювач струму ΦC , де формуються вихідні сигнали I_1 і I_{1a} , пропорційні відповідно діючому значенню струму статора і активної складової цього струму. У вузлах $\sum_1$, і $\sum_2$ підсумовуються сигнали керування і зворотних зв'язків, що поступають з функціональних пристроїв A_1 , A_2 і A_3 . Пристрій A_4 забезпечує проходження сигналу I_1 , на вхід A_3 лише при його перевищенні на суматорі $\sum_3$ сигналу I_{1max} , пропорційного значенню максимально допустимого діючого струму статора АД.

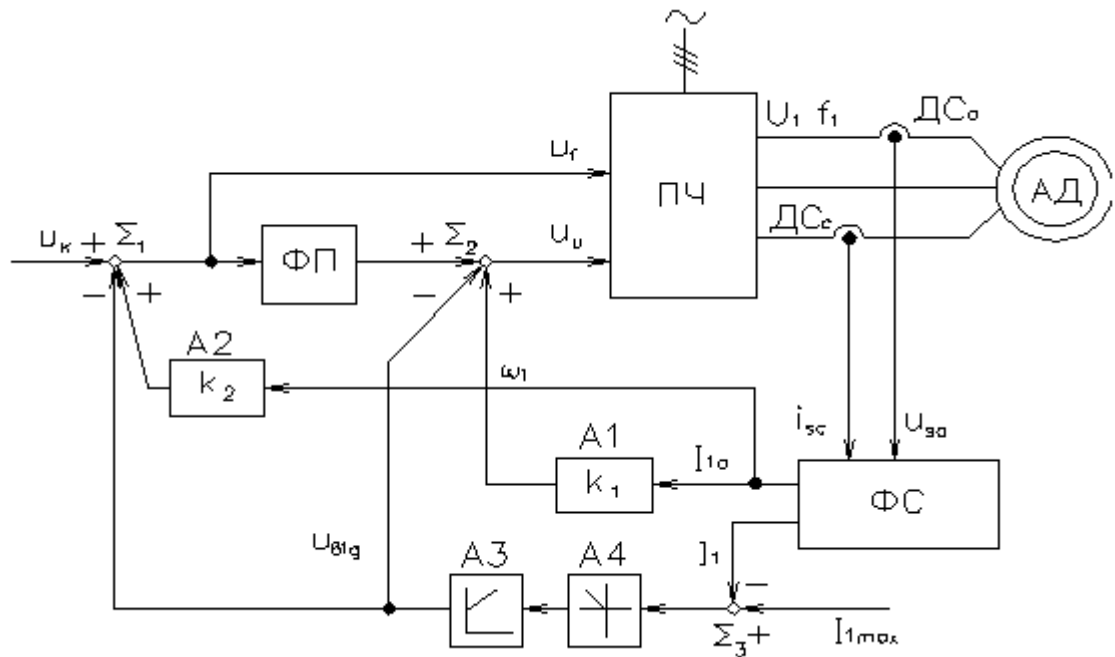


Рисунок 3.3 – Функціональна схема системи ПЧ-АД із зворотним зв'язком по струму статора

Призначення кожного з контурів зворотніх зв'язків і їх вплив на властивість електроприводу доцільно розглянути окремо. Так, при дії лише позитивного зворотного зв'язку із струму з боку A_1 у міру збільшення моменту статичного навантаження АД і відповідного збільшення струму статора на вхід суматора Σ_2 поступає додатковий сигнал u_i , що збільшує сигнал u_u . У результаті у міру збільшення струму статора збільшується і вихідна напруга ПЧ. При цьому його вихідна частота, визначувана сигналом u_f , залишається постійною. Підвищення напруги на обмотках статора АД сприяє компенсації падіння напруги на повному їх опорі і, в результаті, збільшенню потоку намагнічення АД.

Ступінь компенсації визначається коефіцієнтом посилення k_1 ланцюга позитивного зворотного зв'язку по струму. Очевидно, чим більше k_1 , тим більше буде потік при тому ж абсолютному ковзанні. Межа збільшення k_1 визначається умовами стійкості замкнутої системи керування і допустимими значеннями потоку намагнічення і напруги живлення АД.

У міру зниження частоти живлення повний опір ланцюгу намагнічення і, отже, падіння напруги в статорі АД зменшується. Тому для стабілізації і обмеження потоку намагнічення в замкнутій по повному струму системі ступінь компенсації падіння напруги, тобто коефіцієнт k_1 треба зменшувати у міру зниження частоти вихідної напруги ПЧ.

Подібний недолік відсутній при використанні зворотного зв'язку по активній складовій струму статора. Якщо в якості сигналу зворотного зв'язку прийняти активну складову струму статора, як показано на рис. 3.3, то постійність потокозчеплення статора зберігатиметься при незмінному коефіцієнті k_1 .

При частотному управлінні АД з подібним зворотним зв'язком по струму можлива реалізація механічних характеристик електроприводу з підвищеною переважувальною здатністю по моменту і жорсткістю, близькою до природної лише в невеликому діапазоні регулювання швидкості.

Вплив, позитивного зворотного зв'язку по струму з боку пристрою A_2 пов'язаний а одночасною дією на вихідну частоту і напругу ПЧ. За рахунок одночасного їх збільшення при зростанні навантаження на валу АД відповідно збільшується швидкість ідеального холостого ходу АД, забезпечуючи тим самим стабілізацію його швидкості, і зберігається постійність переважувальної здатності АД по моменту. Збільшення коефіцієнта посилення k_2 пристрою A_2 , сприяє підвищенню жорсткості механічної характеристики АД, обмежено умовами стійкості замкнутої системи керування і допустимими значеннями частоти і напруги живлення АД.

Сукупність позитивних зворотних зв'язків по струму з використанням пристроїв A_1 і A_2 за рахунок стабілізації швидкості останніми дозволяє помітно підвищити жорсткість механічних характеристик АД і при постійному статичному навантаженні збільшити діапазон регулювання швидкості вниз від номінальної до 10:1. Перевага подібних систем дозволяє у відсутності тахогенератора на валу АД.

Для захисту перетворювача частоти і двигуна від перевантажень по струму використовується режим струмового відсічення за допомогою суматора $\sum_3$ і

пристрою A_4 (рис. 3.3). При $I_1 \succ I_{1\max}$ на вхід ПІ-регулятора струму відсічення A_3 поступає сигнал перевищення струму статора вище допустимого. Вихідний сигнал A_3 $u_{\text{від}}$ може впливати як на зменшення вихідної напруги ПЧ (вузол $\sum_2$), так і одночасно на зменшення частоти живлення АД (вузол $\sum_1$).

При дії тільки на вихідну напругу перетворювача, за умови, що регулятор A_3 має інтегральний канал регулювання, за рахунок негативного зворотного зв'язку по струму перетворювач ПЧ з джерела напруги переходить в режим джерела струму. Тоді при постійності струму статора АД за рахунок більшого коефіцієнта зворотного зв'язку регулятора A_3 (для ПІ-регулятора – нескінченно великого), чим пристрою A_1 , при зниженні швидкості зменшуватимуться потік і момент двигуна, викликаючи перекидання механічної характеристики АД. Подібний режим роботи відсічення використовується лише спільно з одночасною дією на вихідну частоту перетворювача.

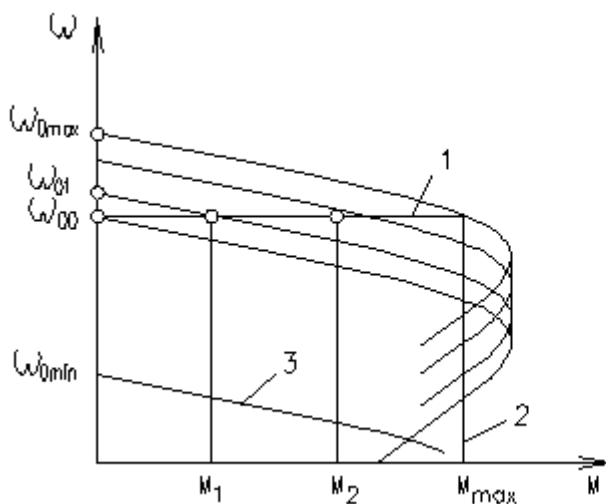
За рахунок поступаючого на суматор $\sum_1$ сигналу негативного зворотного зв'язку по струму статора (сильнішого, ніж з боку пристрою A_2) спільно із стабілізацією струму здійснюється зниження його частоти і, отже, швидкості ідеального холостого ходу АД, тим самим забезпечується постійність магнітного потоку, абсолютного ковзання і, у результаті, моменту двигуна. Проте статична і динамічна точність стабілізації вказаних змінних обмежена умовами стійкості замкнутих контурів регулювання.

Збільшення діапазону регулювання за швидкістю АД можна отримати за рахунок введення в розглянуту систему керування негативного зворотного зв'язку за швидкістю. Функціональна схема подібної системи при живленні від ПЧ, як джерела напруги приведена на рис.3.4. Тут канал негативного зв'язку за швидкістю включає тахогенератор ТГ, як датчик зворотного зв'язку, вузол $\sum_5$ підсумовування напруги керування швидкістю АД u_k і зворотному негативному зв'язку за швидкістю $u_{3.3}$, регулятор абсолютного ковзання A_5 , блок БО обмеження його вихідної напруги $u_{\text{ви}}$, а також вузол $\sum_4$ підсумовування напруги $u_{\text{ви}}$ і результуючої напруги u_{k1} з виходу суматора $\sum_1$.

