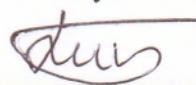


Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри


(підпис)

I. С. Білюк

«20» 12 2024 р.

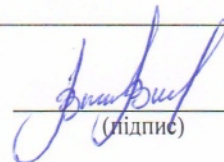
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня магістра

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

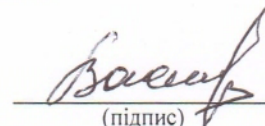
освітня програма Електромеханічні системи автоматизації та електропривод
(назва освітньої програми)

на тему: Модернізація системи керування електропривода конвеєра
завантаження зерна

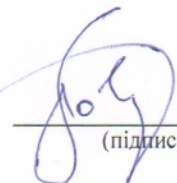
Виконав: студент групи 6371м
Волохов Володимир Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)


(підпис)

Керівник доц. каф. автоматики, к.т.н.,
доцент Васильєв О.Г.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

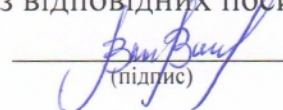

(підпис)

Рецензент доцент кафедри СЕЕС,
к.т.н., доцент С.М.Новогорецький
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)


(підпис)

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

Студент


(підпис)

м. Миколаїв – 2024 року

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра складається із 98 сторінок: 87 сторінок пояснювальної записки, 5 розділів, 9 таблиць, 21 рисуноків, 18 літературних джерел, 1 додатку на 11 сторінках.

Ключові слова: автоматизація, аналіз динаміки, електропривод, математична модель, методологія дослідження, норія ківшева, система керування

Об'єкт дослідження – система керування електропривода конвеєра завантаження зерна (ківшевої норії).

Мета роботи – удосконалення системи керування електропривода ківшевої норії на основі застосування регульованих асинхронних двигунів.

У першому розділі наведений аналіз сучасного стану перетворювальної приводної техніки, проведений літературний огляд джерел з дослідження систем регулювання швидкості автоматизованого електропривода, обґрунтована актуальність модернізації системи керування роботою норії. В якості об'єкту дослідження вибрана норія типу НЗ-50, наведені її технічні дані та відомості про електричне обладнання.

У розділі 2 обґрунтований та вибраний метод наукового дослідження, побудована структурно-логічна схема магістерського дослідження, обґрунтований метод вирішення поставленої задачі дослідження.

У розділі 3 виконаний аналіз існуючих видів електродвигунів, наведені основні вимоги до електроприводів; вибраний електродвигун типу АІР132М6УЗ для привода норії, розглянуті способи керування швидкістю асинхронного двигуна. Для керування обраним двигуном вибраний трифазний перетворювач частоти OMRON Varispeed F7, наведені його технічні дані.

В розділі 4 зроблений математичний опис елементів системи керування, проведені розрахунки по їх вибору, складені розрахункові динамічні моделі системи керування та проведений аналіз її динамічних властивостей при зміні законів керування.

Враховуючи отримані результати дослідження, остаточно для системи керування була обрана схема з ПІ-регулятором та фільтром на вході в систему.

Отримані результати підтверджують вирішення задач по вдосконаленню динамічних якостей системи керування норії. Таким чином, основна мета роботи виконана.

В розділі 5 розглянуті питання охорони праці при експлуатації електропривода норії.

Додатки містять 11 слайдів мультимедійної презентації.

ABSTRACT

The master's qualification work consists of 98 pages: 87 pages of explanatory note, 5 sections, 9 tables, 21 figures, 18 literature sources, 1 appendix on 11 pages.

Keywords: automation, dynamics analysis, electric drive, mathematical model, research methodology, bucket elevator, control system

The object of the study is the control system of the electric drive of the grain loading conveyor (bucket elevator).

The purpose of the work is to improve the control system of the electric drive of the bucket elevator based on the use of regulated asynchronous motors.

The first section provides an analysis of the current state of converter drive technology, a literature review of sources on the study of automated electric drive speed control systems, and substantiates the relevance of modernizing the elevator operation control system. The NZ-50 type elevator was selected as the object of the study, its technical data and information on electrical equipment are given.

In section 2, the scientific research method is justified and selected, the structural and logical scheme of the master's research is built, the method for solving the research problem is justified.

In section 3, an analysis of existing types of electric motors is performed, the main requirements for electric drives are given; an electric motor of the AIR132M6U3 type is selected for the crane drive, methods for controlling the speed of an asynchronous motor are considered. To control the selected motor, a three-phase OMRON Varispeed F7 frequency converter is selected, its technical data are given.

In section 4, a mathematical description of the elements of the control system is made, calculations are made on their selection, computational dynamic models of the control system are compiled, and an analysis of its dynamic properties when changing the control laws is carried out.

Taking into account the obtained research results, a scheme with a PI regulator and a filter at the input to the system was finally selected for the control system.

The obtained results confirm the solution of the tasks of improving the dynamic qualities of the crane control system. Thus, the main objective of the work is achieved.

Section 5 discusses labor protection issues during the operation of the electric drive of the elevator.

The appendices contain 11 slides of a multimedia presentation

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 КОНВЕЄР ЗАВАНТАЖЕННЯ ЗЕРНА НОРІЯ ТИПУ НЗ-50	9
1.1 Огляд літератури та розробок за темою	9
1.2 Опис об'єкту дослідження. Норія НЗ-50.....	13
1.2.1. Загальні відомості, класифікація транспортуючих машин.....	13
1.2.2 Конструкція і основні вузли ківшевої норії типу НЗ-50	16
1.3 Електричне обладнання норії	22
1.4 Висновки до розділу 1	25
РОЗДІЛ 2 МЕТОДОЛОГІЯ МАГІСТЕРСЬКОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	26
2.1 Вибір та обґрунтування методу наукового дослідження.....	26
2.2 Структурно-логічна схема магістерського дослідження	29
2.3 Вибір методу розрахунку поставленої задачі	31
2.4 Висновки до розділу 2	34
РОЗДІЛ 3. ВИБІР ТИПУ ДВИГУНА ТА КОМПЛЕКТНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА	35
3.1 Аналіз існуючих видів електродвигунів	35
3.2 Основні вимоги до електроприводів та вибір типу електродвигуна.....	36
3.3 Аналіз існуючих систем керування двигунами перемінного струму....	39
3.4 Загальна характеристика й основні технічні дані комплектного електропривода OMRON Varispeed F7	46
3.6 Висновки до розділу 3	50
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ДИНАМІКИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	51
4.1 Розробка функціональної схеми системи керування.....	51
4.1.1 Математичний опис структурної схеми електропривода з частотно-струмовим керуванням.....	56
4.2 Розрахунок параметрів регуляторів електропривода з частотно-струмовим керуванням.....	62

4.2.1 Формування та розрахунок параметрів динамічної структурної схеми.....	65
4.3 Аналіз динамічних властивостей системи керування електропривода вертикального конвеєра завантажування зерна.....	70
4.4 Висновки до розділу 4	75
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НОРІЇ	76
5.1 Аналіз небезпек і шкідливих виробничих факторів, що впливають на людину при роботі ківшевої норії.....	77
5.2 Заходи щодо безпечної експлуатації електрообладнання при роботі на ківшевих норіях	81
5.3 Висновки до розділу 5	83
ВИСНОВКИ	84
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	86
Додаток А. Мультимедійна презентація.....	88

ВСТУП

Актуальність теми. В даній кваліфікаційній роботі магістра досліджується система керування електропривода конвеєра завантаження зерна (норії).

Норія - спеціальний пристрій, який використовується для підйому рідин, а також сипучих матеріалів. Це пристрій використовували ще стародавні перси і єгиптяни для іригації. У найпростішому вигляді - це підливне водяне колесо (водокачка).

Норія служить для переміщення неопрацьованого й обробленого зерна пшениці, соняшника, сої, шроту на різних стадіях їх переробки.

Технологія зберігання й обробки зерна містить у собі кілька виробничих етапів. Немаловажним серед них є процес транспортування зерна: від типу застосовуваного устаткування залежить збереження якості зернового матеріалу й ефективність виробничого процесу.

В наші дні принцип норії широко використовується в сучасних елеваторах. Це пристрій ще називають ківшевим елеватором. Являє собою вертикальний конвеєр, до якого прикріплені ківші. За рахунок їх постійного переміщення відбувається підйом сипучого вантажу.

Основним вузлом, що визначає нормальну роботу норії, є її електропривод, моделювання процесу роботи якого надалі дозволить досліджувати й модернізувати конвеєрну установку з метою оптимізації її роботи, особливо в перехідних режимах.

До конвеєрів пред'являється ряд вимог щодо їхньої продуктивності, плавності руху, точності підтримки швидкості.

З метою забезпечення безупинної роботи привода конвеєра, що піддається короткочасним або тривалим перевантаженням, та підвищення за рахунок цього продуктивності норії, доцільно застосувати пристрої чи систему керування, чутливі до зміни навантаження на робочому органі, а саме частотно-керовані електроприводи.

Таким чином, застосування частотно-регульованого електропривода конвеєра, що забезпечує плавне регулювання лінійної швидкості стрічки, дозволяє отримати максимальну економію електроенергії транспортування вантажу при змінному вантажопотоці.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є удосконалення системи керування електропривода вертикального конвеєра завантаження зерна (ківшевої норії) на основі застосування регульованого асинхронного двигуна (АД).

Робота спрямована на підвищення надійності функціонування норій за рахунок використання найбільш ефективних системи керування.

Предметом дослідження є система керування електропривода норії ківшевої.

Режим роботи норії характеризується:

- тривалою роботою протягом значного проміжку часу, тому що завантаження, транспортування та розвантаження здійснюються безперервно без зупинок;
- нечастими пусками і остановами, що пояснюється тривалим режимом роботи конвеєра, тобто тривалість пуску і гальмування не впливають на продуктивність конвеєра;
- постійністю напрямку руху тягового органу конвеєра, що зумовлює застосування нереверсивної схеми керування електродвигуном;
- нерівномірністю завантаження;
- порівняно важкими умовами пуску.

На сьогоднішній день одним з актуальних завдань є завдання автоматичного регулювання продуктивності конвеєрів для стабілізації вантажопотоку й оптимізації режимів їх експлуатації.

При автоматизації конвеєрного транспорту, для забезпечення його ефективної роботи, необхідно вирішити завдання керування пуском і зупинкою конвеєра, зниження витрат електроенергії, забезпечення безпечного режиму роботи норії.

Отже, метою даної роботи є забезпечення ефективної роботи конвеєра за рахунок ефективного регулювання частоти обертання вихідного валу приводного електродвигуна.

Для успішної реалізації мети роботи необхідно скласти адекватні математичні моделі для дослідження фізичних процесів, що відбуваються в об'єкті, на базі сучасних комп'ютерних програм і методів розрахунку.

Об'єкт дослідження - процеси, що відбуваються у електроприводі норії.

Предмет дослідження: динамічні характеристики системи керування, параметри, що забезпечують підвищення точності системи керування електропривода ківшевої норії.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань були проведені теоретичні дослідження на основі теорії автоматичного керування, теорії електропривода, теорії лінійних електричних кіл з використанням математичного моделювання на основі диференціальних рівнянь та структурних схем.

За допомогою програмного забезпечення для персональних комп'ютерів Simulink пакету MathLab були змодельовані математичні моделі системи керування, які досліджувалися.

Практичне значення одержаних результатів мають математичні та імітаційні моделі систем керування, які є зручними інструментами для дослідження характеристик електропривода стрічкового конвеєра та аналізу алгоритмів керування.

Результати роботи впроваджено в навчальний процес кафедри автоматики Національного Університету Кораблебудування і використовуються студентами очного та заочного відділень при викладанні дисципліни "Системи керування електроприводами".

РОЗДІЛ 1

КОНВЕЄР ЗАВАНТАЖЕННЯ ЗЕРНА НОРІЯ ТИПУ НЗ-50

1.1 Огляд літератури та розробок за темою

Сучасний стан досліджень транспортно-технологічних механізмів.

Тема кваліфікаційної роботи магістра пов'язана із сучасною технікою, тому і огляд розробок необхідно робити, спираючись на сучасну приводну техніку та літературу по моделюванню, по теорії частотного керування та перетворювальної техніки.

Тенденції розвитку стрічкових ківшових елеваторів та конвеєрного транспорту в цілому направлені на підвищення їх продуктивності, висоти транспортування, надійності, безпечності, зниження металоємності, збільшення потужності привода, водночас дотримуючись політики енергозбереження та якості продукції. Так, наприклад, продуктивність сучасних стрічкових ківшових елеваторів досягає 1800 т/г, висота транспортування – 180 м, а потужність привода – кількасот кіловат [11].

Три основні напрямки подальшого розвитку:

- вдосконалення конструкції стрічкових ківшових елеваторів як в цілому, так і окремих складальних одиниць, модулів тощо;
- розробка та вдосконалення систем автоматичного контролю та сигналізації;
- розробка та впровадження систем оптимального керування роботою ківшового елеватора.

Сучасні систем автоматичного контролю та сигналізації представляють собою мікропроцесорні системи моніторингу, які збирають та обробляють дані з датчиків: швидкості, вібрації, температури, сходу стрічки, рівня транспортованого матеріалу, які встановлюють на конвеєр. Розробка програмного забезпечення для таких систем також базується на динамічному аналізі роботи стрічкових ківшових елеваторів.

Математичне моделювання конвеєрних систем використовується для знаходження оптимальних законів керування приводом стрічкових ківшових

елеваторів відповідно до вибраних критеріїв оптимізації, які орієнтовані на обмеження приводного зусилля, зниження пошкодження транспортованого матеріалу та експлуатаційних затрат на роботу як конвеєра, так і конвеєрних ліній в цілому [10].

Сучасний стан досліджень транспортно-технологічних механізмів (ТТМ) машин і обладнання вичерпно представлений в монографії [12]. В роботі представлено математичні та динамічні моделі процесів об'єднаних транспортно-технологічних операцій, що виконуються на горизонтальних, похилих і вертикальних трасах відповідними машинами та обладнанням. Запропоновано нові методики для проведення експериментальних досліджень, з метою підвищення ефективності практичного застосування розроблених і модернізованих машин.

Значний вклад в оптимізацію піднімально-транспортних машин, динамічний синтез перехідних режимів руху механізмів і машин, режимів роботи конвеєрів вніс В.С. Ловейкін.

Базові теоретичні та експериментальні дослідження ТТМ, а також методики, рекомендації та аналітичні залежності для проведення інженерних розрахунків з метою вибору раціональних параметрів робочих органів і режимів роботи наведено в працях Б.М. Гевка, Р.М. Рогатинського, О.Л. Ляшука, В.С. Ловейкіна, О.Р. Рогатинської та багатьох інших.

В роботі [10] Наведено методи та підходи до моделювання механізмів вантажопідйомних машин (ВПМ), а також комплексні динамічні критерії оцінки та оптимізації нестационарних режимів руху механізмів ВПМ.

Охарактеризовано принципи мехатронних систем у процесі створення, експлуатації та комп'ютерного керування рухом ВПМ, роботів, маніпуляторів.

Дослідженню створення систем автоматичного регулювання швидкості стрічкових конвеєрів присвячені роботи авторів: Глянь Д.В, Петкова О. Н, Оголобченко А.С. Фоменко А. І, Петкова О.Н, Лукомського Л.В та ін.

У літературі [6] наводяться питання енергозбереження засобами промислового електропривода.

В сучасній літературі [4,17] в якості основного типу регульованого асинхронного електропривода з двигунами з короткозамкненим ротором

розглядається частотно-регульований електропривод, який дозволяє задовольнити вимоги як по діапазону, так і по якості регулювання частоти обертання й відпрацьовувати задані закони руху.

Проблеми автоматизації режимів роботи електроприводів змінного струму, зокрема й електроприводів на основі асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором (АДКЗ), досліджуються в роботах [17]. В літературі наведений математичний опис (АДКЗ) у розімкненій системі керування при частотному регулюванні. Основними засобами частотного керування є: скалярне частотне регулювання; векторне поліорієнтоване керування; пряме керування моментом.

Книга [4] орієнтована на сучасну модель ЕП на базі дволанкового перетворювача частоти. Добре описана структура ЕП, а також інструмент, що дозволяє якісно реалізовувати векторне керування електропривода і взагалі перетворення частоти. Питання математичного моделювання електромеханічних систем наведені в [5].

Загальний стан розробки обраної теми показує, що вона відображена у великому масиві джерельного матеріалу.

Проведений літературний огляд показав, що рекомендується використовувати різні математичні моделі дослідження систем регулювання швидкості автоматизованого електропривода.

Аналіз систем керування приводами конвеєрів.

У розвитку промисловості України важливу роль виконує широке впровадження перетворювачів і мікропроцесорної техніки для керування приводами конвеєрів, режими роботи яких, суттєво впливають на енергетичні показники, механічні характеристики й динамічні режими роботи конвеєра.

Найважливішим обладнанням підприємств збереження і переробки зерна є вертикальний стрічковий ківшевий транспортер (норія) [13]. Аналіз існуючих способів підвищення продуктивності норій показав, що в теперішній час пропонується застосовувати регульований асинхронний електропривод в норіях. Тобто, щоб кожній зміні транспортованого продукту відповідала певна потужність приводу. Це є актуальним для підприємств збереження і переробки зерна з різними видами зернових культур, що зберігаються [16].

Для підвищення надійності машин безперервного транспорту необхідно розв'язати комплекс різних проблем, таких, як проектування металоконструкцій, приводів і машини в цілому, а також підвищення надійності ланцюгів і засобів автоматики. Однією з найважливіших проблем є обґрунтований вибір привода й системи його керування.

У цей час найпоширенішим типом привода ківшевих конвеєрів (норій) є нерегульований електропривод змінного струму на основі асинхронних машин переважно з короткозамкненим ротором. Асинхронний електропривод при цьому повинен забезпечувати плавне економічне регулювання швидкості із широким діапазоном, велику частоту включень і реверсів з високою швидкістю в перехідних режимах.

Застосування керованих перетворювачів частоти дозволяє створювати установки з високими динамічними властивостями й мінімальними додатковими втратами.

Розвиток сучасного електричного привода.

Аналіз світового досвіду створення нового й модернізації діючого технологічного встаткування показує високу динаміку розвитку регульованих електроприводів, комп'ютерних засобів автоматизації, використання інформаційних засобів. Усі провідні електротехнічні корпорації випускають регульовані електроприводи комплектно з комп'ютерними засобами автоматизації у вигляді гнучких програмувальних систем, призначених для широкого використання. Окупність засобів, вкладених у такі системи, є найбільш швидкою. Крім застосування регульовані електроприводи разом з технологічними пристроями використовуються в якості засобів регулювання технологічних змінних - рівня, тиску, вологості, температури, дозування, продуктивності та ін.

Можна виділити наступні загальні тенденції розвитку електроприводів, що мають сталий характер:

- застосування регульованих електроприводів у промисловому встаткуванні, транспорті, авіаційній і космічній техніці, медицині, побутовій техніці для досягнення нових якісних результатів у технології;
- заміна нерегульованих електроприводів регульованими в енергоємному

встаткуванні (насоси, компресори, вентилятори та ін.) з метою енергозбереження;

- поширення блочно-модульних принципів побудови електроприводів, інформаційних засобів, засобів керування й систем керування в цілому;
- динамічна комп'ютеризація електроприводів, механізмів, агрегатів і комплексів і нова ідеологія проектування систем;
- подальший розвиток методів каскадного (підлеглого) керування, що одержали широке розповсюдження в електроприводах і органічно застосовних до керування технологічними змінними й інтегральними показниками якості обробки, переробки й виробництва речовини.

Світові лідери у виробництві частотних перетворювачів: ABB, Allen Bradley, Danfoss, Mitsubishi Electric, Schneider Electric, Siemens, Yaskawa.

Більш скромну нішу займають такі фірми як, наприклад, Control Techniques, Emotron, Lenze, Веспер-Автоматика, м. Москва й ін. Їхня продукція по якості практично не поступається лідерам.

У сучасних виробничих реаліях асинхронний двигун без перетворювача частоти не зустрічається. Також на користь економії перетворювачів частоти говорить і їх «внутрішній ресурс» - служать вони довго й надійно.

1.2 Опис об'єкту дослідження. Норія НЗ-50

1.2.1 Загальні відомості, класифікація транспортуючих машин

Транспортуючими машинами називають машини, які застосовують на підприємствах системи заготівки для переміщення сировини, напівфабрикатів, готової продукції й відходів виробництва [8].

Вантажопідйомні машини (ВПМ) призначені для вертикального підйому вантажів з можливістю невеликих горизонтальних переміщень. До цих машин відносяться: підйомники, штабелери, лебідки, талі, крани різних конструкцій, авто- і електронавантажувачі (виллові, ківшеві, крюкові).