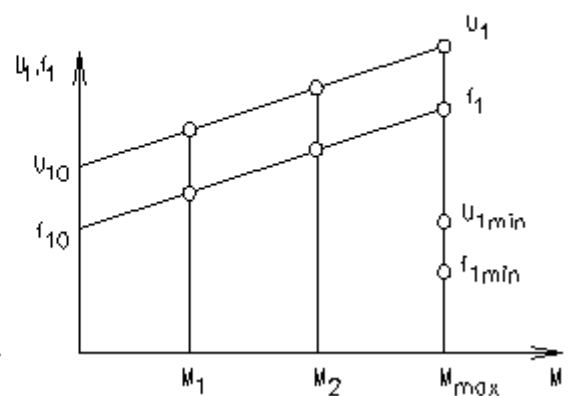
При цьому швидкість двигуна відновлюється до заданого значення ω_{00} , тобто забезпечується абсолютна жорсткість механічної характеристики АД (лінія 1 на рис. 3.5, а).

При перевищенні максимально допустимого струму статора АД $I_1 \geq I_{1\max}$ і, відповідно, $M \geq M_{\max}$), регулятор ковзання повинен бути виключений з роботи, наприклад, шляхом обмеження його вихідного сигналу u_{psi} на рівні $u_{psi\max}$ (рис. 3.5, в). При цьому вступають в роботу негативні зворотні зв'язки по струму статора з регулятором A_3 , забезпечуючи за рахунок одночасного зменшення частоти і напруги статора АД до їх мінімальних значень $f_{1\min}$ і $U_{1\min}$ обмеження моменту АД при $\omega = 0$ на рівні $M_{\max}$ (лінії 2 на рис. 3.5, а). Мінімальна синхронна швидкість двигуна $\omega_{0\min}$ відповідатиме значенням $f_{1\min}$ і $U_{1\min}$, а механічна характеристика – лінії 3 (див. рис. 3.5, а).

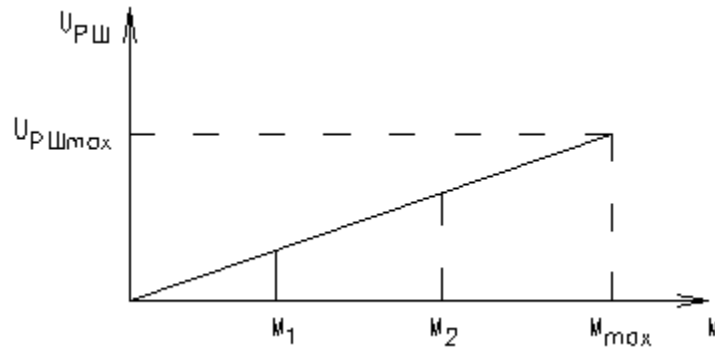
Стійкість і динамічні показники якості регулювання швидкості АД визначаються вибором параметрів пропорційної і інтегральної складаючі передавальних функцій регуляторів A_5 і A_3 .



а)



б)



в)

Рисунок 3.5 – Механічні характеристики (а), залежності вихідних напруги і частоти ПЧ (б), а також напруга регулятора швидкості (в) від моменту в системі ПЧ-АД із зворотним зв'язком за швидкістю

На рис. 3.6. представлена структурна схема лінеаризованої системи, функціональна схема якої приведена на рис. 3.4., при роботі АД на ділянці механічної характеристики в межах значень абсолютного ковзання $s_a < s_k$. На схемі прийняті наступні позначення: β - модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики АД $\beta = \frac{2M_k}{\omega_{0ном} \cdot s_k}$; T_E - еквівалентна електромагнітна

постійна часу ланцюгів статора і ротора АД, визначувана по формулі

$T_E = \frac{1}{\omega_{0ел.ном} s_k}$, де $\omega_{0ел.ном}$ - кутова швидкість електромагнітного поля АД при його номінальній частоті живлення $f_{1ном} = 50 \text{ Гц}$ ($\omega_{0ел.ном} = 2\pi f_{1ном} = 314 \text{ с}^{-1}$). Для

АД загальнопромислового виконання $s_k = 0,05 \dots 0,5$ (менші значення характерні для потужніших двигунів), $T_E = (0,006 \dots 0,06) \text{ с}$; $k_{ПЧ}$ - передавальний коефіцієнт ПЧ ($k_{ПЧ} = \frac{\Delta \omega_0}{\Delta u_{пу}} = \frac{2\pi \Delta f_1}{p_n \Delta u_{пу}}$). При роботі АД в зоні частот $f_1 \leq f_{1ном} = 50 \text{ Гц}$ і

номінальному сигналі керування перетворювачем $u_{k.ї \times \text{ї}}$ співвідношення

$\frac{\Delta f_1}{\Delta u_{пу}} = \frac{f_1}{u_{у \cdot ПЧном}}$; $T_{ПЧ}$ - постійна часу ланцюга керування ПЧ, яка при високих

частотах модуляції вихідної напруги промислових ПЧ (2...50 кГц) не перевищує 0,001 с.

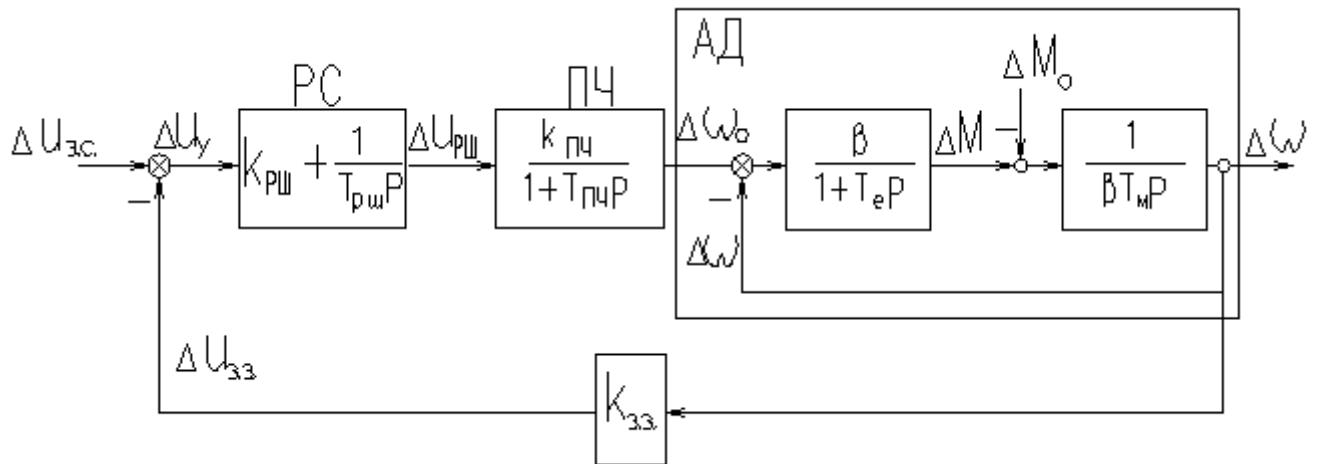


Рисунок 3.6 – Структурна схема системи ПЧ-АД із зворотним зв'язком за швидкістю

Передавальна функція ПІ-регулятор швидкості:

$$W_{рш}(p) = \frac{\Delta u_{рш}}{\Delta u_k} = k_{рш} + \frac{1}{T_{рш} p}.$$

Передавальна функція ланцюга зворотного зв'язку за швидкістю двигуна

$$W_{3.3}(p) = \frac{\Delta u_{3.3}}{\Delta \omega} = k_{3.3}$$

При номінальному сигналі керування електроприводом, рівному $u_{3.3,ном}$ і відповідною йому номінальній швидкості АД:

$$k_{3.3} = \frac{u_{3.3,ном}}{\omega_{ном}}.$$

Відповідно до структурної схеми АД його результуюча передавальна функція по відношенню до відхилення $\Delta \omega_0$:

$$W_{\delta}(p) = \frac{\Delta \omega}{\Delta \omega_0} = \frac{1}{T_E T_M p^2 + T_M p + 1}.$$

При $T_M \gg 4T_E$:

$$W_{\delta}(p) = \frac{1}{(T_{01} p + 1)(T_{02} p + 1)},$$

$$\text{де} \quad \frac{1}{T_{01}} = \frac{1}{2T_E} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4T_E}{T_M}} \right); \quad \frac{1}{T_{02}} = \frac{1}{2T_E} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4T_E}{T_M}} \right).$$

Якщо віднести постійні T_{02} і $T_{ПЧ}$ до малих некомпенсуючих постійних і як оцінку їх впливу прийняти $T_\mu = T_{02} + T_{ПЧ}$, то при настроюванні електроприводу на модульний опіум інтегральна постійна і коефіцієнт передачі пропорційної частини регулятора РШ визначається так:

$$T_{рш} = k_{з.з} k_{ПЧ} a_\mu T_\mu; \quad k_{рш} = \frac{T_{01}}{T_{рш}}.$$

4 АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КОНВЕЄРА

Для оцінки показників якості керування, за результатами побудови математичних моделей, проведемо моделювання. Побудова характеристик виконується за допомогою пакета MathLab.

Для аналізу динаміки будемо використовувати лінеаризовану структурну схему, отриману в розділі 3 (див.рис.3.6).

В базовому варіанті конвеєру використовується двигун серії 4А90L4У3, який має наступні характеристики:

Номінальна потужність.....	$P_{ном} = 2,2 \text{ кВт}$
Синхронна частота обертання.....	$n = 1500 \text{ об/хв.}$
Номінальне ковзання.....	$S_{ном} = 0,0051$
Критичне ковзання.....	$S_k = 0,33$
Відношення критичного моменту до номінального.....	$m_k = 2,4$
Момент інерції валу двигуна.....	$J_{дв} = 0,0056 \text{ кг м}^2$
Приведений до валу двигуна момент інерції конвеєру.....	$J_{мех} = 0,0035 \text{ кг м}^2$

Розрахуємо значення коефіцієнтів структурної схеми.

Номінальна частота холостого ходу:

$$\omega_{0_{НОМ}} = n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60}, \quad (4.1)$$

$$\omega_{0_{НОМ}} = 1500 \cdot \frac{2 \cdot 3.14}{60} = 157 \text{ с}^{-1}$$

Номінальна частота обертання двигуна:

$$\omega_{НОМ} = (1 - S_{НОМ}) \cdot \omega_{0_{НОМ}}, \quad (4.2)$$

$$\omega_{НОМ} = (1 - 0.0051) \cdot 157 = 156.2 \text{ с}^{-1}$$

Номінальний момент на валу АД:

$$M_{НОМ} = 9.570 \frac{P_{НОМ}}{n \cdot (1 - S_{НОМ})}, \quad (4.3)$$

$$M_{НОМ} = 9.570 \frac{2200}{1500 \cdot (1 - 0.0051)} = 14.11 \text{ Н м}$$

Критичний момент на валу АД:

$$M_k = m_k \cdot M_{НОМ}, \quad (4.4)$$

$$M_k = 2.4 \cdot 14.11 = 33.86 \text{ Н м}$$

Модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики АД:

$$\beta = \frac{2 \cdot M_k}{\omega_{0_{НОМ}} \cdot S_k}, \quad (4.5)$$

$$\beta = \frac{2 \cdot 33.86}{157 \cdot 0.33} = 1.31 \frac{\text{кГ} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$$

Еквівалентна електромагнітна постійна часу ланцюгів статора і ротора АД:

$$T_E = \frac{1}{\omega_{0_{ЕЛ.НОМ}} \cdot S_k}, \quad (4.6)$$

$$T_E = \frac{1}{314 \cdot 0.33} = 0.0097 \text{ с}$$

Параметри перетворювача частоти:

$$k_{ПЧ} = 7;$$

$$T_{ПЧ} = 0.001 \text{ с}$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості:

$$k_{3.3} = \frac{u_{3.3.HOM}}{\omega_{HOM}}, \quad (4.7)$$

$$k_{3.3} = \frac{1}{155,85} = 0,0064 \text{ В с}$$

Механічна постійна часу двигуна:

$$T_M = \frac{(J_{\partial\theta} + J_{Mex})}{\beta}, \quad (4.8)$$

$$T_M = \frac{(0,0013 + 0,0035)}{1,01} = 0,005 \text{ с}$$

Додаткові постійні часу:

$$T_{01} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot T_E} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot T_E}{T_M}}\right)}, \quad (4.9)$$

$$T_{01} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0,0082} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,0082}{0,005}}\right)} = 0,01 \text{ с.}$$

$$T_{02} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot T_E} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot T_E}{T_M}}\right)}, \quad (4.10)$$

$$T_{02} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0,0082} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,0082}{0,005}}\right)} = 0,182 \text{ с.}$$

$$T_\mu = T_{02} + T_{ПЧ}, \quad (4.11)$$

$$T_\mu = 0,182 + 0,001 = 0,183 \text{ с.}$$

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

$$T_{пу} = k_{3.3} k_{ПЧ} a_\mu T_\mu, \quad a_\mu = 4 \quad (4.12)$$

$$T_{пу} = 0,0064 \cdot 7 \cdot 4 \cdot 0,183 = 0,033$$

$$k_{pш} = \frac{T_{01}}{T_{pш}}, \quad (4.13)$$

$$k_{pш} = \frac{0,0085}{0,033} = 0,258$$

Знаючи всі параметри математичної моделі двигуна (рис. 4.1), а також системи керування зробимо її моделювання з метою оцінки показників якості керування.

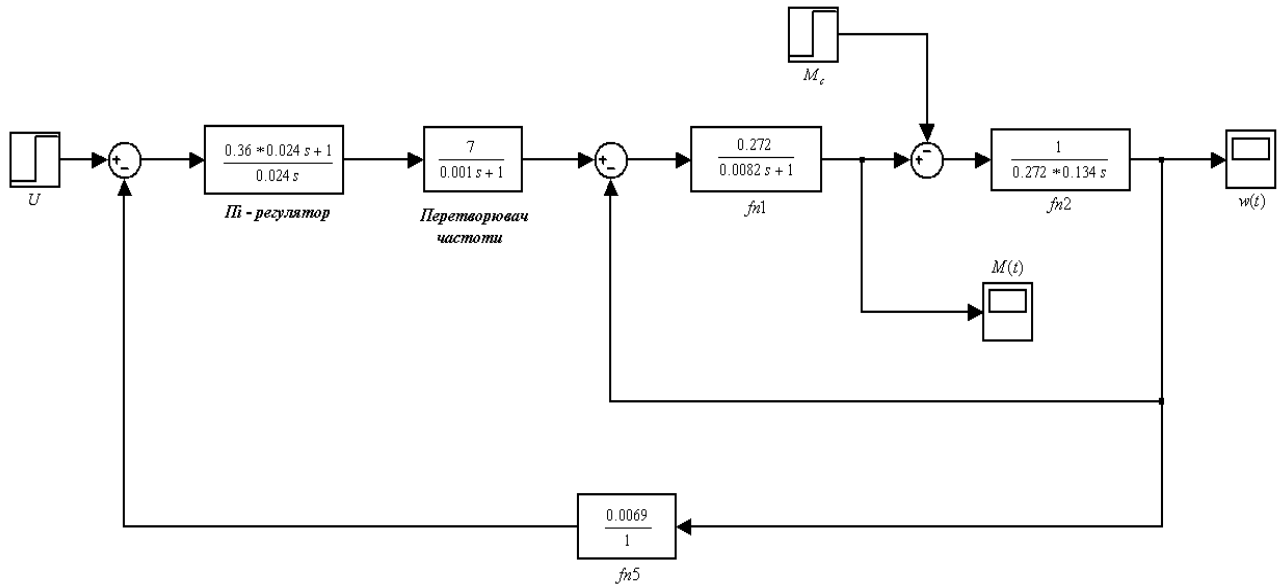


Рисунок 4.1 – Імітаційна модель системи керування

За результатами розрахунку отримані перехідні процеси при пуску конвеєру і стрибкоподібній зміні навантаження. Графіки перехідних процесів показані на рисунках 4.2 – 4.9.