Транспортує встаткування підрозділяється на дві системи:

- механічне транспортує встаткування із гнучким тяговим органом, у

якості якого можуть бути використані: стрічка, ланцюг або канат;

- транспортуючі установки й пристрої без гнучкого тягового органу (гвинтові, інерційні, роликові та ін. транспортери).

Структура класифікації транспортного перевантажувального встаткування показана на рисунку 1.1.

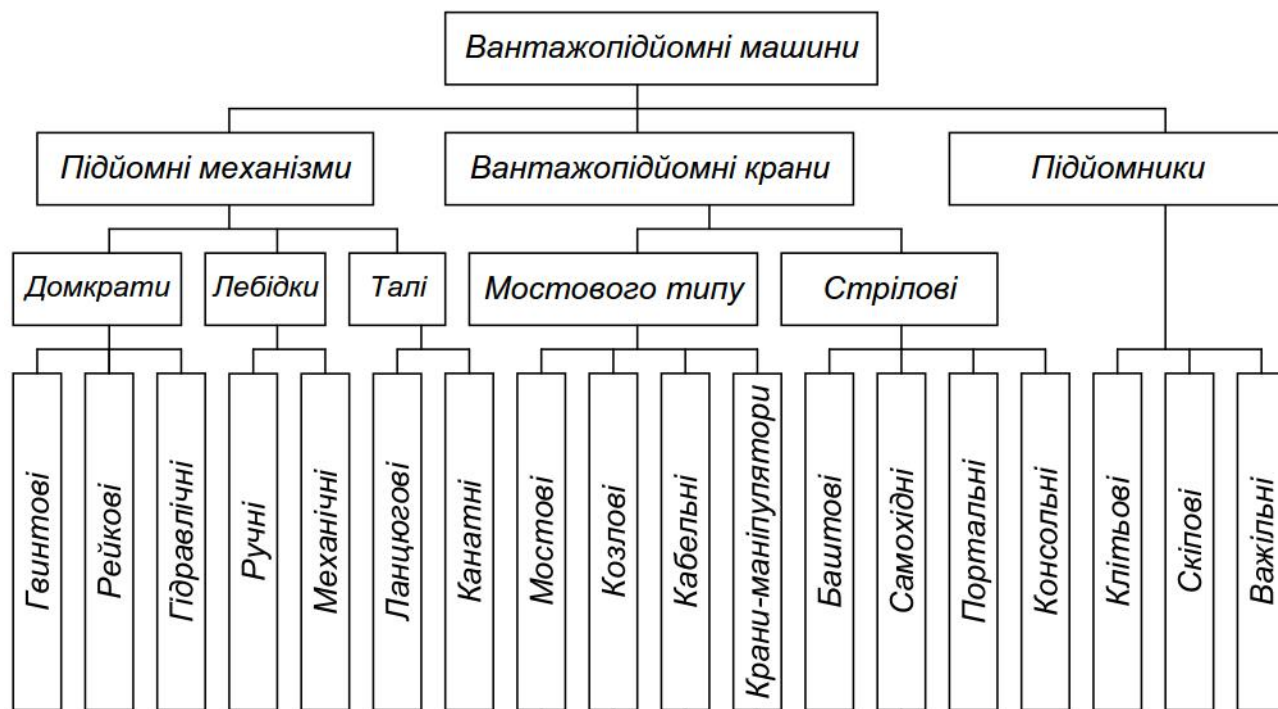


Рисунок 1.1 – Класифікація транспортно-перевантажувального встаткування

У машинах безперервної дії характерним є можливість переміщення сипучих вантажів суцільним потоком або штучних вантажів з деяким інтервалом за часом через відстань між ними.

Серед транспортуючих машин особливе місце займають спеціальні машини для елеваторно-складського господарства - елеватори й конвеєри [7].

По виду вантажонесучого елемента елеватори підрозділяють на ківшеві, коліскові й поличкові, по виду тягового елемента - на стрічкові й ланцюгові. Ківшеві елеватори призначені для переміщення сипучих і кускових вантажів; коліскові й поличкові - для штучних вантажів.

Ківшеві конвеєри поділяють на елеватори (норії), що переміщують матеріал у вертикальному чи круто похилому напрямку, і конвеєри, що переміщують матеріал по просторовій або кільцевій трасі. Переважне застосування мають елеватори, що являються по суті підйомниками, для переміщення матеріалу у

ківшах безупинним потоком.

Основна відмінність конвеєрів від вантажопідйомних машин полягає в способі переміщення вантажів. Машини переміщують вантаж тільки в один бік, назад вертаючись порожніми, що істотно знижує їх номінальний ККД, конвеєри переміщують вантажі безупинно, відповідно підвищується ККД і скорочується загальний час транспортування.

Питання транспортування зернових культур виникають ще на етапі їх зберігання в елеваторах. Кожне зерносховище повинне забезпечувати проведення наступних операцій із зерном: прийом, обробка (очищення й сушіння), зберігання, внутрішні переміщення, відпускання.

Ківшеві елеватори для вертикального переміщення зерна й продуктів його переробки, комбікормів мають деякі відмінності від елеваторів загального призначення (по швидкості стрічки, діапазону продуктивності та ін.) і одержали назву норій.

Норії (елеватор ківшевий) є невід'ємною частиною багатьох промислових та сільськогосподарських підприємств. Застосовуються на зернообробних складах, маслозаводах для вертикального транспортування зерна і комбікормів без тари, в портах для навантаження на судна сипучої сировини [7,8].

Норії це механізм, що дозволяє захоплювати сипучу сировину, переміщуючи її вгору, на стрічку транспортера або в інший механічний пристрій. Конструкція складається із закритої вежі та встановленої пари тягових барабанів, оточених закільцьованою стрічкою, на якій закріплені робочі елементи (ківші).

Сировина, розташована знизу елеватора, підхоплюється лопатками і переміщається вгору стрічкою. Досягаючи верхньої точки, під дією інерції, перекидаються, висипаючи вміст, і рухаються вниз порожніми у перевернутому положенні.

Норії поділяються на кілька видів — похильні, поличні, люлькові, але для переміщення зерна використовують ківшеві норії, тож надалі говоритимемо тільки про них. Ківшева норія, по суті — той самий конвеєр, у якому на відміну від звичайного стрічка, рідше — ланцюг, рухається у вертикальному напрямі. На тяговий орган кріпляться ковші, у яких і відбувається транспортування зерна.

У ківшевій норії конвеєр зазвичай розміщено в металевому прямокутному коробі, який, по-перше, захищає елементи механізму і зерно від атмосферних опадів, а по-друге, запобігає розповсюдженню зернового пилу. Для додаткового захисту навколишнього середовища від запилення норії можуть обладнуватися окремими аспіраційними системами.

За показниками швидкості руху ковшів норії класифікуються на тихохідні — до 1 м/сек, та швидкохідні — до 4 м/сек. У тихохідному обладнанні розвантаження ковшів зазвичай гравітаційне, у швидкохідному — відцентрове. Перші переважно використовують для переміщення сухого зерна й подрібнених продуктів, другі — для вологого та засміченого зерна.

1.2.2 Конструкція і основні вузли ківшевої норії типу НЗ-50

Норія складається з кількох основних конструктивних елементів, і кожний із них впливає на її продуктивність. Умовами нормальної роботи такого обладнання є правильний вибір потужності приводу, розмірів барабана й зірочок, форми та розміру верхньої й нижньої частин конвеєра — «башмака» й «головки», форми та розмірів ковшів. Тяговий орган норії — стрічка або ланцюг — огинає приводний і натяжний барабани або зірочки. Додатково в комплекті норії можуть пропонуватися датчики, що контролюють роботу і технічний стан елементів конструкції.

Нижня частина норії — «башмак» являє собою збірну конструкцію з металевих листів і профільованих металевих виробів, з'єднаних різьбовими кріпильними деталями. Цей вузол слугує для забезпечення завантаження зерна до основного робочого органу — ковша та натяжки тягового органу стрічки чи ланцюга. Крім цього, він є важливим опорним елементом усієї конструкції норії. Вивантажується зерно через патрубок у горизонтальному напрямку у верхній частині конвеєра — «головці». Максимальна висота підймання зерна на норії зазвичай не перевищує 60 м.

Норія відцентрова ківшева являє собою стаціонарний транспортуючий пристрій безперервної дії, з тяговим органом - стрічкою або ланцюгом і робочим органом – ківшами.

Стандартна довжина секції норії 2м і 1м, підмоторна й оглядові секції 1,25м.

Висота норії міряється від вікна завантаження до вікна вивантаження, тобто фактично висота норії, це є висота підйому зерна, а габаритний розмір норії на 1,5 метра перевищує висоту підйому зерна.

Стрічкова норія для зерна може мати саму різноманітну висоту, яка підбирається залежно від потреб конкретного виробництва. Як правило, висота більшості моделей варіюється в межах від 3 до 23 м. Максимальна висота підіймання зерна на норії зазвичай не перевищує 60 м.

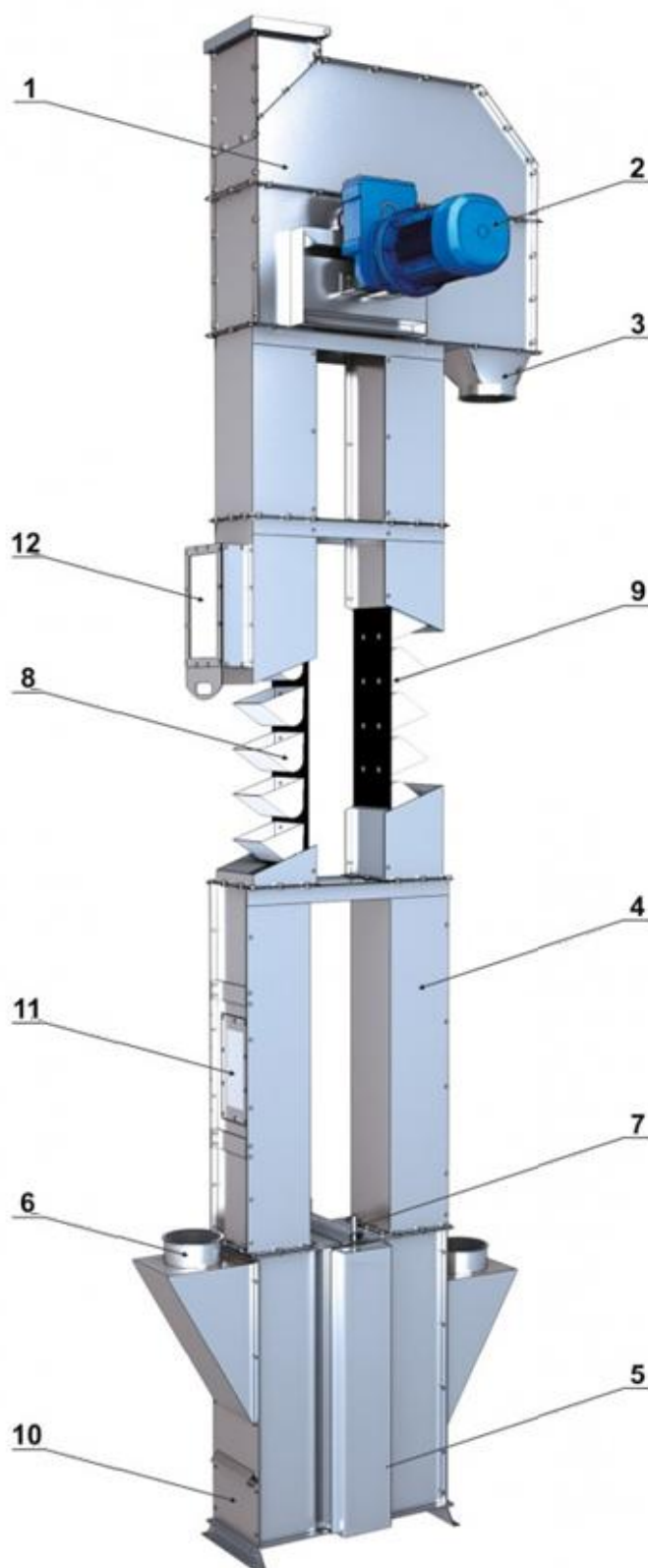
В якості об'єкту модернізації розглядається система керування електропривода норії серії НЗ-50 продуктивністю (по зерну) 50 т/год.

Норія являє собою машину безперервного транспорту із гнучким тяговим органом у вигляді ремня (стрічки) із ковшами, що несуть вантаж.

Норії це механізм, що дозволяє захоплювати сипучу сировину, переміщуючи її вгору, на стрічку транспортера або в інший механічний пристрій. Конструкція складається із закритої вежі та встановленої пари тягових барабанів, оточених закільцьованою стрічкою, на якій закріплені робочі елементи (ківші).

Сировина, розташована знизу елеватора, підхоплюється лопатками і переміщається вгору стрічкою. Досягаючи верхньої точки, під дією інерції, перекидаються, висипаючи вміст, і рухаються вниз у перевернутому положенні.

Загальний вид і основні складові частини стрічкової ківшевої норії НЗ-50 представлені на рисунку 1.2 [13].



1 - верхня голівка ківшевого елеватора ; 2 - мотор-редуктор; 3 - патрубок вивантаження; 4 - шахта норії; 5 - нижній башмак ківшевого елеватора; 6 - патрубок завантаження; 7 - натяжна шпилька; 8 - ківші норії; 9 - стрічка норії; 10 - люк для очищення; 11 - люк обслуговування; 12 - вибухорозрядний пристрій

Рисунок 1.2 - Загальний вид і складові частини стрічкової ківшевої норії НЗ-50

Норія являє собою машину безперервного транспорту із гнучким тяговим органом у вигляді ремня (стрічки) із ківшами, що несуть вантаж.

Норія складається з наступних основних складальних одиниць: головки норії 1 (верхня частина); башмака норії 5 (нижня частина); стрічки 9 з ківшами 8, секції натяжної 7. Стрічка 9 укладена в шахту 4 (кожух) і натягнута між верхнім (ведучим) і нижнім (натяжним) барабанами. Механізм протягання стрічки приводиться в рух мотор-редуктором 2, що розташований у головці норії. Завантаження матеріалу провадиться через патрубок завантаження 6, вивантаження - через патрубок вивантаження 3.

Основа являє собою зварну конструкцію із закріпленням на ній приводним барабаном та привода. Основа має приєднувальні фланці для норійних труб і отвір для виводу зерна після розвантаження ківшів. Для запобігання зворотного висипу зерна в основу встановлений регульований шибер.

У середині башмака, на вертикальних штоках, установлений барабан, що забезпечує натяжку стрічки.

Для з'єднання башмака з норійними трубами у верхній частині корпусу передбачені отвори. Норійні труби (секції) призначені для з'єднання головки й башмака норії з метою огороження стрічки з ківшами.

Норійна стрічка обгинає приводний і натяжний барабани норії. Вільні кінці стрічки з'єднуються за допомогою кутків.

У башмаку проводиться натяг стрічки за допомогою 2-х натяжних гвинтів, роздільних для кожного кінця валу натяжного барабана. Така конструкція дає можливість точно регулювати розташування натяжного барабана й виключити схід стрічки в процесі роботи. Також розташовано дві заслінки, що дозволяють легко виконати зачищення при зміні культури або при завалі.

На стрічці, з певним кроком, установлюються ківші. Кріплення ківшів до стрічки здійснюється спеціальними болтами, головки яких розташовуються із внутрішнього боку стрічки. При цьому необхідно забезпечити, щоб при затягуванні болтів їх голівка була втоплена в поглиблення передбачене на ківшах.

У секції обслуговування передбачений кронштейн для кріплення автомата закриття заслінки й вікно із знімною кришкою для доступу до ковшової стрічки.

Стандартна довжина секції норії 2м і 1м, підмоторна й оглядові секції 1,25м.

Висота норії міряється від вікна завантаження до вікна вивантаження, тобто фактично висота норії, це є висота підйому зерна, а габаритний розмір норії на 1,5 метра перевищує висоту підйому зерна.

Стрічкова норія для зерна може мати саму різноманітну висоту, яка підбирається залежно від потреб конкретного виробництва. Як правило, висота більшості моделей варіюється в межах від 3 до 23 м.

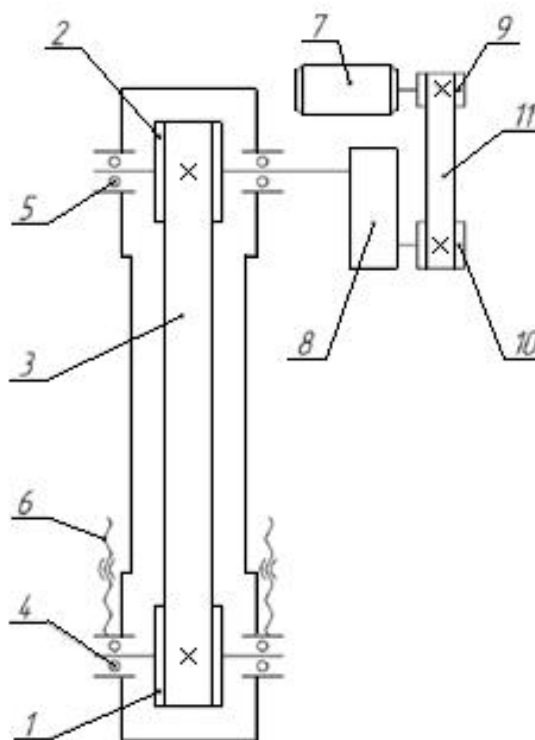
Технічні характеристики норії ківшевої типу НЗ-50 наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики норії ківшевої типу НЗ-20 [16]

Параметр	Значення
Марка норії	НЗ-50
Потужність, кВт	7,5
Продуктивність (по зерну), т/год	50
Висота від "0" до центру барабана, мм	20200
Швидкість стрічки, м/с	2,2-2,4
Частота обертання приводного барабана, об/хв.	70
Привод	Мотор-редуктор

При установці норії, у нижню її частину, в обов'язковому порядку, установлюється датчик швидкості. У випадку забивання норії або влучення усередину норії сторонніх предметів, що заважають її правильній роботі, відбудеться призупинка норії, датчик дасть команду в електричний щит, який відразу відключить живлення від електродвигуна норії й сповістить про це на пульті керування загорянням червоної лампочки «Перешкода в норії».

Кінематична схема норії та схема розташування підшипникових вузлів показана на рисунку 1.3 [13].



1 – барабан натяжний; 2 – барабан приводний; 3 – стрічка; 4, 5 – підшипниковий вузол; 6 – механізм натягу стрічки; 7 – електродвигун; 8 – редуктор; 9, 10 – шків;
11 – ремінь клиновий

Рисунок 1.3 - Кінематична схема норії

Принцип роботи норії. Норія для зерна запускається за допомогою привода, після чого стрічка норії починає рухатися, поступово набираючи швидкість. Коли потрібна швидкість досягнута, відкривається завантажувальний патрубок, через який починається подача зерна [1,7].

При включенні привода норії, починається обертання приводного барабана, який приводить у рух норійну стрічку з ківшами.

За рахунок безупинного руху ківшів, закріплених на стрічковому (або ланцюговому) конвеєрі, проводиться підйом матеріалу. Потрібний вантаж підхоплюється ківшами в нижньому секторі конвеєрної стрічки, рухається вертикально й розвантажується у верхньому секторі через патрубок.

При огинанні стрічки з ківшами приводного барабана, зерно, що знаходиться в ківшах, під дією відцентрових сил викидається з ківшів і через розвантажувальну лійку в головці виводиться з норії. Відцентровий спосіб розвантаження дає необхідну потужність, зменшуючи навантаження на мотор привода. Далі вниз рухаються перекинуті ківші.

1.3 Електричне обладнання норії

Електрообладнання норії складається з електродвигунів, пускорегулювальної та захисної апаратури, кінцевих вимикачів, освітлювальної та сигнальної апаратури, кабелів і проводів [13].

Живлення електрообладнання здійснюється від 3 -х фазної мережі змінного струму напругою 380 В.

Керування норією здійснюється від пульта керування оператора.

Система автоматичного керування електропривода норії забезпечує:

- роздільне включення верхньої й нижньої приводних станцій;
- подачу автоматичного попереджувального сигналу перед пуском;
- підвищений пусковий момент;
- обмеження часу втримання зусилля при неуспішному запуску (6 - 8 секунд) для запобігання перегріву електроприводів;
- автоматичне відключення норії при обриві тягового органу;
- автоматичний захист приводів і тягового органу норії від динамічних перевантажень при заклинюванні ланцюга.

Для рівномірної роботи обладнання необхідне збалансоване подання зерна з норії. На контролер надходить сигнал керування відділення очищення, величина сигналу залежить від продуктивності відділення. Контролер аналізує сигнал і дає команду системі керування для зміни обертів мотор-редуктора.

Для забезпечення безпеки роботи норії передбачені такі види захисту:

- перевантаження черевика норії контролюється за допомогою датчиків підпору. Може бути два типи датчиків - ємнісний та мембранний. Ємнісний датчик працює як конденсатор і за наявності зерна змінюється ємність. Мембранний датчик являє собою мембрану зі штоком та мікровимикач. Зерно тисне на мембрану і її шток замикає ланцюг за допомогою мікровимикача. Сигнал від ємнісного або мембранного датчика надходить на контролер, який дає команду на вивантажувальний транспортер приймального бункера і зупиняє завантаження норії;
- схід або обрив стрічки контролює індуктивний датчик швидкості. Сигнал

йде на контролер і припиняється подача живлення на мотор-редуктор транспортера;

- сигналізація аварійної зупинки відбувається за допомогою комбінованого пристрою сирена-маяк (аварійний звуковий сигналізатор).

На рисунку 1.4 показані складові пуско-регулювальної апаратури.

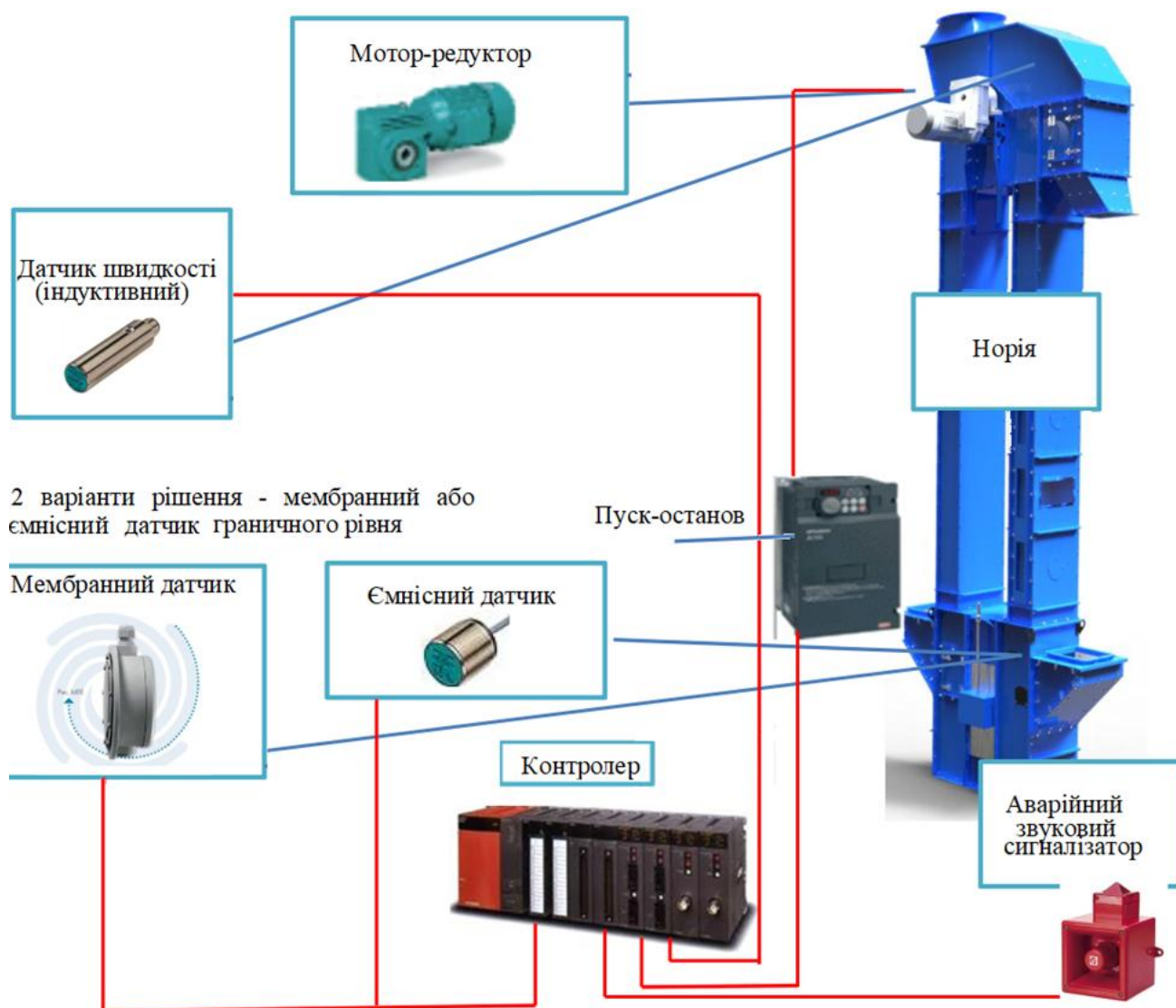


Рисунок 1.4 - Складові пуско-регулювальної апаратури

На рисунку 1.5 показана рекомендована схема електрична принципова керування норії.



Рисунок 1.5 - Рекомендована схема електрична принципова керування норії

У таблиці 1.2 наведений рекомендований перелік елементів схеми

Таблиця 1.2 - Перелік елементів схеми

Позначення	Назва елементу	Кількість
KM	Контактор	1
QF	Автоматичний вимикач	1
KK	Термореле	1
SB1	Кнопка	1
SB1.1	Кнопка	1
SB1.2	Кнопка	1

Схема використовує живлення силових ланцюгів і ланцюгів керування від джерела тої самої напруги. Для підвищення надійності роботи релейних контакторних апаратів, здебільшого розрахованих на низьку напругу, і для підвищення безпеки експлуатації застосовуються схеми з живленням ланцюгів керування від джерела зниженої напруги.

Керування асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором здійснюється за допомогою магнітного пускача. Під керуванням у цьому випадку маються на увазі операції пуску й останову електродвигуна, а отже, і конвеєра, а також відключення електродвигуна від мережі при порушенні нормального

режиму роботи. Пуск електродвигуна проводиться кнопкою SB1.2, останів - кнопкою SB1.1.

Якщо рубильник QF включений, то для пуску електродвигуна необхідно натиснути на кнопку SB1.2 («пуск»). При цьому котушка контактора K1M одержить живлення, замкнуться головні контакти КМ у силовому ланцюзі й статор двигуна приєднається до мережі. Електродвигун почне обертатися. Одночасно в ланцюзі керування закриється замикаючий допоміжний контакт КМА, який шунтує кнопку SB1.2 («пуск»), після чого цю кнопку не потрібно втримувати в натиснутому стані, тому що ланцюг котушки контактора K1M залишається замкненим. Кнопка S2 із самоповерненням і за рахунок дії пружини вертається у вихідний розімкнутий стан. Для відключення електродвигуна від мережі натискається кнопка SB1.1 («стоп»). Котушка контактора K1M знеструмлюється й замикаючі контакти КМ відключають обмотки статора від мережі. Одночасно розмикається допоміжний контакт КМА. Схема приходить у вихідний, нормальний стан. Обертання електродвигуна припиняється.

Схема передбачає захист двигуна й ланцюга керування від коротких замикань плавкими запобіжниками Пр, захист від перевантаження двигуна двома електротепловими реле КК. Пружинний привод контактів магнітного пускача K1M на розмикання реалізує так званий нульовий захист, який при зникненні або значному зниженні напруги відключає двигун від мережі. Після відновлення нормальної напруги мимовільного пуску двигуна не відбудеться.

1.4 Висновки до розділу 1:

- наведений огляд літератури та розробок за темою;
- розглянуті сфери використання та класифікація транспортуючих машин.
- наведена класифікація, конструктивна схема і основні вузли ківшевих норій.
- обґрунтований вибір об'єкту дослідження із зазначенням технічних параметрів;
- наведені дані про електричне обладнання норії.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ МАГІСТЕРСЬКОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір та обґрунтування методу наукового дослідження

Наука - це система знань об'єктивних законів природи, суспільства та мислення, що розвивається безупинно.

Розвиток науки починається зі збору фактів, їхнього вивчення і систематизації, узагальнення і розкриття окремих закономірностей до зв'язаної, логічно стрункої системи наукових знань, що дозволяє пояснити уже відомі факти і передбачити нові.

Основна ознака і головна функція науки - одержання знань про об'єктивний та суб'єктивний світи, збагнення об'єктивної істини.

Тобто, мета науки - пізнання законів розвитку природи та суспільства і вплив на них на основі використання отриманих знань для одержання корисних суспільству результатів.

Науку можна розглядати як систему, що складається з теорії, методології, методики і техніки досліджень та практики впровадження отриманих результатів.

Якщо науку розглядати з погляду взаємодії суб'єкта і об'єкта пізнання, то вона містить у собі наступні елементи:

1. **Об'єкт** - те, що вивчає конкретна наука, те на що спрямоване наукове пізнання.

2. **Суб'єкт** - науковці, вчені та науково-педагогічні працівники, а також наукові установи, наукові організації, вищі навчальні заклади III-IV рівнів акредитації, громадські організації у сфері наукової та науково-технічної діяльності.

3. **Наукова діяльність суб'єктів** - застосування визначених прийомів, операцій, методів для пізнання об'єктивної істини та виявлення законів дійсності.

Формою здійснення і розвитку науки є наукове дослідження. Тобто наукове дослідження - це процес вивчення визначеного об'єкту (предмету або явища) з

метою розкриття закonomieностей його виникнення, розвитку і перетворення в інтересах суспільства.

Мета наукового дослідження - визначення конкретного об'єкту і всебічне, достовірне вивчення його структури, характеристик, зв'язків на основі розроблених у науці принципів і методів пізнання, а також одержання корисних для діяльності людини результатів і впровадження у виробництво з подальшим ефектом.

Метод (від грецького *methodos* – шлях до чого-небудь) – в найбільш загальному випадку означає засіб досягнення мети, спосіб дослідження явища, який визначає планомірний підхід до їх наукового пізнання та встановлення істини. Науковий метод – це спосіб пізнання явищ дійсності в їх взаємозв'язку та розвитку, спосіб досягнення поставленої мети і завдань дослідження [3,9].

Методика дослідження – це система правил використання методів, прийомів та способів для проведення будь-якого дослідження.

Розрізняють методи теоретичних та емпіричних досліджень. Такий розподіл методів завжди умовний, оскільки з розвитком пізнання один науковий метод може переходити з однієї категорії в іншу.

Теоретичні дослідження – висунення і розвиток наукових гіпотез і теорій, формулювання законів та виведення з них логічних наслідків, зіставлення різних гіпотез і теорій.

На теоретичному рівні дослідження використовуються такі загальнонаукові методи: аналіз; синтез; індукція; дедукція; порівняння; формалізація; абстрагування; моделювання.

Емпіричні дослідження – спостереження і дослідження конкретних явищ, експеримент, а також групування, класифікація та опис результатів дослідження і експерименту, впровадження їх у практичну діяльність людей.

Складовою частиною емпіричних досліджень є експеримент - апробація знання досліджуваних явищ в контрольованих або штучно створених умовах. Сам термін "експеримент" (від латинського – спроба, дослід) означає науково поставлений дослід, спостереження досліджуваного явища у певних умовах, що дозволяють багаторазово відтворювати його при повторенні цих умов.

Серед відомих методів дослідження складних електромеханічних систем можна виділити фізичне, імітаційне, аналогове та математичне моделювання.

Метод фізичного моделювання передбачає дослідження на моделі, яка відтворює основні геометричні, фізичні, динамічні та функціональні характеристики та властивості оригіналу (але не обов'язково всі властивості) та має великі можливості з визначення різноманітних якостей електромеханічних систем ті їх елементів. Він базується на трьох теоремах аналізу подібності.

Практично необмежені можливості з виявлення ефективного функціонування складної електромеханічної системи має метод математичного моделювання. Він ґрунтується на здатності математично описувати рівняннями різні за природою явища (процеси) та виявляти різні функціональні зв'язки між елементами системи.

Аналогове моделювання базується на однаковому для моделі та натури математичному описі та використовується для імітації на основі аналогової фізичної системи по її елементам. При цьому кожному з фізичних елементів натури в моделі відповідає певний еквівалент. У якості моделей використовуються електричні кола, складені з пасивних та активних елементів.

Імітаційне моделювання використовується частіше за всього при дослідженні складних електромеханічних систем та представляють собою процес формування моделі реальної системи та проведення над нею численних експериментів з метою виявлення шляхів її створення, вдосконалення та (або) ефективного використання.

При математичному моделюванні застосовуються аналітичні та статистичні моделі. Аналітичні моделі більш грубі, враховують менше число факторів, завжди потребують деяких припущень та спрощень. Проте вони більше пристосовані для пошуку оптимальних рішень.

Статистичні моделі у порівнянні з аналітичними більш точні, але громіздкі та погано доступні для огляду.

В цій роботі проводиться дослідження впливу параметрів вертикального конвеєра (норії) на динамічні характеристики системи керування електропривода. Тому для моделювання перехідних процесів використовуються комп'ютерна модель.

Комп'ютерна модель (або чисельна) [5] – комп'ютерна програма, яка реалізує абстрактну модель деякої системи. Комп'ютерні моделі використовуються для отримання нових знань про об'єкт, що моделюється або для приблизної оцінки поведінки математичних систем, які досить складні для аналітичного дослідження. Комп'ютерне моделювання є одним з ефективних методів вивчення складних систем. Комп'ютерні моделі простіші та їх зручніше досліджувати в силу можливості проводити обчислювальні експерименти в тих випадках, коли реальні експерименти немає можливості проводити через фінансові труднощі або фізичні перешкоди. Для підтримки математичного моделювання розроблені системи комп'ютерної математики, наприклад, [Maple](#), [Mathematica](#), [Mathcad](#), [MATLAB](#), [VisSim](#) та інші. В даній роботі використовується програма Simulink пакету [MATLAB](#).

2.2 Структурно-логічна схема магістерського дослідження

Методологія - це система базисних принципів, методів, методик, способів і засобів їх реалізації в організації та побудові науково-практичної діяльності. Вона включає в себе методи теоретичного та емпіричного пізнання і являє собою алгоритм пошуку і досягнення мети.

Основне призначення методики дослідження полягає у тому, щоб на основі відповідних принципів (вимог, умов, обмежень тощо) забезпечити успішне вирішення визначених мети і завдань наукового дослідження [3,9].

Данна схема складена на підставі головних завдань магістерського дослідження і наочно відображає його послідовність: мотивацію; формулювання проблеми дослідження; пошук теоретичної основи розв'язання проблеми; розв'язання проблеми. Вона показує процедуру (алгоритм) дослідження і установлює логічну послідовність виконання структурних розділів і підрозділів магістерської роботи.

Структурно-логічна схема є однією з форм планування роботи і візуалізації процесу, яка дозволяє з одного боку описувати процедуру (алгоритм) дослідження і досягнення мети тобто сформулювати робочу гіпотезу дослідження, а з другого –

установити логічну послідовність виконання структурних розділів і підрозділів магістерської роботи.

Весь процес наукового дослідження, у т. ч. й підготовку магістерської роботи як самостійної науково-дослідницької кваліфікаційної роботи, можна поділити на етапи.

Спочатку вибирається тема дослідження та обґрунтовується її актуальність та складається індивідуальний календарний план роботи.

Ведеться пошук літератури за темою, її аналіз, складання бібліографії.

Розробляється перший варіант теоретичної частини:

- постановка мети і конкретних завдань дослідження;
- визначення об'єкта й предмета дослідження;
- вибір методів (методики) проведення дослідження.

Виконується опис процесу дослідження згідно з обраним методом. Моделювання процесів у електроприводі стрічкового конвеєра проводиться шляхом математичного моделювання з використанням пакету Simulink програми MATLAB.

Наводиться інтерпретація отриманих результатів дослідження.

На підставі виконаних розрахунків та отриманих характеристик проводиться узагальнення отриманих теоретичних результатів.

На заключному етапі роботи проводиться розробка заходів охорони праці та охорони навколишнього середовища, впровадження результатів магістерського дослідження у навчальний процес.

Попередній робочий план дослідження лише в загальному дає характеристику об'єкта і предмета дослідження, з часом такий план уточнюється в процесі роботи. Як правило, це план-рубрикатор, який складається з переліку розміщених у логічній послідовності розділів, підрозділів, рубрик досліджуваної теми.

Алгоритм магістерського дослідження представлений структурно-логічною схемою у вигляді табличної інформаційної моделі (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Структурно-логічна схема магістерського дослідження

Дослідження системи керування електропривода конвеєра завантаження зерна (норії)	
Складання індивідуального календарного плану роботи	
Пошук літератури за темою, її аналіз, складання бібліографії	
Підготовка теоретичної частини	Сучасний стан досліджень транспортно-технологічних механізмів, аналіз систем керування приводами конвеєрів
	Класифікація транспортуючих машин
Опис об'єкту дослідження	Розгляд будови, конструкції і основні вузли ківшевої норії
	Аналіз існуючих типів електродвигунів, обґрунтований вибір двигуна
	Аналіз та вибір системи керування обраним двигуном
Опис процесу дослідження	Розгляд способів регулювання кутової швидкості електродвигуна, вибір електропривода
	Моделювання перехідних процесів та аналіз результатів
Узагальнення результатів моделювання	Інтерпретація отриманих результатів дослідження
	Формулювання висновків
Узагальнення науково-теоретичних результатів	
Розробка заходів з охорони праці	
Реалізація отриманих результатів у навчальний процес	

2.3 Вибір методу розрахунку поставленої задачі

Дана магістерська робота не передбачає проведення експериментальних досліджень, має теоретичний характер, тому основним методом для відображення отриманих результатів є моделювання.

Моделювання як метод наукового пізнання виникло в зв'язку з необхідністю вирішення завдань, які з тих чи інших причин не можуть бути вирішені безпосередньо. Вони виникають у випадках, коли об'єкт або недосяжний для дослідника, або він ще не існує і потрібно обрати оптимальний варіант його створення, або дослідження реального об'єкта вимагає багато часу та економічно невигідне тощо. Таким чином, модель виконує функцію проміжної ланки між

дослідником та об'єктом пізнання. Метод моделювання передбачає, що об'єкт вивчається не безпосередньо, а шляхом дослідження іншого об'єкта, який є аналогом першого

Модель (від лат. *modulus* – міра) – це певний умовний образ об'єкта дослідження, котрий замінює останній і перебуває з ним у такій відповідності, яка дозволяє отримати нове знання. Модель будується для того, щоб відобразити характеристики об'єкта (елементи, взаємозв'язки, структурні та функціональні властивості), суттєві з точки зору мети дослідження. Отже, моделювання пов'язане зі спрощенням, огрубленням прототипу, абстрагуванням від ряду його властивостей, ознак, сторін.

Отже, моделювання з точки зору наукового дослідження – це метод опосередкованого пізнання за допомогою штучних або природних систем, які зберігають певні особливості об'єкта і, таким чином, заміщуючи його, дають змогу отримати нове знання про оригінал. У системному аналізі моделі є дуже важливим компонентом дослідження та проектування нових систем. Не менш важливий і прагматичний аспект моделювання, при якому модель розглядається як засіб керування системою.

Модель є цільовим відображенням об'єкта-оригінала, що виявляється у множинності моделей одного й того ж об'єкта, тобто для різної мети або завдань дослідження можна будувати різні моделі, тому мета або завдання дослідження визначають, які саме ознаки системи мають бути відображені в моделі. Отже, питання про якість такого відображення – адекватність моделі реальності – правомірно вирішувати лише стосовно поставленої мети. Процес дослідження реальних систем, що охоплює побудову моделі, дослідження її властивостей і перенесення одержаних відомостей на реальну систему, називають моделюванням.

Основна функція моделі – це її використання як засобу пізнання. До конкретизованих (похідних від основної) функцій належать: засіб наукового осмислення дійсності, засіб спілкування, засіб навчання і тренування, інструмент прогнозування, засіб постановки та проведення експерименту.

Для детальнішого опису систем використовують моделі складу та моделі структури. Модель складу системи відображає, з яких елементів і підсистем

складається система, а модель структури застосовується для відображення відношень між елементами та зв'язків між ними.

Модель структури описує суттєві зв'язки між елементами та підсистемами. При використанні графічних моделей будову систем подають у вигляді так званих структурних схем. Структурні схеми наглядні та містять інформацію про велику кількість властивостей системи.

Залежно від форми подання об'єкта моделювання поділяють на реальне та абстрактне.

При реальному моделюванні використовують можливість дослідження характеристик на реальному об'єкті чи на його частині, а при натурному – проводять дослідження на реальному об'єкті з подальшим обробленням результатів експерименту на основі теорії подібності.

Метод фізичного моделювання передбачає дослідження на моделі, що відтворює основні геометричні, фізичні, динамічні і функціональні властивості "оригіналу" і володіє великими можливостями по визначенню різних якостей електромеханічних систем та їх елементів.