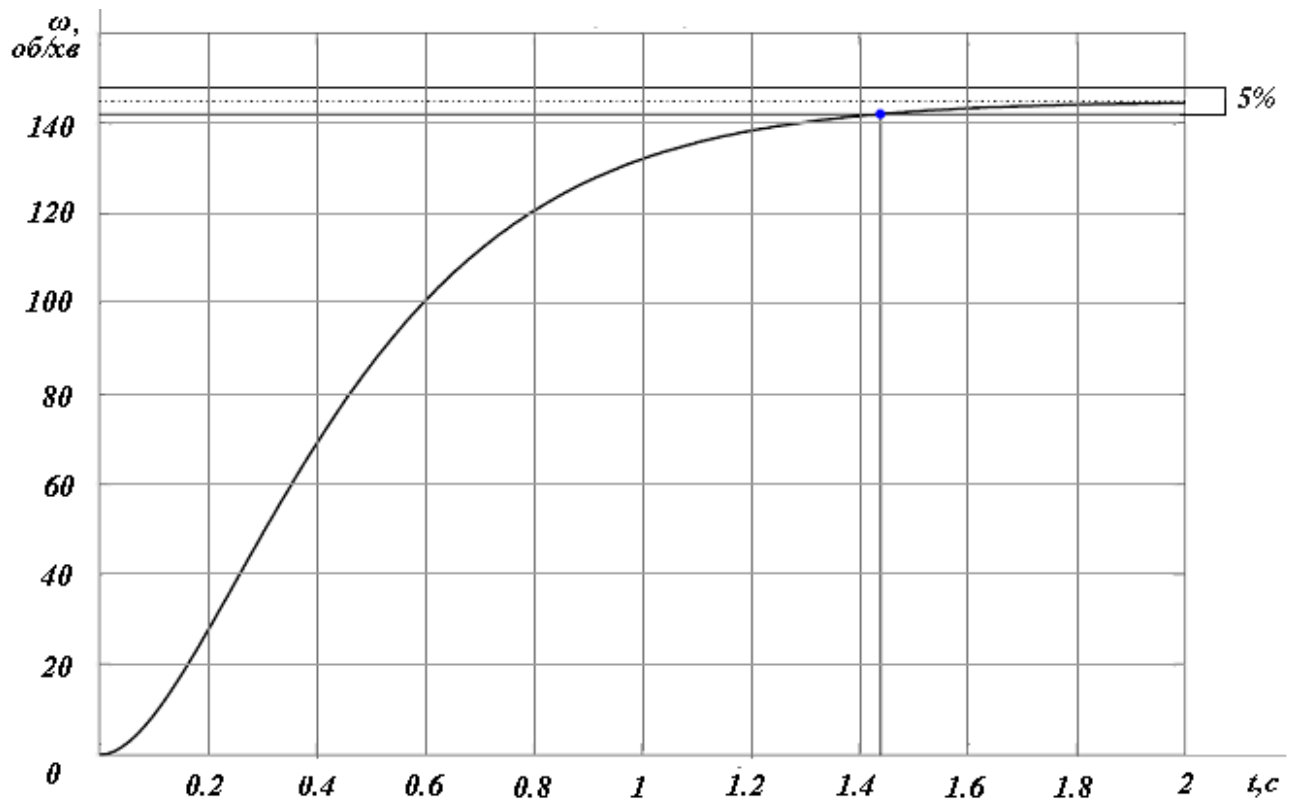


Рисунок 4.2 – Перехідний процес за кутовою швидкістю

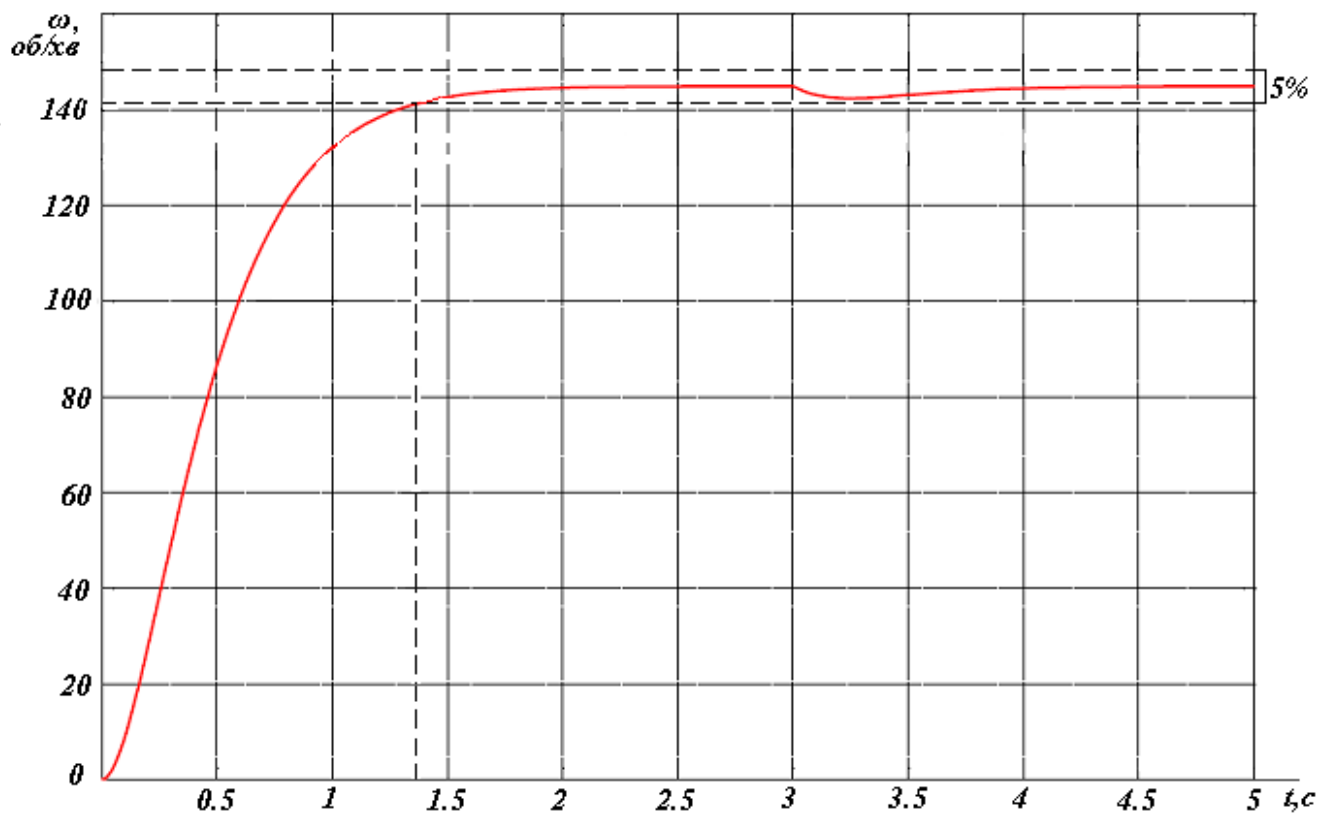


Рисунок 4.3 – Перехідний процес частоти обертання валу при стрибкоподібній зміні навантаження 25% $M_{\text{ном}}$

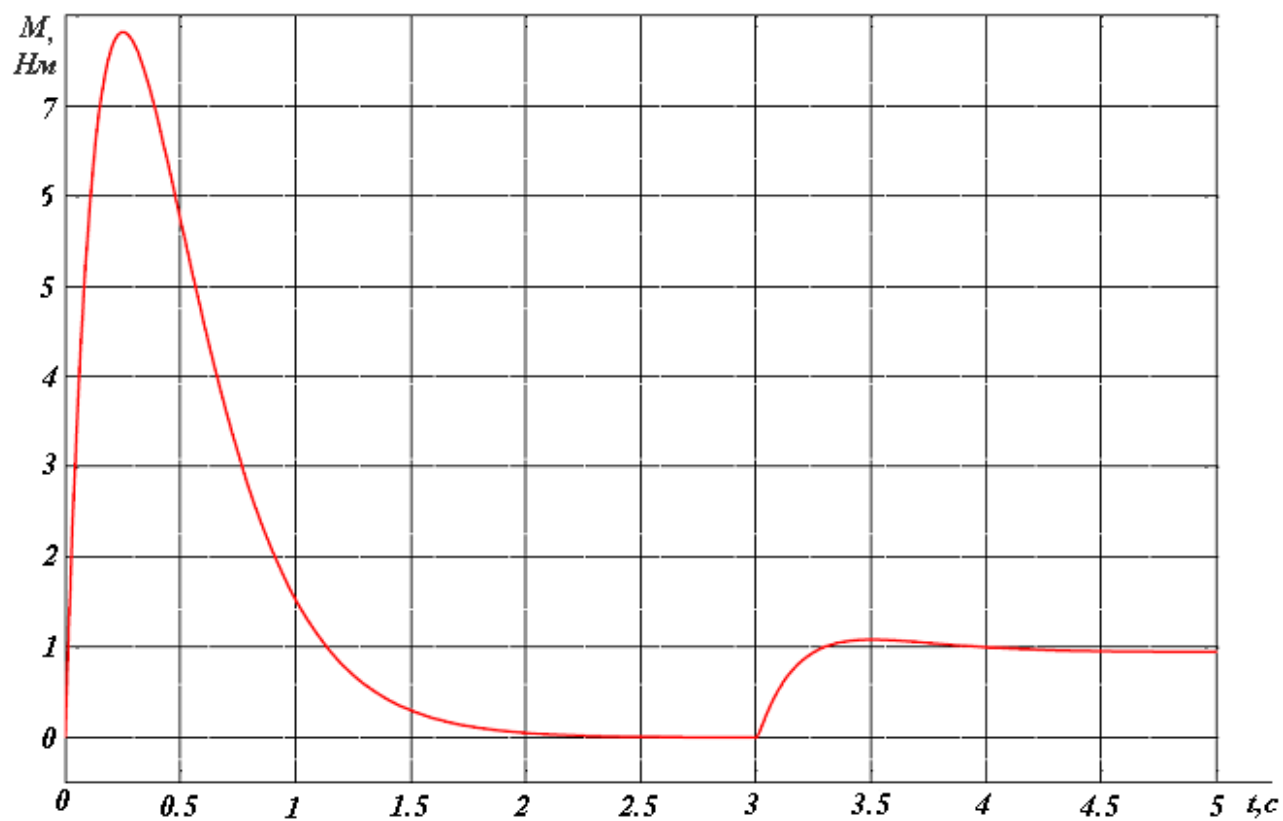


Рисунок 4.4 – Перехідний процес моменту на валу двигуна при стрибкоподібній зміні навантаження 25% $M_{\text{ном}}$

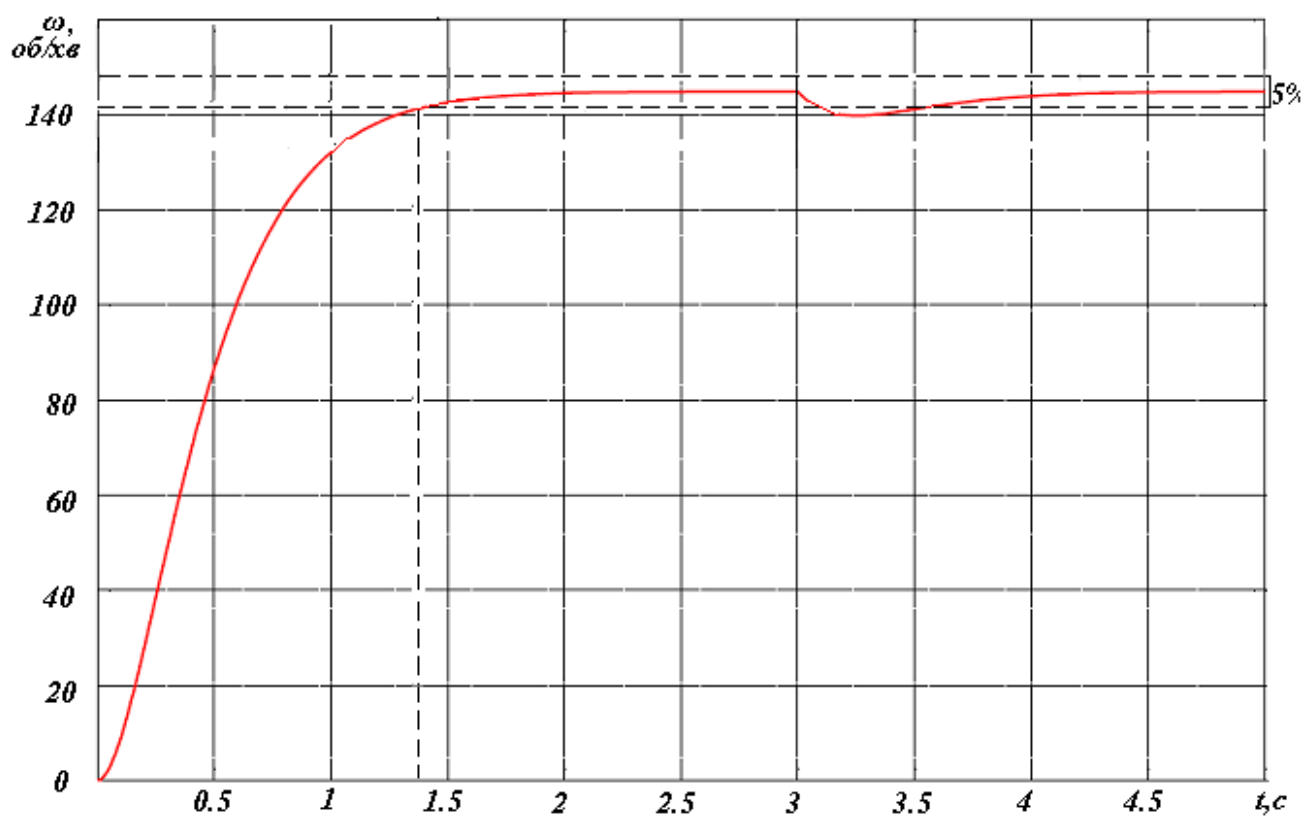


Рисунок 4.5 – Перехідний процес частоти обертання валу при стрибкоподібній зміні навантаження 50% $M_{\text{ном}}$