Абстрактне моделювання має різні види: наочне, символічне, математичне. Метод математичного моделювання заснований на здатності математично описувати рівняннями різноманітні за природою явища (процеси) і виявляти різні функціональні зв'язки між елементами системи [8].

При математичному моделюванні застосовують аналітичні та статистичні моделі. Аналітичні моделі більш грубі, враховують менше число чинників, завжди вимагають деяких припущень і спрощень, проте вони більш пристосовані для пошуку оптимальних рішень. Статистичні методи в порівнянні з математичними більш громіздкі.

Дослідження математичної моделі дає змогу отримати характеристики реального об'єкта чи системи. Вигляд математичної моделі залежить як від природи системи, так і від завдань дослідження. Математична модель системи містить, як правило, опис множини можливих станів системи та закон переходу з одного стану в інший. Математичне моделювання охоплює імітаційне, інформаційне, структурне, ситуаційне тощо.

На етапі вибору математичної моделі встановлюються: лінійність і не лінійність об'єкта, процесу або системи, динамічність або статичність, стаціонарність або не стаціонарність, а також ступінь детермінованості досліджуваного об'єкта чи процесу. При математичному моделюванні свідомо відволікаються від конкретної фізичної природи об'єктів, процесів або систем і, в основному, зосереджуються на вивченні кількісних залежностей між величинами, що описують ці процеси.

Розрахунок задач магістерського дослідження проводиться за допомогою електронної обчислювальної техніки за допомогою програми Mathcad. На базі складених диференціальних рівнянь проводиться математичне моделювання системи керування електропривода. За допомогою програми Simulink досліджуються перехідні характеристики системи при зміні задавальних параметрів.

Метод моделювання – вивчення явищ за допомогою моделей – сьогодні має особливе значення для вирішення складних фізичних завдань, чому значною мірою сприяє зростанню продуктивності комп'ютерної техніки. Саме тому в цьому магістерському дослідженні як основа використаний метод математичного моделювання.

2.4 Висновки до розділу 2:

- вибраний та обґрунтований метод наукового дослідження.;
- побудована структурно-логічна схема магістерського дослідження;
- обґрунтований вибір методу розрахунку задачі і показано, що метод математичного моделювання дозволяє досліджувати перехідні режими в електроприводі ківшевої норії.

.

РОЗДІЛ 3

ВИБІР ТИПУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА КОМПЛЕКТНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

3.1 Аналіз існуючих видів електродвигунів

В даний час широко поширені високомоментні двигуни постійного струму із збудженням від постійних магнітів.

Їх достоїнства, що полягають у гарних регульовальних властивостях, помірних габаритних розмірах, високій швидкодії, невисокій складності живильного перетворювача, забезпечили їхнє широке застосування.

Основним недоліком високомоментних двигунів є наявність тертьового струмоз'ємного щітково-колекторного вузла, що знижує надійність машини. Зміна механічних і електричних властивостей щіткового контакту в процесі експлуатації, і як наслідок порушення процесу комутації. Крім того, за рахунок проникнення часток зносу щіткового контакту між витками зменшується опір ізоляції. Усе це приводить до зниження надійності і працездатності.

Безколекторні двигуни вимагають мінімального обслуговування, що дозволяє установлювати їх на механізми, які працюють у гнучких виробничих системах. Використання цих двигунів у безкорпусному варіанті із шихтованою станиною і "охолюваним" ротором дозволяє знизити їхні габаритні розміри і зменшити передачу тепла від електродвигуна на устаткування.

Електродвигуни перемінного струму простіші у виготовленні і надійніші в експлуатації, чим двигуни постійного струму (ДПС). При раціональній конструкції обертового ротора (малий діаметр і велика довжина) і зниженні його шорсткості шляхом заливання епоксидними смолами (з наступною обробкою) вдається одержати високий ККД двигуна – до 80%.

Енергозбереження – найважливіше завдання сьогодення. Це завдання має надзвичайне значення для асинхронних електродвигунів. Проведені українськими вченими дослідження показують, що асинхронні двигуни в складі

автоматизованого електроприводу споживають по різних оцінках від 40 до 70 відсотків електроенергії. Зокрема, результати деяких досліджень [6].

Параметри двигунів перемінного струму залежать від номінальної частоти живильної напруги. Так, з підвищенням частоти погіршуються електричні показники і ККД, але зате в значній мірі зменшуються їх масогабаритні показники.

Двигуни перемінного струму, а особливо асинхронні з короткозамкнутим ротором, давно стали популярними завдяки простоті у виготовленні й обслуговуванні, надійності і працездатності. Але в регульованих електроприводах вони уступали машинам постійного струму через складність системи керування. В даний час, завдяки використанню нових схем і спеціальних імпульсних силових напівпровідникових приладів забезпечується зниження вартості і втрат електроенергії (особливо при застосуванні силових приладів). Таким чином, асинхронні машини усе більше витісняють ДПС у регульованих електроприводах.

3.2 Основні вимоги до електроприводів та вибір типу електродвигуна

До промислового електропривода пред'являються наступні вимоги [4]: - висока експлуатаційна надійність, мінімальне технічне обслуговування при мінімумі персоналу, зайнятого ремонтом і налагодженням устаткування;

- можливість оперативного переналагодження (у тому числі автоматизованого) електроустаткування,

- забезпечення автоматизованого контролю функціонування устаткування за рахунок використання систем діагностики, індикації і захисту.

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

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

Електропривод повинний забезпечити роботу при:

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

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

Основними умовами на вибір типу привода для розглянутої установки є:

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

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

У регульованих електроприводах використовуються асинхронні електродвигуни з короткозамкненим чи фазним ротором, синхронні і вентильні електродвигуни.

В роботі розглядається норія ківшева, в якій застосований асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором серії 4А потужністю 7,5 кВт.

Враховуючи характеристику даного транспортного засобу по пожежовибухонебезпечності, для подальшого дослідження системи керування

електропривода норії для існуючих потужності та частоти обертання по каталогу вибираємо більш сучасний електродвигун типу АІР132М6У3 зі ступенем захисту ІР44, основні технічні характеристики якого наведені в таблиці 3.1 [2]

Таблиця 3.1 -Технічні характеристики електродвигуна АІР132М6У3

Параметр	Значення
Типорозмір	АІР132М6У3
Потужність електродвигуна , кВт	7.5
Число пар полюсів, шт	6
Синхронна частота обертання ротора, об/хв.	1000
Номінальна частота мережі f , Гц	50
Номінальна напруга U , В	380
Струм при 380 В, I_H , А	17.2
Ковзання S_H , %	3,2
ККД %	86
Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$,	0,77
Кратність пускового моменту, $M_{\text{пуск}}/M_H$	2
Кратність мінімального моменту, M_{min}/M_H	1,8
Кратність максимального моменту, M_{max}/M_H	2,1
Кратність пускового струму, $I_{\text{п}}/I_H$	6,5
Момент інерції ротора J_{ϕ} , кг·м ²	0,0597

Електродвигун захищений від влучення пилу та водяних бризів на внутрішні робочі елементи. Однак умови його експлуатації вимагають відсутності в повітрі струмопровідних або агресивних елементів – це негативно позначається на довговічності виробу.

Загальна запиленість не повинна перевищувати 10 мг/м³. Максимальна висота розміщення – 1000 м над рівнем моря.

3.3 Аналіз існуючих систем керування двигунами перемінного струму

Загальні відомості про регулювання координат в системах електропривода.

Для забезпечення безперервного та якісного технологічного процесу необхідно контролювати різні величини, які стосуються електропривода (момент M , потужність P , точність переміщення і т.п.)

Ці величини мають назву – координати електропривода.

Для якісної оцінки вимог, що висуваються до ЕП, використовують загальні показники регулювання [15].

Показниками регулювання швидкості є:

1. Діапазон регулювання – характеризується співвідношенням значень максимальної швидкості до мінімальної, які можуть бути реалізовані у даному способі регулюванні.

2. Статична похибка регулювання швидкості – характеризує величину похибки за швидкістю при коливаннях моменту.

3. Плавність регулювання – характеризує кількість штучних механічних характеристик, можливих при даному діапазоні регулюванні, плавність регулювання тим більша, чим менший коефіцієнт плавності.

4 Стабільність роботи на заданій швидкості.

Стабільність роботи тим більша, чим більша жорсткість на штучній (м.х.).

5. Напрямок регулювання – однозонне або двозонне.

Регулювання називають однозонним, якщо швидкість можна регулювати лише в одну сторону відносно швидкості на природній м.х. при даному моменті. Наприклад: реостатне регулювання ДПС – є однозонним регулюванням «вниз», регулювання ДПС за потоком збудження є – однозонним регулюванням «вгору».

Регулювання називають однозонним – якщо дозволяє як збільшувати так і зменшувати швидкість двигуна відносно швидкості на природній (м.х.) при заданому моменті (частотне керування АД).

6. Економічність регулювання. Визначається ККД двигуна з одного боку, та втратами на обладнання та експлуатацію з іншого боку.

Основними законами регулювання є:

- регулювання із постійною швидкістю ω ;
- регулювання із постійним моментом M ;
- регулювання із постійною потужністю P ;

На практиці застосовуються наступні способи керування швидкістю асинхронного двигуна (АД) [3,7] таблиця 3.2.

Таблиця 3.2 -Способи керування швидкістю асинхронного двигуна

Спосіб керування швидкістю АД	Характеристика методу
Вмикання додаткового опору в ланцюг ротора (реостатне регулювання)	Переваги: просте і надійне обладнання; висока надійність керування. Недоліки: невисокий діапазон керування; низька економічність регулювання (через витрати енергії на опорах ротора)
Зміною напруги живлення за рахунок додаткових опорів статора, імпульсного регулювання і т.п.	Переваги: висока плавність регулювання; простота методу. Недоліки: зменшена напруга живлення; зменшений максимальний момент; невисока економічність регулювання.
Зміною кількості пар полюсів	Переваги: простота і надійність методу, високий ККД. Недоліки: низька плавність регулювання; погіршенні малогабаритні показники; підвищені витрати на матеріал
Ввід додаткової ЕРС у коло ротора (каскадні схеми вмикання АД з інерційними моментами та перетворювачами)	Переваги: простота в синхронізації швидкостей АД; висока економічність регулювання. Недоліки: необхідність застосування АД з фазним ротором; низька універсальність методів
Регулювання зміною величини і частоти напруги статора	Переваги: найбільший діапазон та плавність регулювання; висока точність регулювання; високий ККД двигуна. Частотне регулювання АД здійснюється за допомогою мікропроцесорних систем керування на основі математичного опису загальної двухфазної асинхронної машини (АМ)

Для досягнення необхідних технологічних параметрів конвеєрів найбільш перспективними є методи частотного керування електроприводом. Дане керування дозволяє регулювати швидкість конвеєра залежно від параметрів технологічного процесу. Режим роботи асинхронного двигуна при заданій частоті визначається напругою або струмом (потокм) статора й значенням абсолютного ковзання.

Частотно-регульований асинхронний електропривод може бути задіяний у реалізації всіляких технологічних процесів, що вимагають плавного регулювання швидкості в широких межах. Головне полягає в тому, що при переході на частотне регулювання швидкості електродвигунів з'являється можливість оптимізувати режим роботи технологічного обладнання.

Частотне керування дає максимальний ефект енергозбереження й забезпечує щадний, ресурсозаощаджуючий режим експлуатації як технологічного, так і електричного обладнання при значно знижених навантаженнях і динамічних впливах, які у свою чергу, сприяють підвищенню в кілька разів ресурсу роботи й зниженню експлуатаційних витрат на ремонт.

Частотне регулювання АД здійснюється за допомогою мікропроцесорних систем керування на основі математичного опису загальної двухфазної асинхронної машини (АМ).

При частотному керуванні замість безпосередньої подачі на двигун стандартної змінної напруги з мережі (одно або трифазної) напруга спочатку проходить процес перетворення. При цьому міняються деякі її ключові параметри, зокрема:

- амплітуда напруги й струму;
- частота напруги й струму;
- кутова різниця між окремими фазами;
- вектор магнітного потоку усередині обмоток ротора й статора.

Процес такого перетворення здійснюється в особливому пристрої, який прийнято коротко називати частотним перетворювачем або перетворювачем частоти (ПЧ).

Розрізняють два основних способи частотного керування:

- частотне керування, при якому як керуючі впливи прийняті частоти і напруги статора;

- частотне керування, при якому як керуючі впливи прийняті частота і струм статора.

Принципова можливість регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна зміною частоти живильної напруги випливає з формули

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

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

$$U_1 \approx E_1 = k \cdot \Phi \cdot f_1 .$$

Якщо при незмінній напрузі змінювати частоту, то потік буде змінюватися зворотно пропорційно частоті. Так, при зменшенні частоти потік зросте і це приведе до насичення сталі ротора машини і як наслідок до різкого збільшення струму і перевищенню температури двигуна; при збільшенні частоти потік буде зменшуватися і як наслідок буде зменшуватися припустимий момент [3].

Для найкращого використання асинхронного двигуна при регулюванні кутової швидкості зміною частоти необхідно регулювати напругу, одночасно у функції частоти і навантаження, що реалізовано тільки в замкнутих системах електропривода.

Частотне регулювання кутової швидкості електроприводів змінного струму з двигунами з короткозамкненим ротором знаходить все більше застосування в різних галузях техніки. Наприклад, в установках текстильної промисловості, де за допомогою одного перетворювача частоти, що живить групу асинхронних двигунів, що знаходяться в однакових умовах, плавно і одночасно регулюються їх кутові швидкості. Прикладом іншої установки з частотно-регульованими асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором можуть служити транспортні рольганги в металургійній промисловості, деякі конвеєри та ін

Частотне регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів широко застосовується в індивідуальних установках, коли потрібне отримання досить високих кутових швидкостей (для приводу електрошпінделем в металорізальних верстатах з частотою обертання до 20 000 об / хв).

Економічні вигоди частотного регулювання особливо істотні для приводів, що працюють в повторно-короткочасному режимі, де має місце часта зміна напрямку обертання з інтенсивним гальмуванням.

Для здійснення частотного регулювання кутової швидкості знаходять застосування перетворювачі, на виході яких по необхідному співвідношенню або незалежно міняється як частота, так і амплітуда напруги. Перетворювачі частоти можна розділити на електромашинні і вентильні. У свою чергу електромашинні перетворювачі можуть бути виконані з проміжною ланкою постійного струму і безпосереднім зв'язком. В останніх використовують колекторних машину змінного струму, на вхід якої подають змінну напругу з постійною частотою і амплітудою, а на виході її отримують напругу з регульованою частотою і амплітудою. Електромашинні перетворювачі з безпосереднім зв'язком практичного застосування не отримали.

Другий спосіб називається *частотно-струмовим* керуванням. Формування механічних характеристик асинхронних двигунів при частотному керуванні, як і при керуванні двигунами постійного струму, служить задачам забезпечення необхідної перевантажувальної здатності і жорсткості характеристик у всьому діапазоні регулювання швидкості.

Задана перевантажувальна здатність забезпечується шляхом виконання визначених співвідношень між частотою і напругою статора.

Жорсткість механічних характеристик може бути як завгодно високою при використанні зворотних зв'язків по швидкості. Варто підкреслити, що і без зворотних зв'язків по швидкості жорсткість механічних характеристик частотно-керованих електроприводів перемінного струму виявляється більш високою, ніж у приводів постійного струму. Ця обставина сприяє застосуванню простих систем керування асинхронними електроприводами, не оснащеними датчиками швидкості і контурами регулювання швидкості.

Крім вимог формування механічних характеристик двигунів, до систем керування можуть пред'являтися також вимоги відносного керування по енергетичних витратах, наприклад забезпечення необхідних моменту і швидкості

при мінімумі струму статора чи мінімумі втрат, забезпечення максимального моменту при заданому струмі статора.

Такі задачі керування вирішуються при використанні екстремальних систем керування.

Система *векторного* керування. Роздільне керування швидкістю й потокозчепленням асинхронного короткозамкненого електродвигуна можна ефективно робити, використовуючи принцип векторного керування. Координати електропривода, обмірювані в нерухомій системі координат, можуть бути перетворені до обертової системи координат, і з них можуть бути виділені постійні значення, пропорційні складовим векторам в обертовій системі координат. По цих координатах і виконується керування.

Вихідною інформацією для побудови системи векторного керування є інформація про миттєві значення й просторове положення вектору потокозчеплення в повітряному зазорі, миттєвих значеннях струмів або напруг статора й швидкості ротора двигуна. Обертова система координат приймається певним чином орієнтованою щодо вектору потокозчеплення двигуна. Зручні алгоритми керування мають місце при орієнтації координатної системи щодо вектору потокозчеплення ротора.

Переваги векторного регулювання:

- точне відпрацювання швидкості з компенсацією ковзання (навіть без зворотного зв'язку по швидкості);
- глибокий діапазон регулювання;
- в області малих частот двигун працює плавно й зберігає момент аж до нульової швидкості;
- швидка реакція на стрибки навантаження;
- при різких стрибках навантаження практично не відбувається стрибків швидкості, внаслідок високої динаміки регулювання;
- оптимізація ККД двигуна на низьких частотах;
- за рахунок регулювання струму намагнічування здійснюється оптимізація режиму роботи двигуна й зниження втрат.

Недоліком системи векторного керування є складність керуючих і функціональних пристроїв при реалізації перетворення координат і фаз, виконання компенсаційних зв'язків при широкому діапазоні регулювання швидкості й навантаження електропривода.

Переваги систем із частотними перетворювачами (ПЧ):

- енергозбереження. Впровадження системи керування на базі ПЧ замість традиційних систем, реалізованих на релейно-контакторному устаткуванні, дозволяє знизити споживання електроенергії від 1,5 до 2 рази залежно від номінальної потужності електродвигунів. Поліпшення енергетичних показників електропривода;

- плавний запуск і зупинка електропривода конвеєра. Це забезпечує зменшення ударних навантажень (коливань пускового моменту) при запуску й зупинці, обмеження пускових струмів електродвигунів. Гальмування механізму відбувається електродвигуном. Гальма використовуються тільки для втримання механізму під час стоянки;

- надійність. Повний захист електродвигунів від перевантажень по струму перегріву, обриву фаз і втрати на землю. Збільшення строку використання електроустаткування й механічних частин електропривода (гальм, редукторів, валів і муфт) . Зменшення витрат на технічне обслуговування й ремонт, як електричних так і механічних частин конвеєра.

Проаналізувавши наявні засоби і системи керування швидкістю обертання асинхронного електродвигуна, приходимо до висновку, що для керування електропривода ківшевої норії доцільно використати перетворювач з частотною системою керування.

На основі проведеного аналізу існуючих типів керування двигунів перемінного струму для керування електродвигуном норії вибраний перетворювач серії OMRON Varispeed F7 з **частотно-струмовим** керуванням.

3.4 Загальна характеристика й основні технічні дані комплектного електропривода OMRON Varispeed F7

Загальнопромислові перетворювачі частоти OMRON насамперед виділяються своєю надійністю, зручністю й універсальністю. Перетворювачі OMRON здатні забезпечити високий пусковий момент і точне регулювання швидкості для застосування в будь-якій машині або технологічній лінії. Завдяки широкому вибору мережних інтерфейсів, спеціалізованих прошивань і додаткових плат входів-виходів ці перетворювачі найбільше широко використовуються в промислових застосуваннях.

Частотні перетворювачі Omron мають багато спеціальних функцій, які часто відсутні в продукції інших виробників. Енергозбереження. Ця особливість дозволяє при виконанні тієї ж роботи економити від 5 до 30% електричної енергії шляхом забезпечення роботи електродвигуна при оптимальному ККД. В цьому режимі інвертор автоматично відстежує струм споживання, визначає параметри навантаження і знижує вихідну напругу. Режим заощадження енергії особливо ефективний при керуванні двигунами, що працюють велику частину часу з малим (або змінним) навантаженням.

Переваги застосування перетворювачів частоти OMRON Varispeed F7:

- трирівневе керування знижує пікові стрибки напруги на обмотках двигуна майже на 50%. Навіть при великій довжині кабелю живлення двигуна дросель змінного струму не потрібно;
- економія електроенергії в разі змінного навантаження, рівного максимальному пусковому моменту;
- векторне регулювання магнітного потоку.
- підвищений ресурс устаткування;
- широкий вибір додаткових плат: мережеві інтерфейси, плата ПЛК, інтерфейс Mechatrolink, аналогові і дискретні входи / виходи;
- кероване гальмування і автоматичний перезапуск при пропажі мережевої напруги;

- підхоплення обертового електродвигуна. Стабілізація швидкості обертання при зміні навантаження;
- значне зниження акустичного шуму електродвигуна;

Технічні дані перетворювача частоти OMRON Varispeed F7 наведені в таблиці 3.3 [18].

Таблиця 3.3 – Технічні дані перетворювача частоти OMRON Varispeed F7

Модель перетворювача	OMRON CIMR-F7
Область застосування	Насоси, вентилятори, ПТУ, екструдери, намотчики; конвеєри
200 В трифазний	від 0,4 кВт до 110 кВт
400 В трифазний	від 0,4 кВт до 300 кВт
Час розгону/гальмування	від 0,01 до 6000 с
4 режими роботи	
U/f control	Вольт-частотний принцип керування двигуна, ідеальний для керування групою асинхронних двигунів
Open Loop Current Vector	Принцип векторного керування двигуном без датчика зворотного зв'язку
U/f control with PG feedback	Вольт-частотний принцип керування двигуна з використанням сигналу від датчика зворотного зв'язку
Flux vector control	Принцип високоточного векторного керування двигуном з використанням сигналу від датчика зворотного зв'язку
Діапазон регулювання швидкості	1:40 (U/ f-регулювання) 1:100 (векторне керування з розімкнутим контуром) 1:1000 (векторне керування із замкнутим контуром)

Продовження таблиці 3.3.

Основні функції:	- автоматичний рестарт після провалля живлячої напруги; - контроль перевантаження/відсутності навантаження; - 17 фіксованих завдань швидкості; - 4 передвстановлених значень розгону/гальмування; - S-Криві розгону/гальмування; - 3-х провідна система керування; - автонастройка параметрів двигуна в режимі останову або обертання; - функція затримки; - режим дискретного керування вентилятором охолодження; - функція компенсації ковзання; - функція оптимізації моменту; - функція перезапуску після виникнення помилки перетворювача; - функція обходу резонансних частот; - обмеження діапазону вихідних частот; - режим уливання постійного струму під час запуску або останову двигуна; - ПДД – регулятор; - режим енергозбереження; - безшумна робота - програма налаштування для роботи із ПК Sysdrive Configurator
------------------	--

Для обраного електродвигуна АИР132М6У3 вибираємо модель перетворювача OMRON з параметрами, зазначеними в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Технічні характеристики обраної моделі OMRON Varispeed

Характеристика	Параметр
Номер моделі OMRON	CIMR-F7Z47P5
Максимальна припустима вихідна потужність двигуна	7,5 кВт
Номінальна вихідна потужність	16 кВт
Номінальний вихідний струм	21 А
Джерело живлення:	- максимальна напруга 3 фази, 380 В змінного струму; - номінальна частота 50/60 Гц

Загальна схема частотного перетворювача OMRON Varispeed F7 наведена на рисунку 3.1.

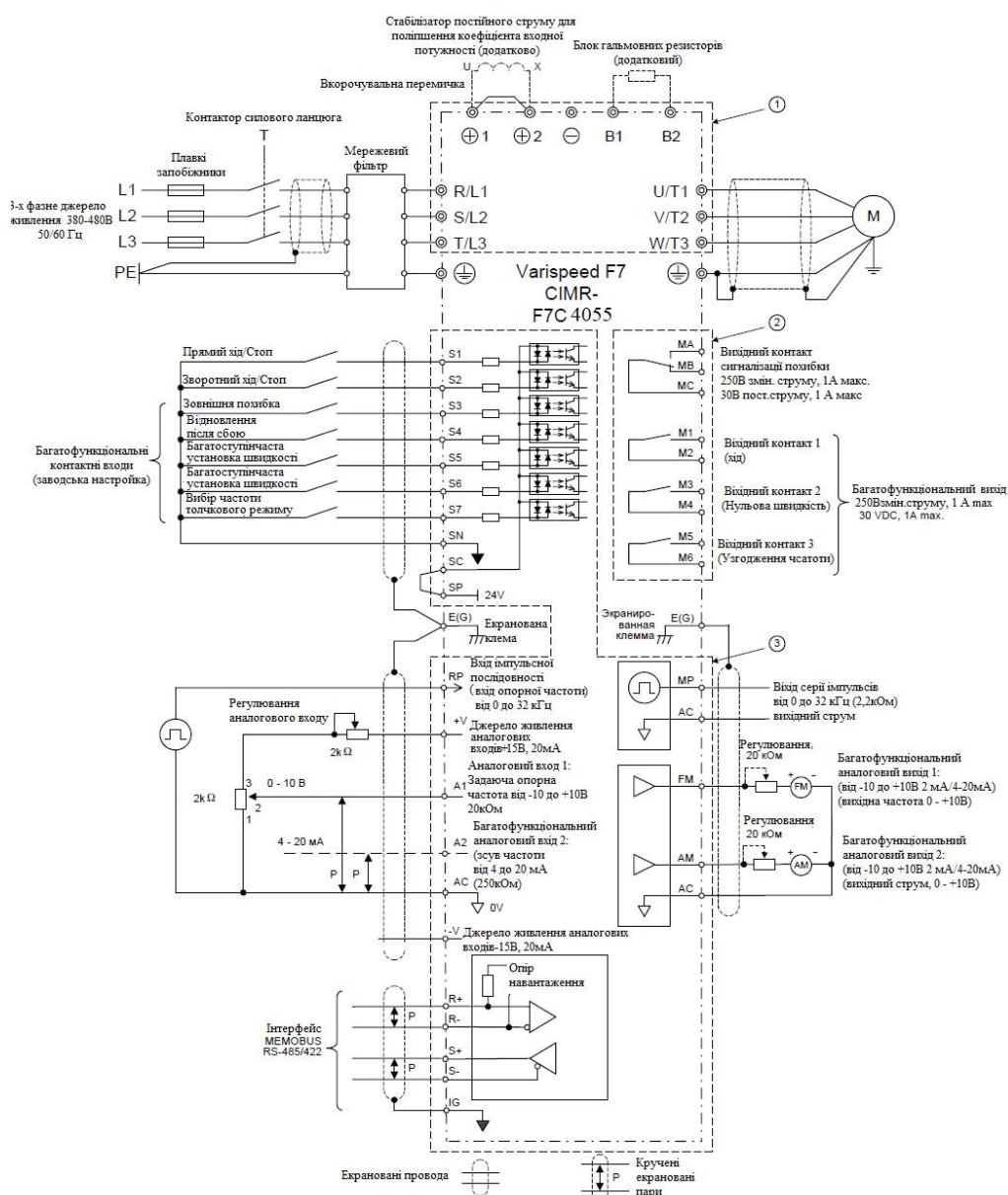


Рисунок 3.1 – Загальна схема частотного перетворювача OMRON Varispeed F7

Стандартна схема підключення перетворювача показана на рисунку 3.2.

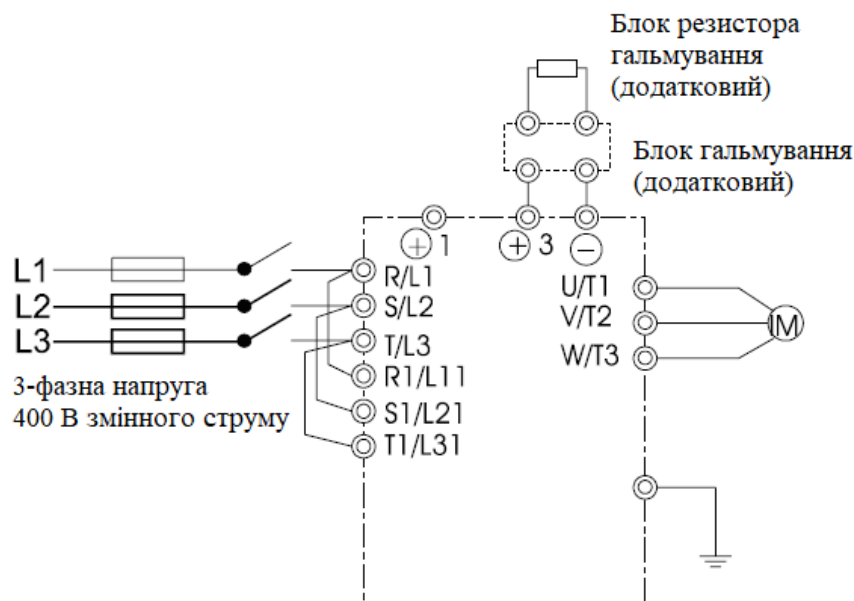


Рисунок 3.2 - Стандартна схема підключення перетворювача OMRON

3.3 Висновки до розділу 3:

- проведений аналіз існуючих систем керування двигунами перемінного струму. Відзначені перспективи застосування асинхронного двигуна з тиристорним перетворювачем частоти для керування швидкістю конвеєра;

- на основі проведеного аналізу для керування електродвигуном конвеєра вибраний перетворювач типу OMRON Varispeed F7, наведені його технічні дані та характеристики, показані загальна схема та схеми підключення перетворювача.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ДИНАМІКИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

4.1 Розробка функціональної схеми системи керування

Принцип роботи електропривода. Формування необхідних статичних і динамічних властивостей асинхронного частотно-регульованого електропривода можливо лише в замкненій системі регулювання його координат.

Узагальнена функціональна схема подібної системи (рисунок 4.1) крім асинхронного двигуна (АД) й керованого перетворювача частоти (ПЧ) містить регулятори Р і датчики Д перемінних електропривода. Керуючими впливами u_K на вході регуляторів можуть бути сигнали завдання будь-яких координат електропривода - швидкості, кута повороту ротора АД, струму статора, магнітного потоку й т.п. Збурюючими впливами на електропривод можуть бути моменти сил опору M_c на валу АД або коливання напруги живильної мережі U_c електропривода [17].

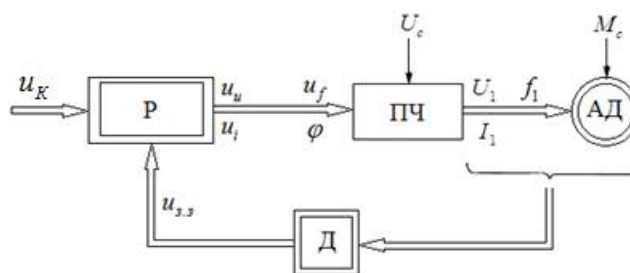


Рисунок 4.1 - Функціональна схема замкненої системи ПЧ-АД зі скалярним керуванням

Вхідними сигналами датчиків є перемінні АД, доступні для безпосереднього їхнього виміру (частота, напруга й струм статора, швидкість ротора, магнітний потік у повітряному зазорі АД) або обумовлені розрахунковим шляхом за допомогою математичної моделі АД (ЕРС, потокозчеплення статора, ротора й т.п.). Вихідні сигнали регуляторів, що залежать від керуючих впливів, сигналів зворотних зв'язків $u_{з.з}$ і прийнятих алгоритмів регулювання, є сигналами

керування частотою u_f , вихідною напругою u_u й струмом u_i перетворювача частоти.

При частотно-струмовому керуванні АД живиться від перетворювача частоти струму (ПЧС), працюючого в режимі джерела струму. Подібний перетворювач може бути реалізований на основі автономного інвертора струму (рисунок 4.2, а), до складу якого входять керований випрямляч, що забезпечує за рахунок негативного зворотного зв'язку по струму навантаження (датчик струму ДС і регулятор струму РС) разом з фільтруючим дроселем D_r режим керованого джерела постійного струму, та інвертор струму (ІС), що виконує функцію формування необхідної частоти вихідного струму. Реалізація ПЧС можлива і на основі перетворювачів частоти з безпосереднім зв'язком некерованого перетворювача частоти (НПЧ) (рисунок 4.2, б), в яких для кожної з вентильних груп є внутрішній контур регулювання струму, а частота вихідного струму НПЧ задається генератором частоти ГЧ. Контур регулювання струму ПЧС, як правило, астатичний, і параметри його ПІ-регулятора визначають так само, як і для ПІ-регулятора струму в електроприводах постійного струму [18].

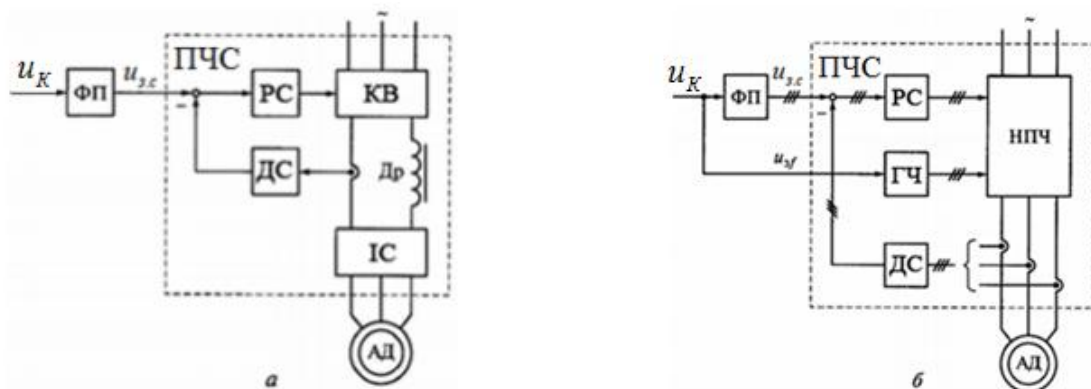


Рисунок 4.2 - Функціональні схеми систем ПЧ-АД при живленні від джерела струму на основі автономного інвертора (а) і перетворювача частоти з безпосереднім зв'язком (б)

Відмінною особливістю ПЧС є можливість двостороннього обміну енергією між його живильною мережею і двигуном з нереверсивним УВ за рахунок зміни напрямку проти-ЕРС інвертора і збереження напрямку в ньому випрямленого струму.

Керування двигуном проводиться за допомогою сигналів завдання

вихідного струму $u_{з.с.}$ і частоти $u_{з.ф.}$ перетворювача ПЧС. Обидва сигнали, у свою чергу, залежать від загального сигналу керування u_K .

При живленні АД від джерела струму внаслідок розмагнічуючої дії струму ротора магнітний потік АД помітно змінюється при зміні абсолютного ковзання. Тому для стабілізації магнітного потоку АД при зміні його навантаження в канал завдання струму ПЧС вводиться функціональний перетворювач ФП, що визначає завдання струму статора I_1 , у функції абсолютного ковзання s_a . Залежність $I_1 = f(s_a)$ і пропорційна їй залежність $u_{з.с.} = \Phi(u_K)$ є нелінійними функціями (рисунок 4.3), які на робочих ділянках механічних характеристик АД відповідають умові $I_1^2 \cong s_a$. Криві цих залежностей симетричні щодо осі струму (завдання струму), що визначається симетрією механічних характеристик АД в двигунному і генераторному режимах його роботи. Часто при технічній реалізації ФП користуються лінійною апроксимацією залежності $I_1 = f(s_a)$ (штрихова лінія на рисунку 4.3). Тут значення $I_{1\max}$ і $u_{з.с.\max}$ визначають максимально допустимий струм статора і сигнал його завдання, а $u_{з.с.\min}$ – струм холостого ходу АД і сигнал його завдання.

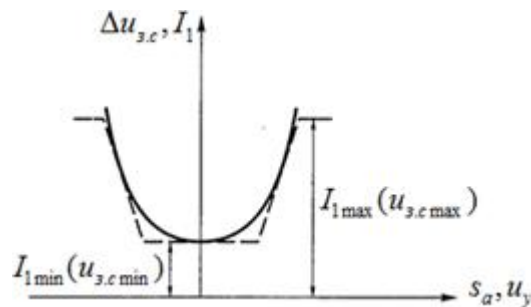


Рисунок 4.3 - Залежність струму статора від абсолютного ковзання АД

Відомі позитивні властивості АД при його живленні від ПЧС, такі як незалежність електромагнітного моменту АД від частоти і можливість при заданому струмі статора і абсолютному ковзанні, рівному критичному, забезпечити більший момент, ніж при живленні від джерела напруги, можуть бути реалізовані в замкнутій системі, яка контролює абсолютне ковзання і струм двигуна в функції навантаження. На рисунку 4.4 представлена функціональна схема подібної системи частотно-струмового керування АД.

чином, щоб з урахуванням $\omega_{0ном}$ його вихідний сигнал $u_{\phi чК}$ був пропорційний $(\omega_{0з} - \omega)$, то після сумування цього сигналу з вихідним сигналом $u_{ПП}$ узгоджувального пристрою ПП, пропорційним поточному значенню ω , на виході суматора Σ_2 пристрою завдання частоти (ЗЧ) інвертора струму ІС перетворювача ПЧС буде сформований сигнал

$$u_C = u_{\phi чК} + u_{ПП} \cong (\omega_{0з} - \omega) + \omega = \omega_{0з}.$$

В результаті на вихід ЗЧ буде сигнал завдання частоти вихідного струму ПЧС $u_{з.ф} \cong u_{з.ш.} \cong \omega_{0з}$, що визначає завдання синхронної швидкості АД.

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

Перед пуском двигуна ($u_{з.ш.} = 0$, $u_{РШ} = 0$) сигнал завдання частоти перетворювача $u_{з.ф} = 0$ і за рахунок характеристики ФП ($u_{з.ш. \min} \neq 0$) в АД задається постійний струм, який забезпечує потік намагнічування і режим динамічного гальмування АД. Зі збільшенням $u_{з.ш.}$ зростає сигнал завдання частоти, струм статора стає змінним із заданою частотою і двигун починає обертання під дією максимального моменту, встановленого сигналом $u_{з.ш.}$. Збільшення швидкості буде відбуватися до тих пір, поки не зрівняються сигнали завдання і зворотного зв'язку по швидкості двигуна. Після цього вихідний сигнал РШ при відсутності статичного навантаження на валу АД знову встановиться рівним нулю, але за рахунок позитивного зворотного зв'язку по швидкості вже при $u_{з.ф} \neq 0$. Потік холостого ходу АД буде при цьому створюватися змінним струмом $I_{1 \min}$ (рисунок 4.3).

4.1.1 Математичний опис структурної схеми електропривода з частотно-струмовим керуванням

Комплектний електропривод серії OMRON Varispeed F7 [18] має штатні складові, а тому розрахунку та вибору основних елементів не потребує. Але корегуюча ланка заводом-виробником не передбачується, бо вона розраховується під конкретний двигун. Окрім того, при налагодженні привода потрібно встановити значення регулюючих параметрів, які забезпечують необхідні динамічні якості системи. Це потребує проведення аналізу динаміки системи на основі її математичної моделі.

При дослідженні перехідних процесів у трифазних асинхронних електродвигунах доцільно прийняти припущення, які дозволяють в доступній математичній формі відобразити співвідношення основних параметрів та координат: сили обмоток двигуна розподілені синусоїдально вздовж кола повітряного зазору; втрати у сталі статора і ротора відсутні; обмотки статора і ротора строго симетричні зі зміщенням осей обмоток на 120° ; насичення магнітного кола відсутнє.

При розгляданні перехідних процесів досліджується ідеалізований асинхронний двигун, у якому магнітна рушійна сила (МРС) і індукція розподілені по окружності синусоїдально, втрати в сталі відсутні, ланцюг, що намагнічує, є лінійним. Диференційні рівняння ідеалізованого асинхронного двигуна у системі координат $x - y$, що обертається з синхронною швидкістю ω_o :

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= I_1 \cdot r_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + j\omega_o\psi_1; \\ 0 &= I_2 \cdot r_2' \frac{d\psi_2}{dt} + j(\omega_o - z_p\omega_2)\psi_2; \\ \psi_1 &= L_1 I_1 + L_0 I_2'; \\ \psi_2 &= L_2' I_2' + L_0 I_1, \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

де U_1, I_1, ψ_1 – вектори напруги, струму і потокозчеплення статора;

I_2' ψ_2 – ті ж параметри для ротора, приведені до статора;

L_0 – повна результуюча взаємна індуктивність обмотки статора і ротора;

L_2' , L_1' – повні результуючі індуктивності обмотки статора і ротора (приведені до статора), що складаються з індуктивності від головного потоку і індуктивностей від полів розсіювання;

r_1, r_2' – активні опори обмоток статора і ротора (приведені до статора);

ω_2 – кутова швидкість обертання ротора;

z_p – число пар полюсів двигуна.

Обертовий момент двигуна M ,

$$M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot I_m (\psi_1^* \cdot I_1) = \frac{3}{2} \cdot z_p \frac{L_0}{L_2'} \cdot I_m (\psi_2^* \cdot I_1). \quad (4.2)$$

Рівняння руху двигуна:

$$M - M_C = I \frac{d\omega}{dt}. \quad (4.3)$$

При живленні від АІС, коли заданий струм статора двигуна, доцільно перейти до рівнянь, що містять U_1 , I_1 , ψ_2 .