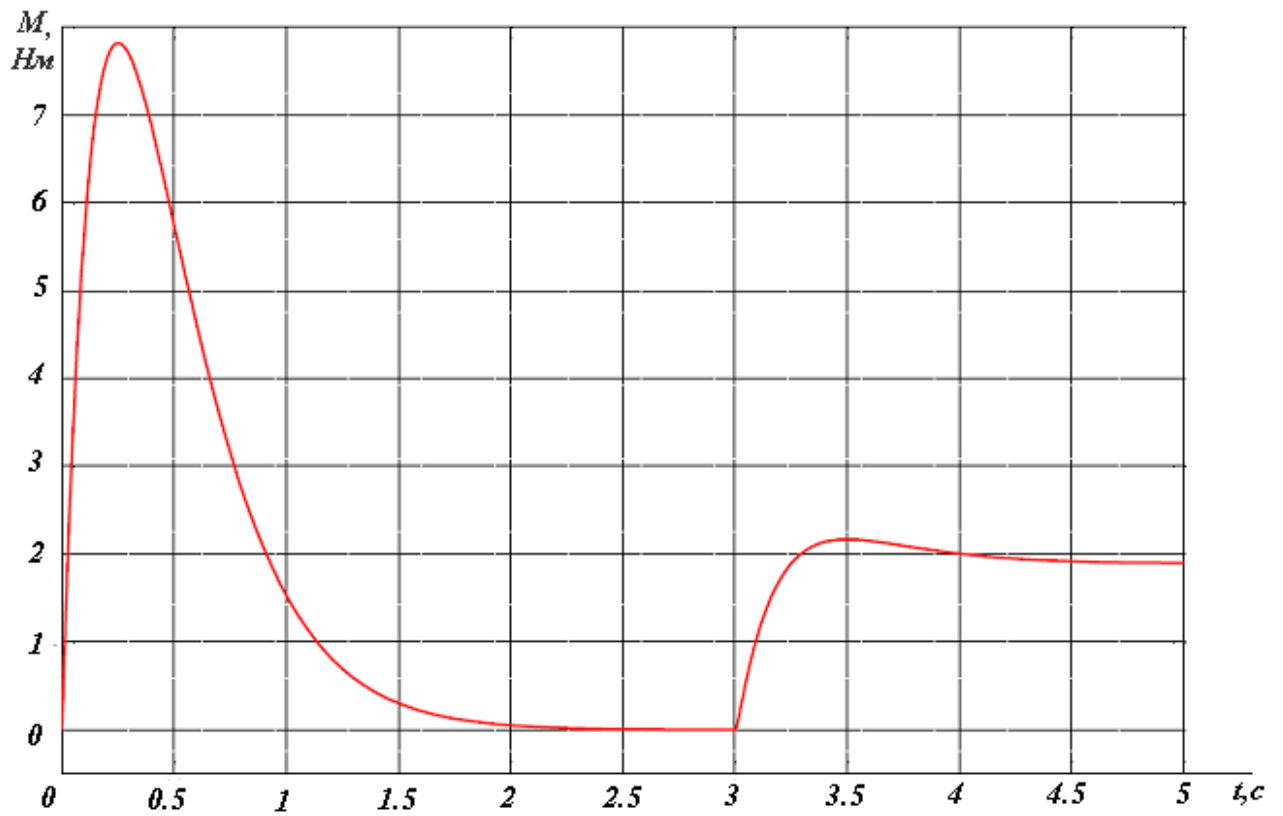


Рисунок 4.6 – Перехідний процес моменту на валу двигуна при стрибкоподібній зміні моменту $50\% M_{\text{ном}}$

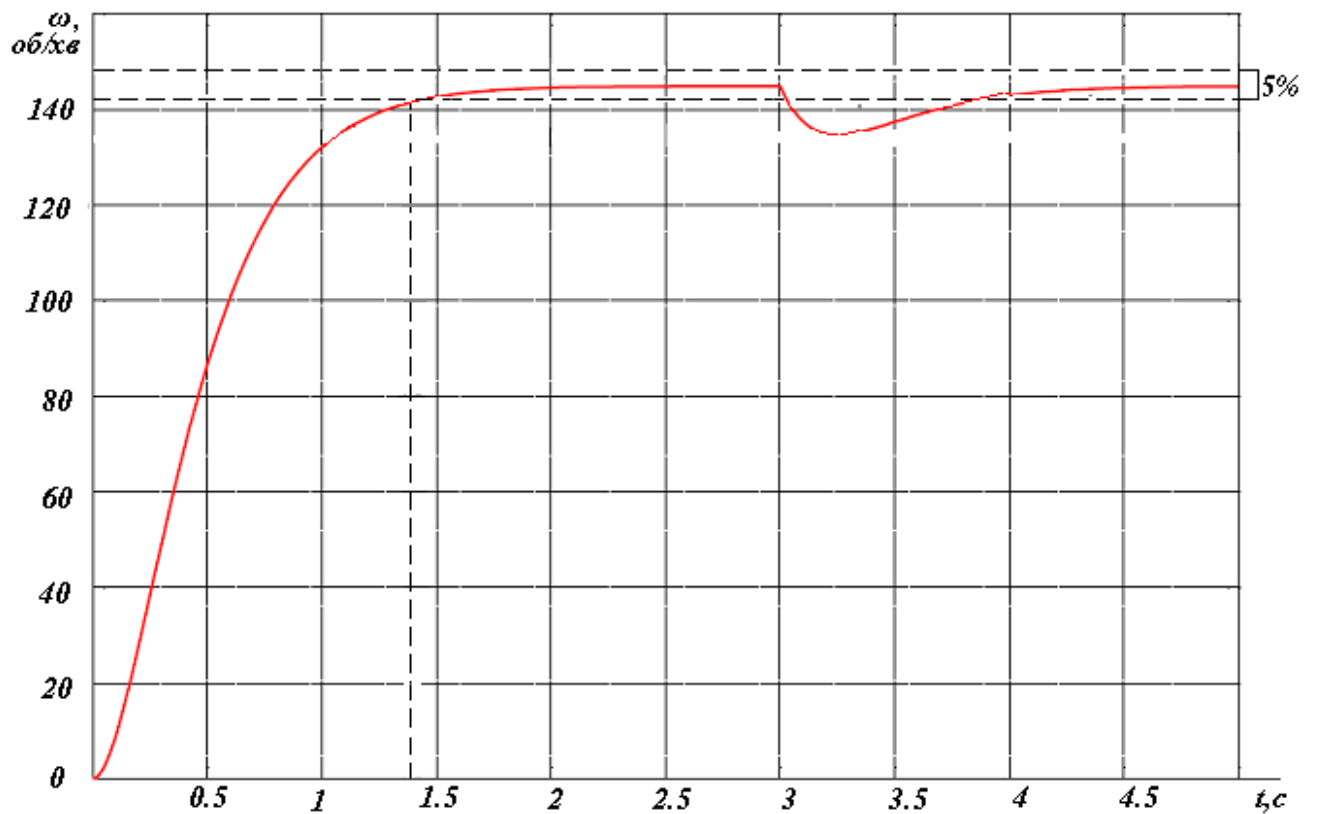


Рисунок 4.7 – Перехідний процес частоти обертання валу при стрибкоподібній зміні навантаження $100\% M_{\text{ном}}$

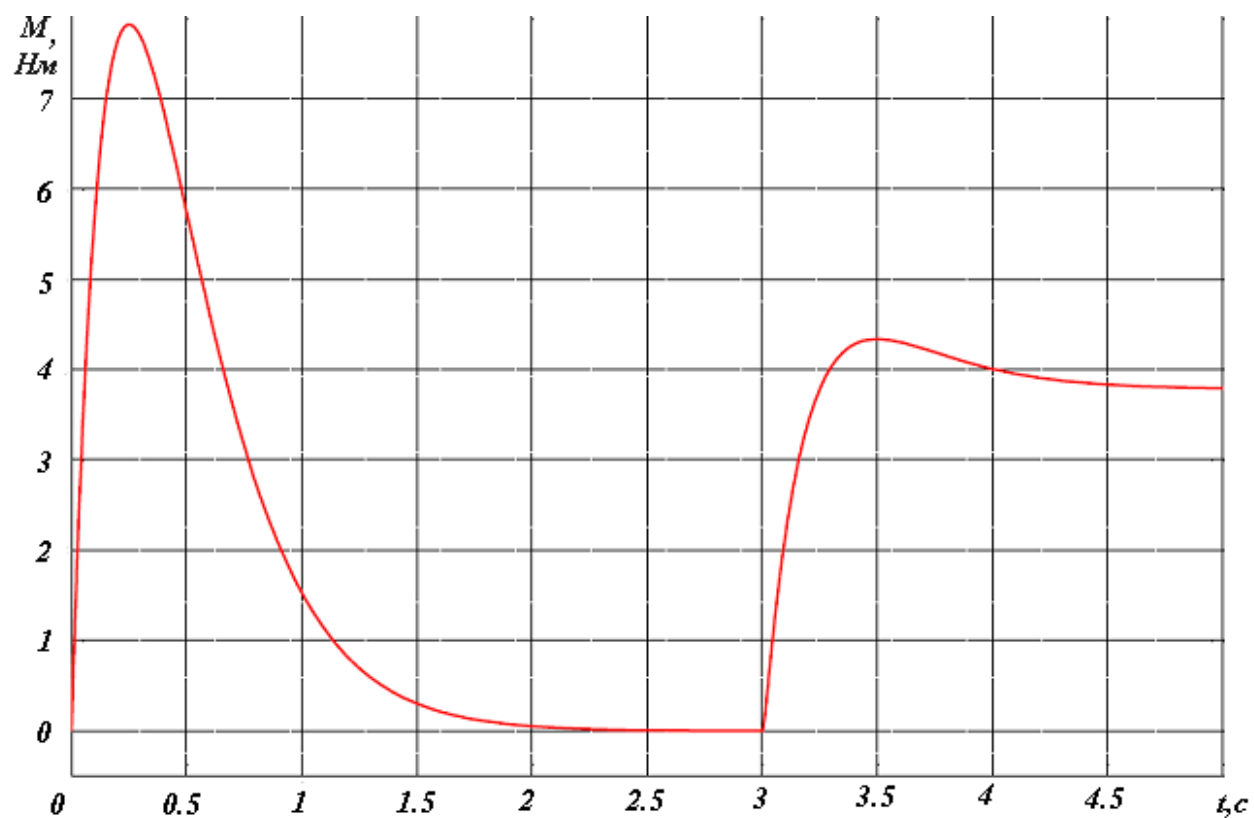


Рисунок 4.8 – Перехідний процес моменту на валу двигуна при стрибкоподібній зміні моменту 100% $M_{\text{ном}}$

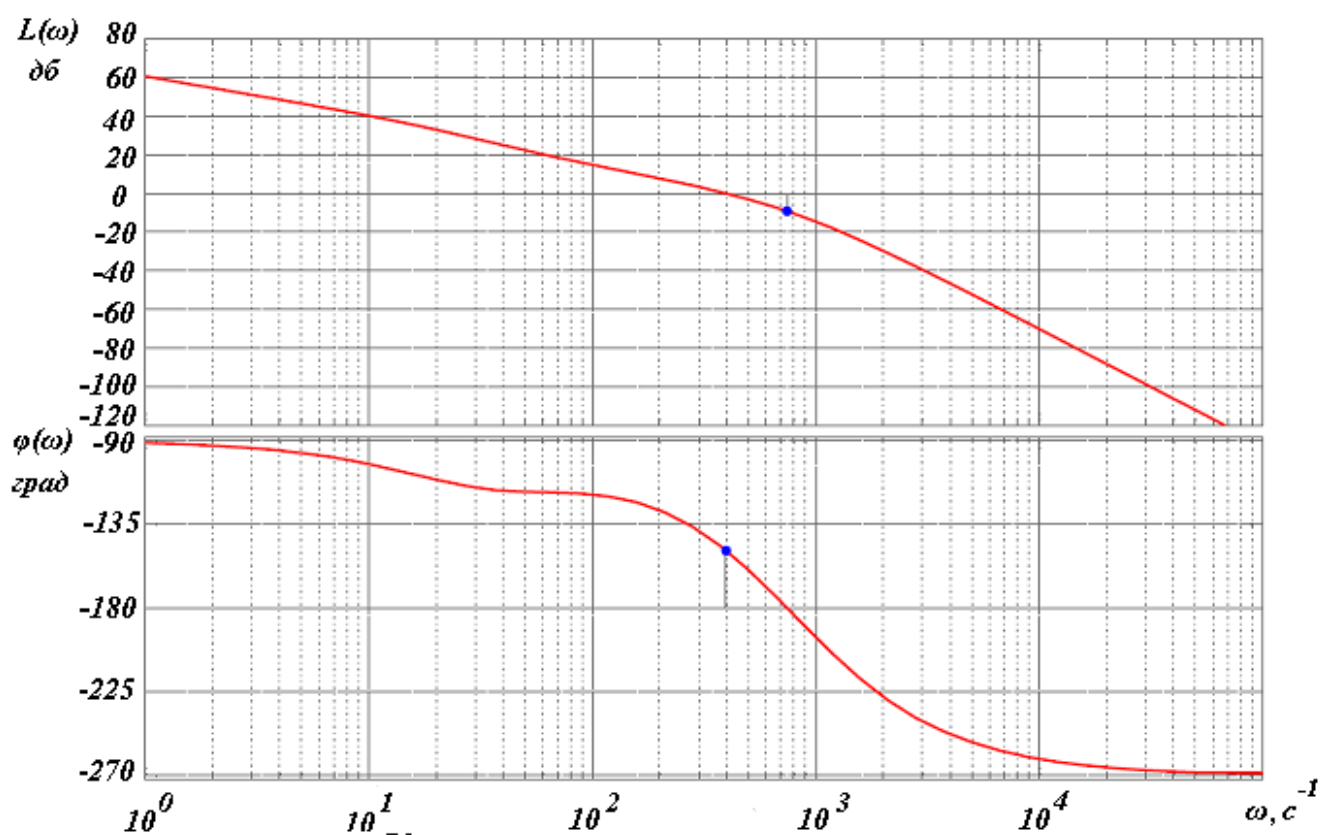


Рисунок 4.9 – ЛАЧХ та ЛФЧХ модернізованої САК

З графіків рис. 4.2.–4.9. 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 зробимо 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.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників, що впливають на людину для установки з автоматизованим електроприводом

Реальні виробничі умови характеризуються, як правило, наявністю певних небезпечних і шкідливих виробничих чинників. Небезпечним виробничим чинником називається такий виробничий чинник, дія якого на працюючого в певних умовах призводить до травми або до іншого раптового різкого погіршення здоров'я.

Шкідливим виробничим чинником називається такий виробничий чинник, дія якого на працюючого в певних умовах приводить до захворювання або зниження працездатності. Між небезпечним і шкідливим чинником часто не можна провести чіткої межі. Один і той же чинник може привести до нещасного випадку.

До небезпечних і шкідливих виробничих чинників, характерних для установки асинхронного приводу, відносяться:

- небезпека ураження електричним струмом;
- небезпека виникнення пожежі;
- дія шуму на організм людини;
- дія вібрації на організм людини;
- дія електромагнітних полів та випромінювань на організм людини.

Небезпека ураження електричним струмом.

До основних причин ураження електричним струмом відносяться такі, як випадковий дотик або наближення на небезпечну відстань до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою; поява напруги на конструктивних металевих частинах устаткування (корпусі, кожусі) в результаті пошкодження ізоляції і інших причин: поява напруги на відключених струмоведучих частинах, на яких працюють люди, з результаті помилкового включення установки; виникнення крокової напруги на поверхні землі в результаті замикання дроту на землю.

Небезпека ураження, оцінюється величиною струму, що проходить через тіло людини, або ж напругою дотику, залежить від ряду чинників: схеми включення людини в ланцюг, напруга мережі, схеми самого ланцюга режиму її нейтралі, ступені ізоляції струмоведучих частин від землі, також від величини місткості струмоведучих частин та інші.

Проходячи через організм електричний струм проводить термічну, електролітичну і біологічну дію.

Термічна дія виражається в опіках окремих ділянок тіла нагріві кровоносних судин і т.п.

Електролітична дія виражається в розкладанні крові і інших органічних рідин, що викликає значні порушення їх фізико-хімічних складів.

Біологічна дія є особливим специфічним процесом, властивим лише живій тканині. Воно виражається в подразненні і збудженні живих тканин організму, що супроводжується мимовільними судорожними скороченнями м'язів, у тому числі м'язів серця і легенів. В результаті можуть виникнути різні порушення в організмі, у тому числі порушення і навіть повне припинення діяльності органів дихання і кровообігу. Подразнююча дія струму на тканини організму може бути прямою, коли струм проходить безпосередньо по цих тканинах і рефлекторним, тобто через центральну нервову систему, коли шлях струму лежить зовні цих тканин.

Результат дії електричного струму залежить від ряду чинників, у тому числі від електричного опору тіла людини, величини і тривалості протікання через нього струму, роду та частоти струму і індивідуальних властивостей людини.

Величина струму, що протікає через тіло людини, є головним чинником, від якого залежить результат ураження; чим більше струм, тим небезпечніше його дія. Людина починає відчувати протікаючий через нього струм промислової частоти (50 Гц) щодо малого значення: 0,6 - 1,5 мА. Цей струм називається граничним відчутним струмом.

Тривалість протікання струму через тіло людини впливає на результат ураження унаслідок того, що з часом різко зростає струм за рахунок зменшення опору тіла і нагромаджуються негативні наслідки дії струму на організм.

Небезпека виникнення пожежі

Пожежі на промислових підприємствах представляють велику небезпеку для працюючих і можуть заподіяти величезний матеріальний збиток. Пожежа від установки з асинхронним приводом може відбутися в результаті прояву теплової і іскрової дії електричного струму в умовах, сприятливих для запалювання горючих матеріалів електроустановки, до яких відносяться тверді і рідкі ізоляційні матеріали. Основними причинами пожеж в електроустановках є перевантаження дротів, коротке замикання, великі перехідні опори в електричних мережах, електрична дуга або іскріння.

Дія шуму на організм людини

Шум надає на людину шкідливу фізіологічну дію, яка полягає не тільки в пошкодженні слухового апарату, але і в негативному впливі на нервову систему, викликаючи уповільнення психологічних реакцій. Під впливом виробничого шуму виникають різні професійні захворювання: порушується ритм серцевої діяльності, змінюється кров'яний тиск, погіршується діяльність органів дихання. Спостерігається також ослаблення пам'яті, уваги, гостроти зору. Таким чином, шум може бути причиною травматизму.

Під впливом шуму значно знижується продуктивність праці, причому знижується тим більше, чим складніше трудовий процес і чим більше в ньому елементів розумової праці.