З третього і четвертого рівнянь системи (4.1):

$$\psi_1 = \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot I_1 + \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_2,$$

де $\Delta^* = L_1 L_2' - L_0^2$; $I_2' = \frac{1}{L_2'} \cdot \psi_2 - \frac{L_0}{L_2'} \cdot I_1$.

Підставимо дані вирази в перші два рівняння системи (4.1) і одержимо:

$$U_{1x} = R_1 I_1 + \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot \frac{dI_1}{dt} - \omega_0 \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y} + \frac{L_0}{L_2'} \cdot \frac{d\psi_{2x}}{dt} \quad (4.4)$$

$$0 = -\frac{R_2}{L_2'} \cdot L_0 I_1 + \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_2 + \frac{d\psi_2}{dt} + j(\omega_0 - z_p \omega_2) \cdot \psi_2 \quad (4.5)$$

Спроекуємо вирази (4.5) на осі x и y , а також введемо в якості незалежної перемінної I_1 , що спрямована уздовж осі x , при цьому $I_{1x} = I_1$:

$$\begin{aligned}
U_{1x} &= R_1 I_{1x} - \omega_0 \cdot \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot I_{1y} + \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot \frac{dI_{1x}}{dt} - \omega_0 \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y} + \frac{L_0}{L_2'} \cdot \frac{d\psi_{2x}}{dt}; \\
U_{1y} &= R_1 I_{1y} - \omega_0 \cdot \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot I_{1x} + \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot \frac{dI_{1y}}{dt} - \omega_0 \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2x} + \frac{L_0}{L_2'} \cdot \frac{d\psi_{2y}}{dt}; \\
0 &= -\frac{R_2'}{L_2'} \cdot L_0 I_{1x} + \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_{2x} + \frac{d\psi_{2x}}{dt} - (\omega_0 - z_p \omega_2) \cdot \psi_{2y}; \\
0 &= -\frac{R_2'}{L_2'} \cdot L_0 I_{1y} + \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_{2y} + \frac{d\psi_{2y}}{dt} + (\omega_0 - z_p \omega_2) \cdot \psi_{2x}.
\end{aligned} \tag{4.6}$$

$$\begin{aligned}
U_{1x} &= R_1 I_1 + \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot \frac{dI_1}{dt} - \omega_0 \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y} + \frac{L_0}{L_2'} \cdot \frac{d\psi_{2x}}{dt}; \\
U_{1y} &= \omega_0 \cdot \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot I_1 + \omega_0 \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2x} + \frac{L_0}{L_2'} \cdot \frac{d\psi_{2y}}{dt}; \\
0 &= -\frac{R_2'}{L_2'} \cdot L_0 I_1 + \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_{2x} + \frac{d\psi_{2x}}{dt} - (\omega_0 - z_p \omega_2) \cdot \psi_{2y}; \\
0 &= -\frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_{2y} + \frac{d\psi_{2y}}{dt} + (\omega_0 - z_p \omega_2) \cdot \psi_{2x}.
\end{aligned} \tag{4.7}$$

Знайдемо момент двигуна з виразу (4.3):

$$M = \frac{3}{2} z_p \frac{L_0}{L_2'} I_m \cdot \psi_2^* I_1, \tag{4.8}$$

де $\psi_2^* = \psi_{2x} - j\psi_{2y};$

$$I_1 = I_{1x} + jI_{1y}.$$

Підставимо значення ψ_2^* і I_1 у (4.8) і одержимо:

$$M = \frac{3}{2} z_p \frac{L_0}{L_2'} (\psi_{2x} I_{1y} - \psi_{2y} I_{1x}).$$

Так як при $I_{1x} = I_1, I_{1y} = 0$, то попередній вираз перетвориться в такий:

$$M = -\frac{3}{2} z_p \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y} I_1. \quad (4.9)$$

Запишемо систему рівнянь (4.7) і рівняння (4.9) в операторній формі:

$$\left. \begin{aligned} U_{1x}(p) &= (R_1 + \frac{\Delta^*}{L_2'} p) \cdot I_1(p) - \omega_0(p) \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y}(p) + \frac{L_0}{L_2'} p \psi_{2x}(p); \\ U_{1y}(p) &= \omega_0(p) \cdot \frac{\Delta^*}{L_2'} I_1(p) + \omega_0(p) \cdot \frac{L_0}{L_2'} \psi_{2x}(p) + \frac{L_0}{L_2'} p \psi_{2x}(p); \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

$$\left. \begin{aligned} 0 &= -\frac{R_2'}{L_2'} \cdot L_0 I_1(p) + \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_{2x}(p) + p \psi_{2x}(p) - (\omega_0(p) - z_p \omega_2(p)) \cdot \psi_{2y}(p); \\ 0 &= \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_{2y}(p) + p \psi_{2y}(p) + (\omega_0(p) - z_p \omega_2(p)) \cdot \psi_{2x}(p); \\ M &= -\frac{3}{2} z_p \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y}(p) I_1(p). \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

При живленні двигуна від АІС, нас буде цікавити тільки активна складова напруги $U_{1x}(p)$, тому при побудові структурної схеми асинхронного двигуна, друге рівняння системи (4.10) використовуватися не буде.

$$\left. \begin{aligned} U_{1x}(p) &= R_1(1 + \frac{\Delta^*}{L_2' R_1} p) \cdot I_1(p) - \omega_0(p) \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y}(p) + \frac{L_0}{L_2'} p \psi_{2x}(p); \\ \psi_{2x}(p) &= \frac{L_0}{(1 + \frac{L_2'}{R_2'} p)} \cdot I_1(p) + \left[-\frac{L_2'}{R_2'} / (1 + \frac{L_2'}{R_2'} p) \right] \cdot (\omega_0(p) - z_p \omega_2(p)) \cdot \psi_{2y}(p); \\ \psi_{2y}(p) &= \left[-\frac{L_2'}{R_2'} / (1 + \frac{L_2'}{R_2'} p) \right] \cdot (\omega_0(p) - z_p \omega_2(p)) \cdot \psi_{2x}(p); \\ M &= -\frac{3}{2} z_p \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y}(p) I_1(p). \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

На підставі системи рівнянь (4.12) і рівняння (4.3) складемо структурну схему асинхронного двигуна, що представлена на рисунку 4.5.

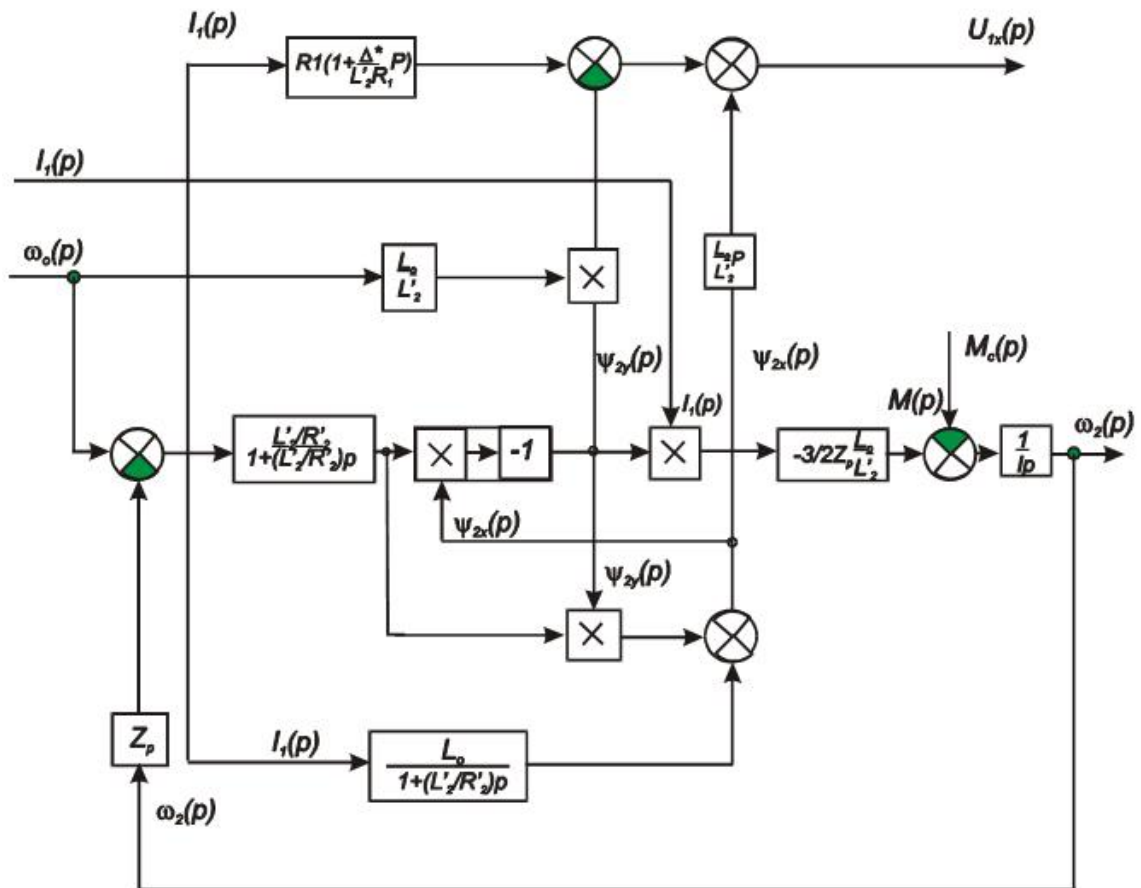


Рисунок 4.5 – Структурна схема асинхронного електродвигуна

Складену структурну схему асинхронного двигуна при керуванні кутовою частотою напруги статора й за умови сталості потокозчеплення статора зручніше побудувати, якщо представити координати двигуна у в.о.

Здійснимо перехід до умовних одиниць, прийнявши за базові значення координат їх значення у номінальному режимі: $M_{нфн}$; $\omega_{1н}$; $U_{1аH}$; $\omega_{0н}$,

$$\omega_{0H} = \frac{\omega_{1H}}{p_i},$$

де ω_{0H} – синхронна кутова швидкість двигуна, c^{-1} .

Тоді

$$\left[\frac{\Delta \omega}{\omega_{0H}} \right] = \Delta \bar{\omega}; \quad \left[\frac{\Delta \omega_1}{\omega_{1H}} \right] = \Delta \bar{\omega}_1; \quad \left[\frac{\Delta M}{M_{п.ф.н}} \right] = \Delta \bar{M}; \quad \left[\frac{\Delta M_o}{M_{п.ф.н}} \right] = \Delta \bar{M}_o; \quad \left[\frac{\Delta u_{1a}}{U_{1aH}} \right] = \Delta u_{1a}.$$

Передатна функція двигуна запишеться так

$$\frac{\Delta \bar{M}(p)}{\Delta \bar{\omega}_1(p) - \Delta \bar{\omega}(p)} = \left(\frac{\gamma}{\nu} \right)^2 \frac{(T_E p + 1) - \frac{(\frac{S}{S_{kp}})^2}{1 + (\frac{S}{S_{kp}})^2} (T_E p + 2)}{(T_E p + 1)^2 + (\frac{S}{S_{kp}})^2}, \quad (4.14)$$

де $\gamma = \frac{U_{1a}}{U_{1aH}}$ – відносна напруга статора;

$\nu = \frac{\omega_1}{\omega_{1H}}$ – відносна частота напруги статора, $\nu = 0,8$.

Або в спрощеному виді

$$\frac{\Delta \bar{M}(p)}{\Delta \bar{\omega}_1(p) - \Delta \bar{\omega}(p)} = \left(\frac{\gamma}{\nu} \right)^2 \frac{1}{T_E p + 1}. \quad (4.15)$$

Відповідно на підставі рівняння (4.14) маємо

$$\frac{\Delta \bar{M}(p)}{\Delta \bar{\omega}_1(p) - \Delta \bar{\omega}(p)} = \left(\frac{\gamma}{\nu} \right)^2 \frac{1}{T_M p}, \quad (4.16)$$

де $T_M = \frac{J \omega_{0H}}{M_{П.Ф.Н.}}$ – механічна постійна часу двигуна, с.

Спрощена структурна схема асинхронного двигуна при частотно-струмовому керуванні побудована на підставі виразів (4.15), (4.16), показана на рисунку 4.6.

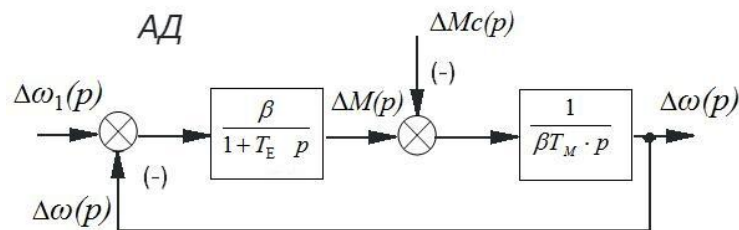


Рисунок 4.6 – Спрощена структурна схема асинхронного двигуна при частотно-струмовому керуванні

При розробці математичної моделі електропривода використано декілька допущень :

- частотний перетворювач, який працює у замкнутій системі керування по швидкості, здатен виконувати плавне регулювання частоти струму двигуна таким чином, що двигун працює на практично лінійній частині характеристики (момент опору від 0 до номінального і ковзання від 0 до номінального);

- вважаємо, що датчик швидкості має дуже малу інерційність, яку можна не брати до розрахунків.

Складаємо структурну схему для подальшого моделювання, виходячи з припущень, що система керування з частотним перетворювачем у складі замкненої системи керування відповідає по структурі двоконтурній системі підлеглого керування із внутрішнім контуром струму та зовнішнім контуром швидкості.

На рисунку 4.7 наведена структурна схема такого привода зі спрощеною математичною моделлю електродвигуна.

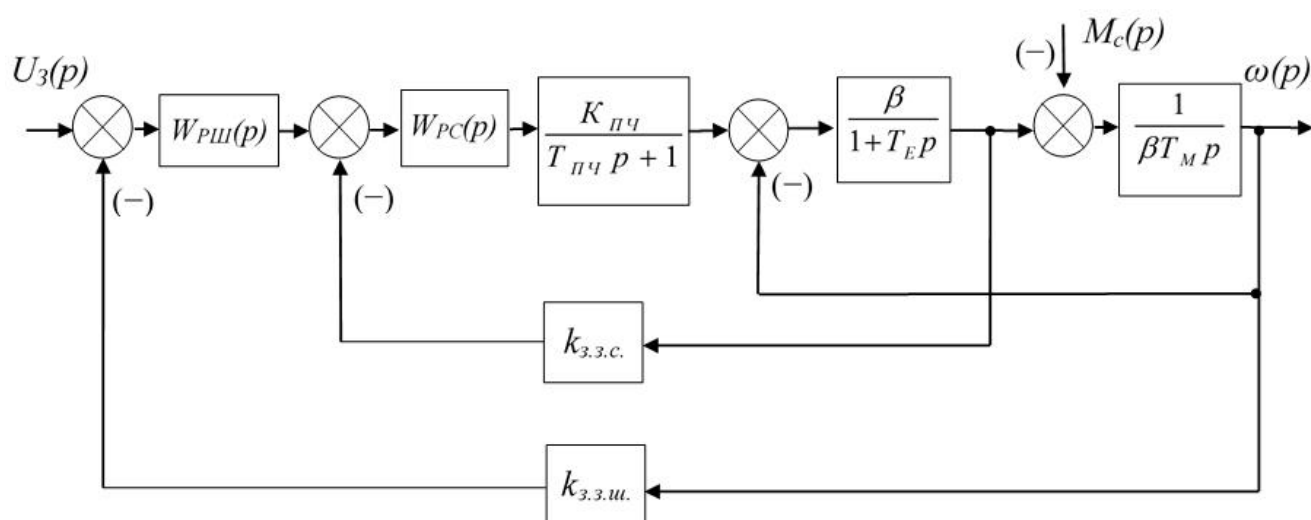


Рисунок 4.7 – Структурна схема електропривода зі спрощеною математичною моделлю електродвигуна

4.2 Розрахунок параметрів регуляторів електропривода з частотно-струмовим керуванням

Розглянемо докладніше структурну схему зображену на рисунку 4.7.

На схемі прийняті наступні позначення:

$W_{рш}(p)$ – передатна функція регулятора швидкості;

$W_{рс}(p)$ – передатна функція регулятора струму;

β – модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики;

T_E – еквівалентна електромагнітна постійна часу кіл статора та ротора АД;

T_M – електромеханічна постійна часу асинхронного двигуна;

$k_{ПЧ}$ – передатний коефіцієнт перетворювача частоти; $k_{ПЧ} = 50$;

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

Зворотні зв'язки за струмом та швидкістю виконаємо за допомогою пропорційних ланок з коефіцієнтами $k_{з.з.с}$ і $k_{з.з.ш}$ відповідно.

Регулятори швидкості і струму приймаємо як пропорційно-інтегральні ланки з коефіцієнтом передачі $k_{РШ}$ і $k_{РС}$ та постійними часу $T_{РШ}$ і $T_{РС}$ відповідно:

$$W_{РШ}(p) = k_{РШ} + \frac{1}{T_{РШ} \cdot p};$$

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

Структурна схема з наведеними передатними функціями регуляторів зображена на рисунку 4.8.

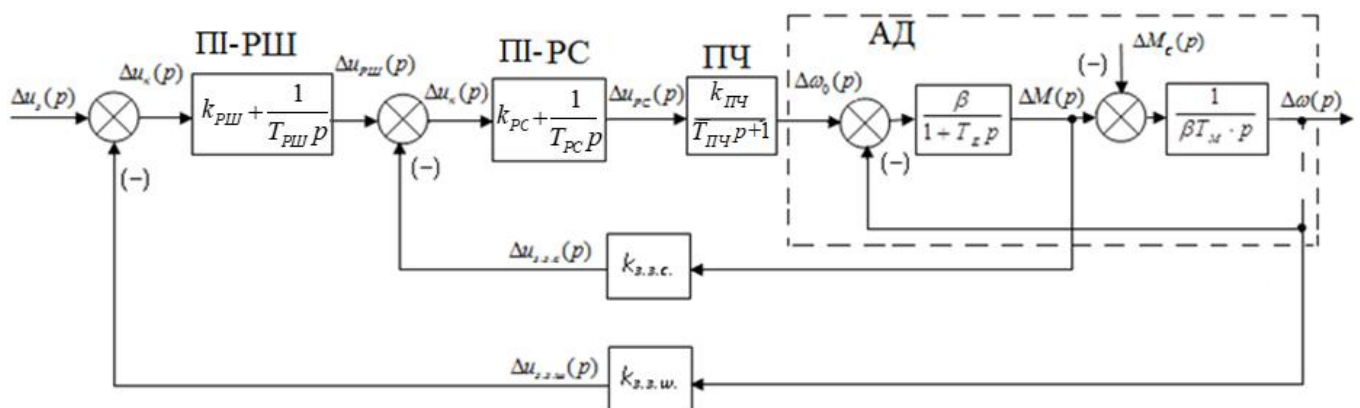


Рисунок 4.8 – Структурна схема електропривода

У відповідності зі структурною схемою передатна функція асинхронного двигуна

$$W_{AD}(p) = \frac{\beta}{T_E \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\beta \cdot T_M \cdot p},$$

де T_M – електромеханічна постійна часу двигуна.

Визначення параметрів здійснюється за допомогою перехідних характеристик.

Розрахуємо параметри елементів структурної схеми (рисунок 4.8).

Вихідні дані для розрахунку перехідних процесів зведені в таблицю 4.1.

Сформована структурна схема обраного електропривода з частотно-струмовим керуванням (рисунок 4.8) є основою для побудови динамічної структурної схеми системи керування електропривода згідно з функціональною схемою (рисунок 4.4).

Таблиця 4.1 - Вихідні дані для розрахунку перехідних процесів

Параметр	Значення
Типорозмір	АИР132М6У3
Потужність електродвигуна, кВт	7.5
Число пар полюсів p , шт	6
Синхронна частота обертання ротора n_n , об/хв.	1000
Номінальна частота мережі f , Гц	50
Номінальна напруга U , В	380
Номінальний струм статора при 380 В, I_H , А	17.2
Ковзання S_H , %	3,2
ККД, %	89
Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$,	0,77
Відношення максимального моменту до номінального, $M_{\max}/M_H$	2,1
Кратність пускового моменту, $M_{\text{пуск}}/M_H$	2
Кратність пускового струму, I_n/I_H	6,5
Момент інерції ротора J_o , кг·м ²	0,0597

4.2.1 Формування та розрахунок параметрів динамічної структурної схеми

Сформована структурна схема асинхронного двигуна при частотно-струмовому керуванні (рисунок 4.7) є основою для побудови динамічної структурної схеми системи керування електроприводом згідно з функціональною схемою (рисунок 4.4).

Для розрахунку параметрів структурної схеми необхідно попередньо визначити відсутні параметри двигуна, технічні данні якого наведені в таблиці 3.1.