Дія вібрації на організм людини

Вібрація являє собою механічне коливання твердих тіл. Джерелом вібрації є механічні, пневматичні, електричні ручні інструменти ударної і обертальної дії, різноманітне обладнання, що встановлюється без достатньої амортизації і віброізоляції, а також усі транспортні засоби і сільськогосподарські машини.

Шкідлива дія вібрації на організм залежить від сили і спектра вібрації, від часу безперервного контакту з вібруючими поверхнями, від стану організму і Індивідуальної чутливості. Посилюють дію вібрації високі рівні шуму, охолодження, вимушене положення тіла, м'язове напруження, монотонна робота, віддача інструментів ударної дії.

Розрізняють місцеву і загальну дію вібрації. Вібрація, що передається рукам працюючого ручним механізованим інструментом викликає місцевий вплив. При коливанні всього робочого місця дії вібрації підлягає увесь організм - загальний вплив вібрації. При місцевому впливові вібрації спостерігається спазм пальців, який поступово захоплює судини всієї руки, з порушенням чутливості (больової, вібраційної, температурної).

При вібрації загального впливу основні симптоми спостерігаються з боку вегетативної нервової системи: головний біль, запаморочення, безсоння, підвищена втомлюваність, дратливість, біль у попереку, шлунку, грудях. Можливі функціональні порушення в діяльності ендокринних залоз, порушення обмінних процесів.

5.2 Розрахунок захисного заземлення для електроустановки з автоматизованим електроприводом

Захисним заземленням називається навмисне з'єднання не струмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою, із заземлюючим пристроєм.

Корпуси електричних машин, джерел живлення, електричні апарати та інші частини, виконані з струмопровідних матеріалів, можуть опинитися під напругою при замиканні їх струмоведучих частин на корпус. Якщо корпус при цьому не має контакту із землею, дотик до нього так само небезпечне, як і дотик до фази.

Розрахунок виконаємо за допомогою методу коефіцієнтів використання електродів, що враховує однофазну структуру ґрунту і використовується для розрахунку простих заземлень.

Початкові дані для розрахунку: допустимий опір заземляючого пристрою за нормами $R_0 = 4 \text{ Ом}$; тип заземлювача - стрижньовий в землі; тип землі – глина; довжина стрижня $l = 5,5 \text{ м}$; діаметр стрижня $d = 0,012 \text{ м}$; глибина заставляння $t_0 = 0,5 \text{ м}$; сполучна смуга - протяжна смуга в землі; ширина смуги $b = 45 \text{ мм}$.

Виконання розрахунку:

1. Визначаємо допустимий опір заземлювача по нормах: $R_a = 4 \text{ Ом}$;
2. Визначаємо штомний опір ґрунту – для глини $\rho = 60 \text{ Ом м}$;
3. Для даного типу і розмірів заземлення визначаю опір розтіканню одного заземлювача.

Глибина установки стрижня, що дорівнює відстані від поверхні землі до середини стрижня

$$t = t_0 + 0.5l,$$

$$t = 0.5 + 0.5 \cdot 5.5 = 3.25,$$

де $t_0 = 0,5 \text{ м}$ – глибина установки стрижня від поверхні землі; $l = 5.5 \text{ м}$ – довжина стрижня; $d = 0,012 \text{ м}$ – діаметр стрижня

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \left(2 \cdot \frac{l}{d} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{4t+l}{4t-l} \right) \right), \quad (5.1)$$

$$R_1 = \frac{60}{2 \cdot 3.14 \cdot 5.5} \left(\ln \left(2 \cdot \frac{5.5}{0.012} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{4 \cdot 3.25 + 5.5}{4 \cdot 3.25 - 5.5} \right) \right) = 12.626$$

Оскільки опір розтікання одного заземлювача більший, ніж допустимий опір ($R_1 > R_0$), то необхідно приймати декілька заземлювачів, сполучених паралельно.

4. Визначаю необхідне число паралельне сполучених заземлювачів:

$$n = \frac{R_1}{\eta_\epsilon R_0}, \quad (5.2)$$

де η_ϵ - коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів, що враховує їх взаємне екранування.

Спочатку приймаємо $\eta_\epsilon = 1$, отримуємо $n = 2,97$. Отримане число заземлювачів округлюю до найближчого цілого $n = 3$ потім знаходжу фактичний коефіцієнт використання заземлювачів η_ϕ , приймаю $\eta_\phi = 0,76$ при розміщенні заземлювачів у ряд.

Визначаю фактичний опір вертикальних заземлювачів:

$$R_{B\phi} = \frac{R_1}{\eta_\phi \cdot n}, \quad (5.3)$$

$$R_{B\phi} = \frac{12.626}{3 \cdot 0.76} = 5.54 \text{ Ом}$$

5. Для зв'язку вертикальних заземлювачів застосовую заземлюючу смугу типу протяжна смуга В землі.

Параметри заземлюючої смуги: $b = 45 \text{ мм}$ – ширина смуги; l - довжина смуги, з'єднуючої вертикальні заземлювачі.

$$l = 1.05 \cdot (n - 1) \cdot l_3,$$

де l_3 - довжина вертикального заземлювача; n - кількість заземлювачів.

$$l = 1.05 \cdot (3 - 1) \cdot 5.5 = 11.55 \text{ м}$$

Опір розтіканню сполучної смуги визначаю як:

$$R_{1\Pi} = \frac{\rho \cdot \ln\left(2 \cdot \frac{l^2}{bt}\right)}{2 \cdot \pi \cdot l_3}, \quad (5.4)$$

$$R_{1\Pi} = \frac{60 \cdot \ln\left(2 \cdot \frac{11,55^2}{0,045 \cdot 0,5}\right)}{2 \cdot 3,14 \cdot 11,5} = 7,76$$

З урахуванням коефіцієнта використання смуги $\eta_z = 0,77$, опір смуги дорівнює:

$$R_{\Pi} = \frac{R_{1\Pi}}{\eta_z}, \quad (5.5)$$

$$R_{\Pi} = \frac{7,76}{0,77} = 10,08 \text{ Ом.}$$

6. Фактичний опір заземлюючого пристрою з вертикальних заземлювачів і сполучної смуги визначається як еквівалентний опір при паралельному з'єднанні:

$$R_3 = \frac{R_{B\Phi} \cdot R_{\Pi}}{R_{B\Phi} + R_{\Pi}}, \quad (5.6)$$

$$R_3 = \frac{5,54 \cdot 10,08}{5,54 + 10,08} = 3,58 \text{ Ом}$$

Отриманий еквівалентний опір менше допустимого. Таким чином, можна зробити висновок, що захисне заземлення розраховано вірно.

5.3 Розробка заходів по забезпеченню безпечної експлуатації електроустановок

Досвід показує, що для забезпечення безпечної, безаварійної і високопродуктивної роботи електроустановок необхідно разом з досконалим виконанням їх і оснащенням захисними засобами так організувати їх експлуатацію, щоб виключити всяку можливість помилок з боку обслуговуючого персоналу.

Основними заходами захисту від ураження струмом для установки з асинхронним приводом є забезпечення недоступності струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, для випадкового дотику; захисне розділення мережі; усунення небезпеки ураження при появі напруги на корпусі, кожусі і інших частинах установки, що досягається застосуванням подвійної ізоляції, вирівнюванням потенціалу, захисним заземленням, зануленням, захисним відключенням та інші; вживання захисних засобів; організація безпечної експлуатації установки. В процесі експлуатації установки з асинхронним приводом нерідко виникають умови, при яких навіть найдосконаліше їх виконання не забезпечує безпеки працюючого і потрібне застосування спеціальних захисних засобів – переносних приладів та пристосувань. До захисних засобів відносяться:

- ізолюючі захисні засоби: діелектричні гумові рукавички, інструмент з ізольованими рукоятками, струмошукачі, діелектричні калоші, килимки, ізолюючі підставки;
- огорожуючі захисні засоби: щити, калоші, килимки, ізолюючі накладки, тимчасові захисні заземлення;
- оберігаючі захисні засоби: захисні окуляри спеціальні рукавиці.

До заходів попередження виникнення пожеж відносяться вживання плавких запобіжників, автоматичних вимикачів, що здійснюють захисне відключення, а також правильний монтаж мереж, машин і апаратів відповідно до вимог правил пристрою електроустановок

Для зниження шуму в установці з асинхронним приводом можуть бути застосовані наступні методи:

- зменшення шуму в джерелі шляхом вдосконалення технологічних процесів і устаткування;
- зміна спрямованості випромінювання;
- раціональне планування цеху;

- акустична обробка приміщення при вживанні звукопоглинальних матеріалів;
- зменшення шуму на шляху його розповсюдження, використовуючи звукоізоляційні матеріали.

Для профілактики шкідливого впливу вібрації потрібно дотримуватися визначених санітарно-гігієнічних правил: час роботи з інструментами, що вібрують не повинен перевищувати 2/3 від часу робочої зміни, температура в приміщенні повинна бути не нижчою 16°C. Зменшення часу контакту з вібруючими інструментами досягається шляхом оволодіння суміжними спеціальностями, які не пов'язані з впливом вібрації. Для профілактики професійних захворювань рекомендується лікувальна гімнастика, масаж, гідропроцедури, прийом вітамінів В і С.

Електромагнітні поля дуже сильно впливають на людський організм. Вони негативно впливають майже на усі системи організму. Тому треба створювати певні методи захисту від їхньої дії. Найпоширенішими з таких методів є такі:

- зменшення щільності потоку енергії, якщо дозволяє даний технологічний процес або обладнання;
- захист часом (тобто обмеження часу знаходження у зоні джерела ЕМП).
- захист відстанню;
- екранування робочого місця чи джерела;
- раціональне планування робочого місця;
- застосування засобів попереджувальної сигналізації;
- застосування засобів особистого захисту.

Для зменшення впливу електромагнітних полів на персонал, який знаходиться у зоні дії деяких радіоелектронних засобів необхідним є ряд захисних заходів: організаційні, інженерно-технічні та лікувально-профілактичні.