Кутова швидкість електромагнітного поля статора ω_c , рад/с,

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot f_c, \quad (4.17)$$

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314,16 \text{ рад/с.}$$

Номінальна кутова швидкість ротора двигуна ω_H , рад/с,

$$\omega_H = \frac{\omega_c \cdot (1 - S_H)}{p}, \quad (4.18)$$

$$\omega_H = \frac{314,16 \cdot (1 - 0,032)}{6} = 50,7 \text{ рад/с.}$$

Номінальна момент двигуна M_H , Н·м,

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}, \quad (4.19)$$

$$M_H = \frac{7500}{50,7} = 147,9 \text{ Н·м}$$

Пусковий момент двигуна M_{II} , Н·м,

$$M_{II} = K_{\text{пуск}} \cdot M_H, \quad (4.20)$$

де $K_{\text{пуск}}$ - кратність пускового моменту, Приймаємо $K_{\text{пуск}} = 2$.

$$M_{II} = 2 \cdot 147,9 = 295,8 \text{ Н·м.}$$

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

$$M_{\max} = \frac{M_{\max}}{M_H} \cdot M_H, \quad (4.21)$$

$$M_{\max} = 2,1 \cdot 147,9 = 310,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критичене ковзання двигуна $S_{\text{кр}} = S_H (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$ за спрощеною формулою

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_H}, \quad (4.22)$$

де $\lambda = \frac{M_{\max}}{M_H} = 2,1.$

$$S_{\text{кр}} = 0,032 \cdot (2,1 + \sqrt{2,1^2 - 1}) = 0,126 = 12,6\%.$$

Для того, щоб змодельовати систему керування електропривода, приймаємо нелінійну характеристику АД у вигляді лінійної залежності, прийнявши наступні допущення:

- навантаження має стрибкоподібний характер свого зміни (накид і скидання статичного моменту навантаження);
- значення обурення не перевищує максимального моменту, що розвивається двигуном, тобто до і після обурення асинхронний двигун працює на стійкій частині своєї механічної характеристики.

Так як двигун працює спільно з перетворювачем частоти, то робота відбувається на стійкій частині механічної характеристики, яка описується наступним виразом

$$\frac{M_H}{2 \cdot M_{\max} \cdot \omega_c} \cdot p + \frac{S_{\text{кр}} \cdot M_H}{2 \cdot M_{\max}} = S_H. \quad (4.23)$$

Напишемо рівняння в такому вигляді

$$\frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_c \cdot S_H}{Z_p} \cdot p + M_H = M_{\text{СТ}}. \quad (4.24)$$

Рівняння (4.23) спільно з (4.24) складають систему, що описує поведінку асинхронного двигуна в перехідних процесах з урахуванням електромагнітних явищ. Якщо прийняти, що до стрибка навантаження двигун працював в сталому режимі, то цю точку можна покласти точкою з нульовими початковими умовами для подальшого перехідного процесу. Після відповідних перетворень, розглянута система прийме вигляд:

$$(T_E \cdot T_M \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1) \cdot M_H = M_{CT}, \quad (4.25)$$

$$\frac{S_{kp}}{2 \cdot M_{\max}} \cdot (T_E \cdot p + 1) \cdot M_H = S_H, \quad (4.26)$$

де T_E – електромагнітна постійна часу асинхронного двигуна, с;

T_M – електромеханічна постійна часу асинхронного двигуна, с.

Система рівнянь (4.25) і (4.26) дозволяє отримати передатну функцію розглянутої системи електропривода. Вхідний величиною тут є статичний момент опору M_{CT} , а вихідний – значення кутової швидкості і моменту двигуна.

Передатна функція по ковзанню має вигляд

$$W_s(p) = \frac{S_{kp}}{2 \cdot M_{\max}} \cdot \frac{T_E \cdot p + 1}{T_E \cdot T_M \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1}. \quad (4.27)$$

Визначення параметрів структурної схеми [17]. Модуль жорсткості механічної характеристики АД β , $\frac{H \cdot M}{c^{-1}}$,

$$\beta = \frac{M_H}{\omega_H \cdot S_H}, \quad (4.28)$$

$$\beta = \frac{147,9}{50,7 \cdot 0,032} = 91,2 \frac{H \cdot M}{c^{-1}}.$$

Еквівалентна електромагнітна постійна часу ланок статора і ротора T_E , с,

$$T_E = \frac{1}{\omega_c \cdot S_{kp}}, \quad (4.29)$$

$$T_E = \frac{1}{314,16 \cdot 0,126} = 0,025 \text{ с.}$$

Сумарний момент інерції електропривода J_Σ , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$,

$$J_\Sigma = J_H + 0,6 \cdot J_H, \quad (4.30)$$

$$J_\Sigma = 0,0597 + 0,6 \cdot 0,0597 = 0,0955 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Тривалість перехідного процесу у двигуні при одномасовій механічній частині характеризується електромеханічною сталою часу. Значення електромеханічної сталої лежить у межах $T_M = (0,08 - 2) \text{ с}$ і залежить від моменту інерції, електричного опору кола якоря та магнітного потоку.

Електромеханічна постійна часу двигуна T_M , с,

$$T_M = \frac{J_\Sigma}{\beta}, \quad (4.31)$$

$$T_M = \frac{0,0955}{91,2} = 0,001 \text{ с.}$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за швидкістю $k_{3.3.III}$, $\text{В} \cdot \text{с}$,

$$k_{3.3.III} = \frac{u_{3.3.III.HOM}}{\omega_H}, \quad (4.32)$$

де $u_{3.3.III.HOM}$ – напруга зворотного зв'язку за швидкістю, $u_{3.3.III.HOM} = 10 \text{ В}$.

$$k_{3.3.III} = \frac{10}{50,7} = 0,2 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом $k_{3.3.C}$, $\frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{Н} \cdot \text{м}}$,

$$k_{3.3.C} = \frac{u_{3.3.C.HOM}}{M_H / I_H}, \quad (4.33)$$

де $u_{3.3.C.HOM}$ – напруга зворотного зв'язку за швидкістю, $u_{3.3.C.HOM} = 10 \text{ В}$.

$$k_{3.3.C} = \frac{10}{147,9/17,2} = 1,16 \frac{B \cdot A}{H \cdot M}.$$

Для первинних розрахунків приймаємо, що величина постійної часу регулятора швидкості T_{PII} дорівнює величині постійної часу двигуна T_M , а регулятора струму T_{PC} – постійній часу частотного перетворювача $T_{ПЧ}$.

Коефіцієнти підсилення регуляторів k_{PC} і k_{PII} , що відповідають датчикам струму і швидкості, вважаємо рівними 10.

Коефіцієнт підсилення частотного перетворювача приймаємо $k_{ПЧ} = 50$.

Передатна функція перетворювача частоти разом з випрямлячем $W_{ПЧ}(p)$,

$$W_{ПЧ}(p) = \frac{k_{ПЧ}}{T_{ПЧ} \cdot p + 1}, \quad (4.34)$$

де $T_{ПЧ}$ – постійна часу комутації для транзисторів. Приймаємо $T_{ПЧ} = 0,005$ с.

Передатна функція регулятора струму $W_{PC}(p)$,

$$W_{PC}(p) = k_{PC} + \frac{1}{T_{PC} \cdot p}, \quad (4.35)$$

Передатна функція регулятора швидкості $W_{PII}(p)$,

$$W_{PII}(p) = k_{PII} + \frac{1}{T_{PII} \cdot p}, \quad (4.36)$$

де k_{PII} – коефіцієнт передачі регулятора швидкості, $k_{PII} = 10$;

T_{PII} – постійна часу регулятора швидкості, $T_{PII} = T_M = 0,001$ с,

Передатна функція асинхронного двигуна $W_{AD}(p)$,

$$W_{AD}(p) = \frac{\beta}{T_E \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\beta \cdot T_M \cdot p}, \quad (4.37)$$

4.3 Аналіз динамічних властивостей системи керування електропривода конвеєра завантажування зерна

Вихідні дані для розрахунку перехідних процесів зведені в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 - Вихідні дані для розрахунку перехідних процесів

Параметр	Одиниці виміру	Значення
Модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики	$\frac{H \cdot m}{c^{-1}}$	$\beta = 91,2$
Електромагнітна стала часу	с	$T_E = 0,025$
Електромеханічна постійна часу	с	$T_M = 0,001$
Постійна часу регулятора швидкості	с	$T_{PII} = 0,001$
Постійна часу перетворювача	с	$T_{ПЧ} = 0,005$
Постійна часу регулятора струму	с	$T_{PC} = 0,005$
Коефіцієнт підсилення (передачі) перетворювача	-	$k_{ПЧ} = 50$
Коефіцієнт підсилення регулятора швидкості	-	$k_{PII} = 10$
Коефіцієнт підсилення регулятора струму	-	$k_{PC} = 10$
Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за швидкістю	В·с	$k_{3.3.III} = 0,2$
Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом	$\frac{B \cdot A}{H \cdot m}$	$k_{3.3.C} = 1,16$

Передатні функції ланок:

– асинхронного двигуна:

$$W_{AD}(p) = \frac{\beta}{T_E \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\beta \cdot T_M \cdot p};$$

$$W_{AD}(p) = \frac{91,2}{0,025 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{0,091 \cdot p};$$

– перетворювача частоти:

$$W_{ПЧ}(p) = \frac{k_{ПЧ}}{T_{ПЧ} \cdot p + 1};$$

$$W_{ПЧ}(p) = \frac{50}{0,005 \cdot p + 1};$$

– регулятора струму:

$$W_{PC}(p) = k_{PC} + \frac{1}{T_{PC} \cdot p};$$

$$W_{PC}(p) = 10 + \frac{1}{0,005 \cdot p};$$

– регулятора швидкості:

$$W_{PII}(p) = k_{PII} + \frac{1}{T_{PII} \cdot p};$$

$$W_{PII}(p) = 10 + \frac{1}{0,001 \cdot p};$$

– фільтра на вході системи керування:

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{3 \cdot T_{PII} \cdot p + 1};$$

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{3 \cdot 0,001 \cdot p + 1} = \frac{1}{0,003 \cdot p + 1};$$

– коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом

$$W_{3.3.C}(p) = k_{3.3.C} = 1,16;$$

– коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за швидкістю

$$W_{3.3.II}(p) = k_{3.3.II} = 0,2.$$

Після розрахунків усіх величин, що входять у структурну схему (рисунок 4.8), були розроблені структурні схеми динамічних моделей системи з різними законами керування.

На рисунку 4.9 показана схема замкненої системи з ПІ-регулятором швидкості. На рисунку 4.10 показана схема замкненої системи з ПІ-регулятором швидкості. На рисунку 4.11 показана схема замкнутої системи з ПІ-регулятором швидкості і фільтром на вході в систему.

На основі даних схем був проведений аналіз динамічних властивостей системи автоматичного керування при зміні законів керування при розрахункових параметрах які представлені в таблиці 4.2.

Моделювання виконувалося у середовищі програми Simulink пакету MathLab [5].

На схемах зображено:

«Step» - джерело східчастого впливу величиною 10 В;

«Gain1» та «Gain2» - реалізують пропорційну складову ПІ-регуляторів швидкості та струму відповідно;

«Transfer Fcn1» та «Transfer Fcn2» - реалізують інтегральну складову ПІ-

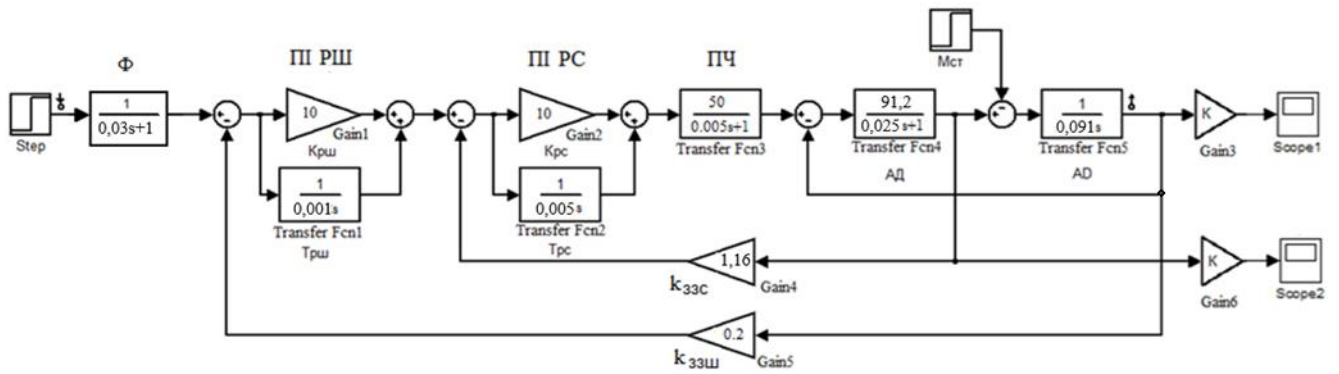


Рисунок 4.11 – Динамічна розрахункова модель з ПІ-регулятором швидкості і фільтром на вході в систему

На рисунках 4.12 та 4.13 наведені результати аналізу для перехідних процесів за швидкістю та за струмом.

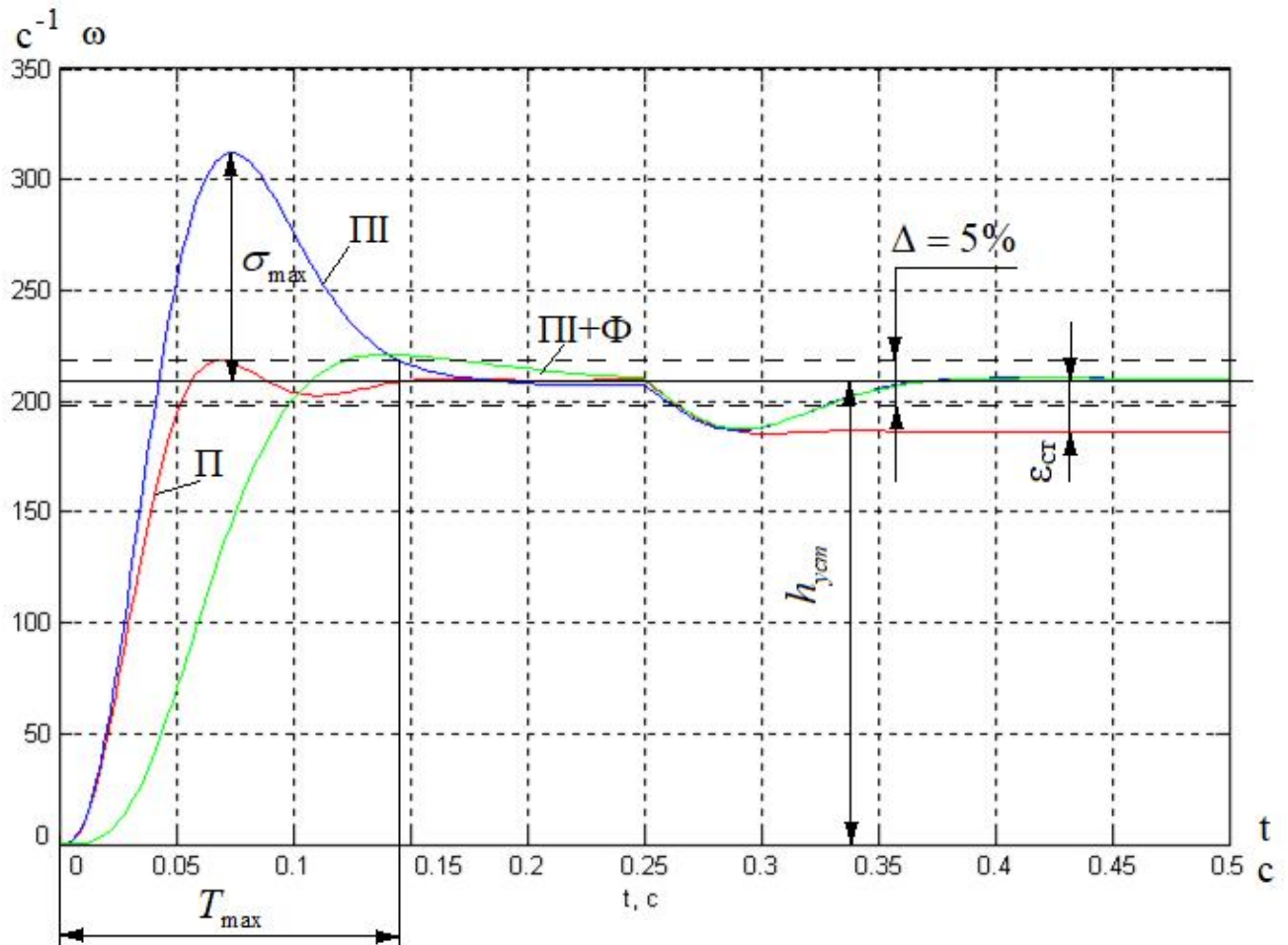


Рисунок 4.12 - Перехідні процеси по швидкості

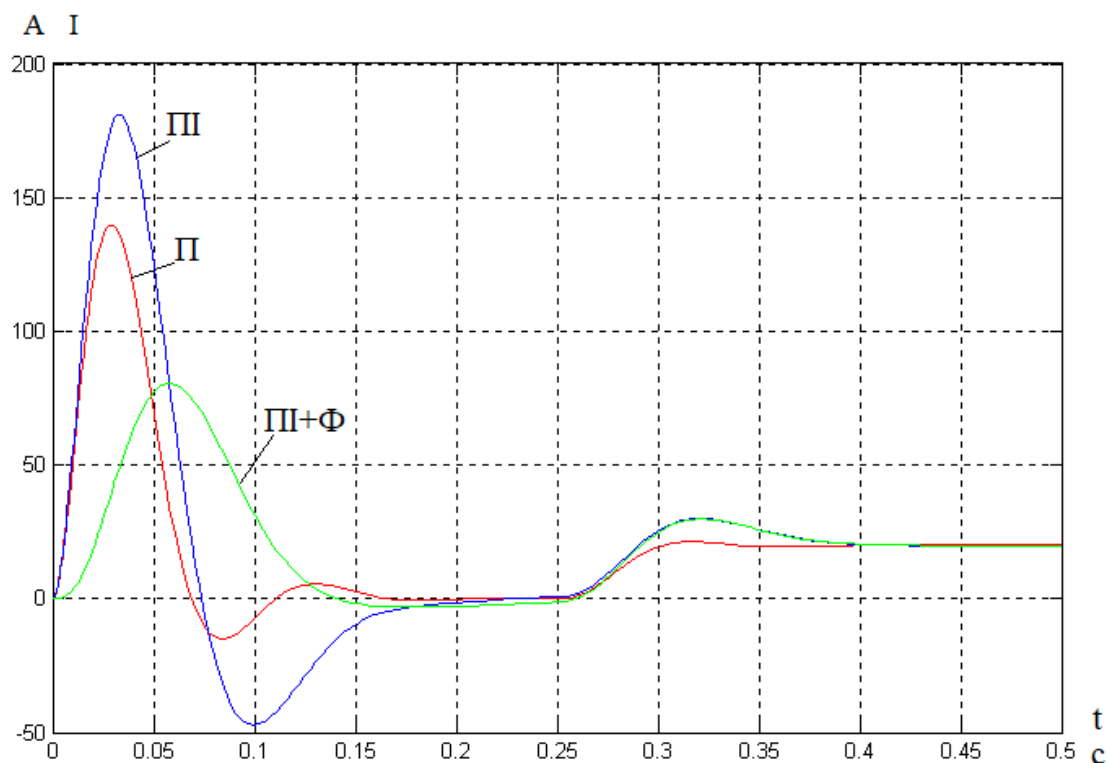


Рисунок 4.13 - Перехідні процеси по струму

Основні показники якості регулювання зведені в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 - Основні показники якості регулювання

Тип регулятора	$h_{уст}, c^{-1}$	h_{max}, c^{-1}	$\sigma_{max}, \%$	T_{max}, c	$\epsilon_{ст}, \%$	N
ПІ-регулятор	210	322	53	0,14	0	1
П-регулятор	210	222	5,7	0,06	8	1
ПІ-регулятор з фільтром на вході	210	225	6	0,11	0	1

По графікам змодельованих перехідних процесів системи ми бачимо, що найкращі показники перехідних процесів можна отримати, включивши ПІ-регулятор, налагоджений на симетричний оптимум, у контур регулювання швидкості. При цьому, високе значення перерегулювання, характерне для цього налагодження, зменшується шляхом включення на вхід системи керування фільтра.