Слід сказати, що ще на етапі проектування взаємне розміщення об'єктів має забезпечено таким чином, щоб інтенсивність опромінення була мінімальною. Також треба заздалегідь попіклуватися про зменшення часу перебування персоналу у зоні опромінення. Потужність джерел випромінювання повинна бути

найменшою з можливих. Крім того треба вимагати від керуючих органів дотримування державних стандартів України та не порушувати їх норм.

5.4 Заходи безпеки при роботі з мінеральними добривами

При роботі з добривами треба дотримуватись заходів особистої безпеки: працювати в рукавицях, масках, бо багато добрив подразнюють шкіру і дихальні шляхи.

До роботи з мінеральними добривами допускаються особи не молодші 18 років, визнані придатними за станом здоров'я і мають посвідчення на право роботи на відповідних машинах.

Роботи на складах мінеральних добрив проводять у спецодязі з бавовняної пілонепроникної тканини, рукавицях і чоботах.

Робочі місця повинні бути освітлені. Перед початком роботи перевіряють справність машин і механізмів. Технічне обслуговування, регулювання і ремонт машин і механізмів виконують тільки при виключених передачах і непрацюючих двигунах.

Особливі вимоги необхідно виконувати при роботі на конвеєрах. Живильний кабель установок підключають до електромережі напругою 330 В. При цьому особливу увагу звертають на правильність і надійність підключення жили заземлюючого кабелю. Усі механізми випробують без навантаження. Забороняється залишати ходові електродвигуни під напругою. При короточасних зупинках і зупинках для огляду механізму відключають головний автомат.

Забороняється знаходитися перед рушієм під час роботи; змазувати і чистити конвеєр на ходу; розкривати шухляди з електроапаратурою; ремонтувати механізм, не відключивши неї від живильного стовпчика; експлуатувати несправну машину; транспортувати машину, не відключивши живильний кабель.

Перед роботою на навантажувачах визначають відповідність маси вантажу вантажопідіймаючої машини. При роботі стежать за рівномірним розподілом вантажу по ширині і довжині вилок захоплення; за тим, щоб вантаж не виступав

за межі вил більш ніж на одну третину його довжини і щоб при русі рама вантажопідійомника був нахилений, а вантаж знаходився на висоті не більш 30-40 см від рівня підлоги. Не можна піднімати й опускати вантаж під час руху. Забороняється перевозити людей на піддонах і вилах навантажувача. Водій зобов'язаний сповільнювати рух навантажувача і давати сигнали при проїзді повз двері і через ворота, а також на поворотах. Перш ніж змінити напрямок руху (уперед, назад), водій повинен зупинити навантажувач.

Водій повинен уважно стежити за проїзною частиною при русі; виїжджати на платформу переднім ходом і по попередньо випробуваному на міцність трапові або настилові.

Для регулювання і змащення вузлів транспортерів необхідні повна їхня зупинка і вимикання електроживлення. Стрічку транспортерів містять у чистоті, не допускаючи її замаслювання. Забороняється переміщати транспортер у робочому положенні, очищати стрічку руками при його роботі, а також накидати неї на ведучий ролик.

Перед початком роботи оглядають місця кріплення основних вузлів, перевіряють, чи є огорожувальні щитки і захисні кожухи, переводять пристрій для видалення мішкотари в робоче положення.

Категорично забороняється: перевозити людей, працювати в складах без штучної вентиляції, без захисних кожухів і огорожувальних щитків, працювати без засобів індивідуального захисту (одягу з пилонепроникної тканини, гумових чоботів і рукавичок, респіраторів).

При роботі з електроустаткуванням необхідно дотримувати Правила технічної експлуатації і безпеки обслуговування електроустановок промислових підприємств напругою 1000 В.

При розвантажувальних роботах залізничний вагон загальмовують стояночним гальмом або під колеса підкладають башмаки. Відкривати верхній люк у вагона-цементовоза з пневморозвантажувачем дозволяється тільки при відсутності тиску повітря в ємності. Контрольно-вимірювальну апаратуру встановлюють на видному місці і добре освітлюватись. Забороняється працювати

з несправними манометрами. Перевіряти і пломбувати манометр потрібно не рідше одного разу на рік, а також після кожного ремонту. Не рідше одного разу в три місяці перевіряють прилад контрольним манометром, результати перевірки заносять у спеціальний журнал.

Забороняється працювати на несправному розвантажнику, відкривати люки камери шнека, камери фільтрів і змішувальної камери до повної зупинки двигуна і зниженні тиску в змішувальній камері до нуля; включати електродвигун приводу шнека при заповненому добривами корпусі шнека; включати вакуум-насос без води; включати в зимовий час електродвигун вакуум-насоса без попереднього провертання його ротора вручну; працювати з вакуум-насосом, якщо у воді, що виходить з водовіддільного бака, знаходяться добрива.

При обслуговуванні фільтра рукавного категорично забороняється замінювати рукава в працюючій секції фільтра; відкривати нижній люк при відкритих кришках на верхній площадці без встановленого попереджувального напису «Не входити»; проводити які-небудь роботи без огороження площадок і сход.

Забороняється використовувати стаціонарний компресор, що не має аварійної сигналізації, не постачений манометром, попереджувальним клапаном і термометром, при висвітленні менш 60 лк, відсутності заземлення, після закінчення терміну дії останніх іспитів.

Перед входом на склад приміщення попередньо провітрюють. У ньому не можна курити, користуватися відкритим вогнем, споживати їжу і воду. Обслуговуючий персонал знаходиться в приміщенні складу тільки під час виконання усередині складських робіт. Весь інший час склад повинен бути закритий на замок. Якщо під час роботи використовують респіратор, то через щогодини роблять 10-хвилинну перерву для відпочинку на свіжому повітрі.

Після роботи з мінеральними добривами знімають спецодяг, протирають рушником шию, обличчя і руки, потім миють їх водою з милом або приймають душ.

При отруєнні добривами потерпілого виводять з зони небезпеки, звільняють від забрудненого та тісного одягу, забезпечують приплив свіжого повітря, не даючи охолоджуватися тілу. При втраті свідомості дають вдихнути нашатирний

спирт. В усіх випадках отруєння викликають лікаря або відвозять потерпілого в найближчу лікарню.

ВИСНОВКИ

Основне завдання кваліфікаційної роботи – розробка системи автоматичного керування електроприводом перевантажувача мінеральних добрив.

У відповідності до мети кваліфікаційної роботи був проведений аналіз частотних перетворювачів, проведений вибір та аналіз використаного автоматизованого частотного електропривода MICROMASTER 420.

Розроблена математична модель системи керування електроприводом перевантажувача мінеральних добрив, отримані функціональна та структурна схема для аналізу динаміки, розраховані коефіцієнти елементів структурної схеми.

За допомогою програми Matlab 6.5 проведений аналіз динамічних характеристик електроприводу, який показав доцільність використання отриманої системи керування.

Використання такої системи автоматичного керування дозволяє:

1. керувати роботою електропривода в програмному режимі;
2. підвищити продуктивність установки;
3. можливість комплексної автоматизації процесів на підприємстві.

Приведений розрахунок економічної ефективності показав доцільність прийнятих рішень. Так рентабельність модернізованої системи керування приводом подач складає 22,5%, її окупність 4,4 рази.

Використання такої системи автоматичного керування дозволяє виконувати вимоги охорони праці і навколишнього середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Василевський, О. М. Нормування показників надійності технічних засобів: навчальний посібник / О. М. Василевський, В. О. Поджаренко. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 129 с.
2. Васьковський, Ю. М. Польовий аналіз електричних машин. Навчальний посібник / Ю. М. Васьковський. – Київ: НТУУ «КПІ», 2007. – 190 с.
3. Войтех, О. А. Вибір та адаптація серійних асинхронних двигунів для роботи від джерел регулюємої частоти / О. А. Войтех, О. М. Попович // Пр. Інституту електродинаміки НАН України. – 2003. – № 3. – С.34–39.
4. Електроніка та мікросхемотехніка [Електронний ресурс]: навчальний посібник / А. А. Щерба, К. К. Побєдаш, В. А. Святненко: – Київ: НТУУ «КПІ», 2013. – 360 с.
5. Електропривод: Підручник / Ю. М. Лавріненко, О. С. Марченко, П. І. Савченко, О. Ю. Синявський, Д. Г. Войтюк, В. П. Лисенко; За ред. Ю. М. Лавріненка. Видавництво «Ліра-К». – К., 2009. – 504 с.
6. Жидецький, В. Ц. Основи охорони праці: Підручник / В. Ц. Жидецький – Львів: Афіша, 2002. – 128 с.
7. Казачковський, М. М. Комплектні електроприводи. Навчальний посібник / М. М. Казачковський – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003. – 226 с.
8. Матвійчук, В. А. Електропривод виробничих машин і механізмів. Навчальний посібник / В. А. Матвійчук, М. І. Стаднік О. О. Рубаненко. – Вінниця: ВНАУ, 2016. – 344 с.
9. Попович, М. Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, І. Б. Клепиков. За ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. – Київ: «Либідь», 2005. – 680 с.
10. Шульга, О. В. Автоматизоване керування електроприводами. Навчальний посібник / О. В. Шульга. – Полтава: ПолтНТУ, 2007. – 293 с

11. Khodja, D. E. Three-phases model of the induction machine taking account the stator faults / D. E. Khodja, A. Kheldoun // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2009. – № 28. – P. 157–160.

12. Kooa, M.-S. Universal control of nonlinear systems with unknown nonlinearity and growth rate by adaptive output feedback / M.-S. Kooa, H.-L. Choi, J.-T. Lima // Automatica. – 2011. – Vol. 47. – P. 2211-2217.

13. Landau, I. Adaptive control: algorithms, analysis and applications (communications and control engineering) / Landau I., Lozano R., M'Saad M., Karimi A. – Springer, 2011. – 587 p.