Отримані наступні результати дослідження:

- при застосуванні пропорційно-інтегрального закону регулювання (ПІ-регулятор) перерегулювання склало $\sigma = 53 \%$, що більше допустимої величини 30%; час

перехідного процесу (по входу кривої в п'ятивідсоткову зону щодо значення, що встановилося,) $T_{\max} = 0,14$ с;

- при застосуванні пропорційного закону регулювання (П-регулятор) перерегулювання склало $\sigma = 5,7$ %, час перехідного процесу зменшився до $T_{\max} = 0,06$ с, але при цьому виникла статична похибка $\varepsilon = 8$ %;

- при введенні аперіодичної ланки (у якості фільтра) на вхід системи керування з ПІ-регулятором, перерегулювання склало $\sigma = 6$ %, час перехідного процесу $T_{\max} = 0,11$ с, коливальність $N = 1$, статична похибка відсутня $\varepsilon = 0$. При такій структурі системи керування максимальні відхилення струму не перевищують максимально допустимих значень.

Враховуючи отримані результати дослідження, остаточно для системи керування була обрана схема з ПІ-регулятором та фільтром на вході в систему.

В результаті отримуємо найменшу величину перерегулювання.

При такій структурі системи керування максимальні відхилення струму не перевищує максимально допустимих значень.

Таким чином, можна зробити висновок, що дана модернізація покращила динамічні характеристики системи.

Висновки до розділу 4:

- розроблена функціональна схема системи керування;
- проведений математичний опис структурної схеми електропривода з частотно-струмовим керуванням;
- складена структурна схема та розраховані її параметри;
- проведений аналіз динамічних властивостей структурної схеми.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НОРІЇ

Задачами охорони праці є безпека праці, попередження травматизму, професійних захворювань і отруєнь, пожеж і вибухів на виробництві, правової охорони праці, інженерної психології й організації праці.

Сутність охорони праці полягає у визначенні можливих небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що можуть проявитися при проведенні запланованих для виконання робіт; прогнозуванні моментів прояву зазначених факторів; проведенні необхідних профілактичних заходів.

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

Рівень безпеки будь-яких робіт у суспільному виробництві значною мірою залежить від рівня правового забезпечення цих питань, тобто від якості та повноти викладення відповідних вимог в законах та інших нормативно-правових актах [14].

В Україні розроблюються Національні, галузеві, регіональні та виробничі програми покращання стану умов та безпеки праці на виробництві, в ході реалізації яких були закладені основи для удосконалення державної системи управління охороною праці, впровадження економічних методів управління, вирішення питань організаційного, наукового і нормативно-правового забезпечення робіт у сфері охорони праці. Розроблені засоби захисту працюючих, які раніше не випускались в Україні; створено ряд засобів, що контролюють стан охорони та умови праці, небезпечні та аварійні ситуації; створена єдина автоматизована інформаційна система охорони праці тощо.

5.1 Аналіз небезпек і шкідливих виробничих факторів, що впливають на людину при роботі ківшевої норії

На підприємствах машинобудівної, харчової, переробної, легкої промисловості та багатьох інших для завантаження, розвантаження та переміщення різноманітних вантажів широко застосовуються стаціонарні та нестаціонарні різноманітні вантажопідіймальні і транспортні машини та механізми.

Для транспортування сипких або штучних вантажів на необхідну висоту застосовують елеватори (норії), які оснащуються ківшами для сипких вантажів.

Норії або ковшові елеватори є небезпечними виробничими об'єктами. Їхня експлуатація регламентується Правилами охорони праці для працівників, зайнятих на роботах зі зберігання та переробки зерна, затверджені наказом Міністерства соціальної політики України від 20.09.2017 № 1504, які зареєстровані в Міністерстві юстиції України.

При виконанні вантажно-розвантажувальних робіт із зерном та іншими сипучими продуктами норія повинна відповідати наступним вимогам:

- на норіях повинні бути встановлені: реле контролю швидкості (РКС) (Здвоєна норія повинна бути оснащена незалежними РКС кожної стрічки), датчики підпору (300-400 мм від башмака норії), пристрою контролю збігання стрічки, гальмовий пристрій, кнопки "Стоп" у головки й башмака норії, вибухорозрядний пристрій, попереджувальний сигнал запуску (при запуску з пульта керування), магнітний захист (на прийманнях сировини з автомобільного, водного й залізничного транспорту).

- при експлуатації норій повинні бути забезпечені натяг і регулювання ходу норійної стрічки, надійна установка кріпильних деталей, пилонепроникність частин, що рухаються, норії повинні бути надійно обгороджені.

Недотримання якого-небудь із перерахованих вище вимог, може привести до наступних наслідків:

- при відсутності вибухорозрядного пристрою, до викиду продуктів горіння в приміщення, у якому встановлена норія й ушкодження корпусу норії;

- при відсутності реле контролю швидкості, - до завалу норії продуктом внаслідок пробуксовки або обриву норійної стрічки;

- при відсутності датчика підпору, - до завалу норії продуктом, а в подальшому підвищується навантаження на електродвигун, а також можливий обрив стрічки й зупинка норії;

- при відсутності пристрою контролю збігання стрічки, - до зачіпання ковшів і норійної стрічки об корпус норії, а надалі утворення вибуху й ушкодження корпусу норії;

- при відсутності магнітного захисту, - до влучення металевих предметів у норію, а надалі пошкодження ковшів норії, утворення вибуху й пошкодження корпусу норії;

- при відсутності кнопки "Стоп" у головки й башмака норії, - до завалу устаткування, бункерів і силосів продуктом, прийнятим з норії;

- при недотриманні натягу й регулювання ходу норійної стрічки, надійної установки кріпильних деталей, пилонепроникності й надійного огороження частин, що рухаються, це може привести до завалу норії продуктом, зачіпання ковшів і норійної стрічки об корпус норії, утворення вибуху, ушкодження корпусу норії й травматизму на підприємстві.

Двигун перемінного струму закріплений на фундаменті і є стаціонарною установкою, що живиться від тиристорного перетворювача.

Небезпека одержання травми існує безупинно під час роботи ківшевої норії, у зв'язку з наявністю частин, що рухаються. Наслідок можливого впливу цієї небезпеки на обслуговуючий персонал - механічні травми, при одержанні яких можлива часткова або повна втрата працездатності, смертельний результат.

Виходячи з принципів "Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу", затвердженої наказом Міністерства охорони здоров'я України від 27.12.2001 р. № 528, умови праці діляться на 4 класи – оптимальні, допустимі, шкідливі та небезпечні (екстремальні).

Небезпечні і шкідливі виробничі фактори класифікуються відповідно до ГОСТ 12.0.003-74 "Система стандартів безпеки труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация".

Робота на конвеєрах повинна виконуватись з урахуванням наступних стандартів системи безпеки праці:

ДСТ 12.1. 004-91 "Пожежна безпека. Загальні вимоги";

ДСТ 12.3. 002-75 "Процеси виробничі. Загальні вимоги безпеки"

До основних небезпечних і шкідливих виробничих факторів при роботі на норіях відносять [21]:

- небезпеку поразки електричним струмом;
- вплив виробничих вібрацій на людину;
- шум на виробництві;
- неправильне виробниче освітлення;
- небезпеку виникнення пожеж.

Небезпека поразки електрострумом виникає в результаті керування технологічним устаткуванням. Електричний струм, проходячи через живий організм, здійснює термічний, електролітичний, а також біологічний вплив. Термічний вплив виявляється у виді опіків, розриву тканин, нагріванні судин, впливу на нервову систему.

Експлуатація електроустановок, повинна проводитись з дотриманням вимог електробезпеки відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2004, Правил захисту від статичної електрики НПАОП 0.00-1.29-97, Правил експлуатації електрозахисних засобів ГОСТ 12.1.013-78, ГОСТ 12.1.045-84, ГОСТ 12.2.007.1-75, ДСН 3.3.6.096-02, експлуатаційної документації та цих Правил.

Сама по собі, дія електричного струму приводить до досить серйозних травм при контакті людини з ним. Гранично допустимі рівні напруги та струмів доторкання установлює ГОСТ 12.1.038-82 "Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов".

Вплив виробничих вібрацій на людину. Параметри вібрації на робочих місцях повинні відповідати вимогам ГОСТ 12.1.012-90 та Державних санітарних норм виробничої загальної та локальної вібрації - ДСН 3.3.6.039-99.

Існують три основних принципи боротьби з вібрацією: зменшення сил, що викликають вібрацію (точне збирання механізмів, балансування й т.д.), усунення резонансі, штучне зусилля постійно виникаючого розсіювання енергії, тобто введення в систему демпфіювання.

Шум на виробництві. При тривалій дії шуму виникають зміни в нервовій системі людини, його органів травлення, підвищується кров'яний тиск, прискорюється пульс і подих. Це приводить до ослаблення уваги, погіршення реакції людини при змінах у системі керування.

Ці шкідливі наслідки шуму шкідливі тим більше, чим сильніше шум і чим триваліше його дія. Ці патологічні зміни, що виникли під впливом шуму, розглядаються як «шумова хвороба».

Підвищення шуму з 76 до 95 дБ знижує продуктивність праці на 25%.

Як це передбачено Державними санітарними нормами України ДСН 3.3.6.037-99, допустимі рівні шуму на різних об'єктах, територіях різного господарського призначення не повинні перевищувати показників наступних санітарних норм: 75...80 дБ.

Робоче освітлення. При проектуванні штучного освітлення виробничого приміщення необхідно вибирати тип джерела світла, систему освітлення, вид світильника, передбачати найбільш доцільні висоти влаштування світильників та розміщення їх в приміщенні; визначати потужність ламп, необхідних для створення нормованої освітленості на робочому місці.

Норма освітленості відповідно до ДБН В.2.5-28-2006 дорівнює 200 лк, а коефіцієнт природного висвітлення при спільному освітленні – 1,8 до III пояса. Найменша освітленість робочої поверхні виробничих приміщень і територій підприємства, що вимагають обслуговування при аварійних режимах, складає 5% від освітленості, нормованої для робочих приміщень при системі загального освітлення, але не менш 2 лк.

Пожежа на підприємствах становить велику небезпеку і може заподіяти величезний матеріальний збиток.

Запобігання пожежі згідно з ДСТ 12.1.004-91 "Пожежна безпека" та НАПБ А.01.001-95 Правила пожежної безпеки в Україні повинне досягатися запобіганням

утворення горючого середовища й запобіганням утворення в горючому середовищі джерел запалювання.

Нормативне регулювання. Загальні вимоги до улаштування засобів захисту промислових машин, механізмів та їх складових частин (з урахуванням європейського досвіду) визначають: [ДСТУ EN 292-2-2001](#), ДСТУ EN 953-2003, [ДСТУ EN 1088-2003](#), при цьому під час проектування огорож машин і механізмів необхідно враховувати вимоги [ДСТУ EN 294-2001](#), ДСТУ EN 811-2003, [ДСТУ EN 1005-2:2005](#), [ДСТУ EN 1005-3:2005](#).

Вимоги безпечної експлуатації конвеєрів визначають ГОСТ 12.2.022-80 (1996), ДСТУ ISO 1819:2013, ДСТУ ISO 7149:2013, ДСТУ EN 620:2013.

5.2 Заходи щодо безпечної експлуатації електрообладнання при роботі на ківшевих норіях

Норії оснащуються автоматизованими пристроями, які відключають привод, якщо спадає ланцюг з приводної зірочки або обривається ківшева стрічка. Кришки оглядових люків заблоковані з приводом елеватора так, щоб при їх відкриванні елеватор автоматично зупинявся. Безпечність при огляді і ремонті елеваторів забезпечується пристроями, що запобігають можливості зворотного ходу і падінню ківшевої стрічки.

Пуск елеватора дозволяється тільки з визначеного місця після попереднього сигналу. Система сигналізації повинна забезпечувати двосторонній сигнальний зв'язок місця запуску елеватора з ділянками обслуговування головок і башмаків елеваторів. Забороняється: запускати елеватор при недостатньому натягненні ківшевої стрічки чи ланцюгів; зупиняти елеватор під час завантаження; завантажувати елеватор без перевірки готовності до роботи наступного за ним обладнання транспортної лінії.

Кінцеві аварійні вимикачі, циліндри блокування, пристрою контролю швидкості повинні завжди підтримуватися в гарному робочому стані. У жодному разі не можна шунтувати або відключати кінцеві аварійні вимикачі.

При проведенні капітального ремонту, монтажу, огляду й робіт з технічного обслуговування, завжди відключайте приводний електродвигун, повністю від'єднуючи всі фази. Це здійснюється за допомогою вимикача, який встановлюється поруч із ковшовою норією або на контрольній панелі установки.

Чищення й змащення ківшевої норії, її частин і деталей повинне провадитися тільки коли ківшева норія зупинена.

Під час експлуатації в норії може нагромаджуватися зерновий пил, який за високої температури здатен спричинити виникнення пожежі та навіть руйнування в результаті вибуху. Очнення норії від пилу, бруду й відкладень речовин допомагає запобігти вибуху пилу.

Технічними заходами забезпечення безпеки роботи є:

- відключення електроустаткування, яке ремонтується, і вживання заходів проти помилкового його включення;
- аварійне відключення при обриві тягового органу, завалі перевантажувального пристрою, зягнутому пуску, відсутності захисту електродвигуна, при зниженні швидкості стрічки або бічному сходженні її тощо;
- установка тимчасових огорожень струмоведаччих частин і вивішування забороняючих плакатів : "Не включати - працюють люди" або "Не включати - роботи на лінії";
- приєднання переносного заземлення до заземлювальної шини стаціонарного пристрою, і перевірка відсутності напруги на струмоведаччих частинах, що для безпеки проведення робіт підлягають замиканню накоротко і заземленню;
- накладення переносних заземлень на відключені струмоведачі частини електропривода відразу після перевірки відсутності напруги або включення спеціальних роз'єднувачів, що заземлюють.

Безпека роботи в електроустановках забезпечується застосуванням електротехнічних засобів захисту.

При роботі з електричними ланцюгами напругою до 1000 В застосовуються наступні основні захисні засоби: діелектричні рукавички; вимірювальні оперативні штанги; електровимірювальні кліщі; показники напруги;

слюсарно-монтажний інструмент. До додаткових захисних засобів в електроустановках нижче 1000 В відносять калоші, гумові килимки, підставки, що ізолюють.

Через нагромадження зернового пилу потрібно встановити на норії датчики заповнення місткості, максимальної швидкості руху, перекосу стрічки. Бажаними також є датчики додаткового контролю важливих параметрів роботи конвеєра, наприклад, температури підшипників або запиленості робочого простору.

Для запобігання виникнення пожежі в приміщенні передбачена електрична пожежна сигналізація, що складається з датчиків сповіщення.

Для швидкої ліквідації вогнищ загоряння використовуються вогнегасники типу ОХП - 4 і ОУ - 2А.

Для запобігання можливого загоряння використовується ряд первинних засобів пожежогасіння, таких як пісок, багри, цебра, що знаходяться на пожежних щитах або біля них. Забороняється:

- чистити руками осадові камери аспіраційних улаштувань через оглядові люки. Цю роботу можна виконувати після повної зупинки машини;
- допускати накопичення пилу, відходів соломи, зернових решток та іншого сміття біля машин, в робочій зоні;
- під час роботи транспортера ставати на раму машини, відкривати кришки люків кожуха
- під час відкривання оглядових отворів знаходитися від них на віддалі витягнутої руки. Відкривання кришок оглядових отворів необхідно здійснювати спеціальними гаками.

5.3 Висновки до розділу 5:

- проведено аналіз потенційно небезпечних та шкідливих факторів при роботі на ківшевих норіях,
- наведені правила техніки безпеки для попередження нещасних випадків при роботі на ківшевих норіях
- наведені заходи щодо безпечної експлуатації електрообладнання при роботі на ківшевих норіях відповідно до нормативних вимог.

ВИСНОВКИ

Метою даної кваліфікаційної роботи магістра є модернізація системи керування електропривода конвеєра завантаження зерна (ківшевої норії) на основі застосування регульованого асинхронного двигуна.

У відповідності з поставленою метою в роботі проведено аналіз сучасного стану перетворювальної приводної техніки, проведений літературний огляд джерел з дослідження систем регулювання швидкості автоматизованого електропривода, обґрунтована актуальність модернізації системи керування роботою норії.

В якості об'єкту модернізації розглядається система керування електропривода норії стрічкової ківшевої типу НЗ-50.

Вибраний та обґрунтований метод наукового дослідження, побудована структурно-логічна схема магістерського дослідження. Обґрунтовано вибір методу розрахунку задачі і показано, що метод математичного моделювання дозволяє із залученням обчислювальної техніки досліджувати перехідні режими у системі керування електропривода норії.

Розглянуті класифікація транспортуючих машин та сфери використання норій, наведені дані про конструкцію, роботу та електричне обладнання ківшевих норій.

Проведений аналіз існуючих видів електродвигунів та вибраний більш сучасний електродвигун типу АІР132М6У3.

На основі проведеного аналізу систем керування двигунами перемінного струму для керування електродвигуном норії вибраний перетворювач типу OMRON Varispeed F7 з частотно-струмовим керуванням, наведені його технічні дані та характеристики, показана загальна схема підключення перетворювача частоти.

Розглянута функціональна схема замкнутої системи ПЧ-АД з частотно-струмовим керуванням та її робота, на основі функціональної схеми складена структурна схема частотно-струмової системи керування та розраховані її параметри.

Для вдосконалення динаміки системи проведена побудова й розрахунок математичних моделей системи керування асинхронним двигуном та проведений аналіз їх динамічних властивостей при зміні законів керування.

Отримані наступні результати дослідження:

- при застосуванні пропорційно-інтегрального закону регулювання (ПІ-регулятор) перерегулювання склало $\sigma = 53 \%$, час перехідного процесу (по входу кривої в п'ятивідсоткову зону щодо значення, що встановилося,) $T_{\max} = 0,14$ с;

- при застосуванні пропорційного закону регулювання (П-регулятор) перерегулювання склало $\sigma = 5,7 \%$, час перехідного процесу зменшився до $T_{\max} = 0,06$ с, але при цьому виникла статична похибка $\varepsilon = 8 \%$;

- при введенні аперіодичної ланки (у якості фільтра) на вхід системи керування з ПІ-регулятором, перерегулювання склало $\sigma = 6 \%$, час перехідного процесу $T_{\max} = 0,11$ с, коливальність $N = 1$, статична похибка відсутня $\varepsilon = 0$. При такій структурі системи керування максимальні відхилення струму не перевищують максимально допустимих значень.

Враховуючи отримані результати дослідження, остаточно для системи керування була обрана схема з ПІ-регулятором та фільтром на вході в систему.

Таким чином, можна зробити висновок, що дана модернізація покращила динамічні характеристики системи.

Отримані результати підтверджують вирішення задач по вдосконаленню динамічних якостей системи керування норії. Таким чином, основна мета роботи виконана.

В результаті проведеного аналізу потенційно небезпечних та шкідливих факторів були визначені заходи щодо безпечної експлуатації електрообладнання при роботі на ківшевих норіях.

Результати роботи можуть бути використані при проектуванні систем керування електроприводів в навчальному процесі кафедри автоматики НУК.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. **Александров М. П.** Грузоподъемные машины: Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана – Высшая школа, 2000. –552 с.
2. Асинхронные электродвигатели общего назначения серии АИР. Технический каталог. URL: <https://samsnab.com.ua/docs/Katalog-elektrodvigateli-AIR-TM-ELMO.pdf>.
3. **Бірта Г. О.** Методологія і організація наукових досліджень. навч. посіб. / Г. О. Бірта, Ю. Г. Бургу – К. : «Центр учбової літератури», 2014. – 142 с.
4. **Видмиш А. А.** Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.
5. **Гераїмчук М. Д.** Моделювання систем у середовищі MATLAB-SIMULINK: Комп'ютерний практикум / М.Д. Гераїмчук, Ю.Ф. Лазарєв, Т.О. Толочко. – К.:, 2006. – 175с.
6. **Грабко В.В.** Експериментальні дослідження електричних машин. Частина III. Асинхронні машини. Навчальний посібник. / В.В. Грабко, М.П. Розводюк, С.М. Левицький, М.О. Казак – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 197 с.
7. **Дацишин О.В.** Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв. – Вінниця: Нова книга, 2008.
8. **Козуб Ю.Г., Маслійов С.В.** Підйомно-транспортні машини: Підручник / Ю.Г. Козуб, С.В. Маслійов – Старобільськ: вид-во ДЗ „ЛНУ імені Тараса Шевченка”, 2018. – 277с.
9. **Колесников О. В.** Основи наукових досліджень. 2-ге вид. випр.. та доп. Навч. посіб. / О. В. Колесников - К.: Центр учбової літератури, 2011. – 144 с.
10. **Ловейкін В.С.** Моделювання динаміки механізмів вантажопідйомних машин. Монографія / В.С. Ловейкін, Ю.В. Човнюк, М.Г. Діктерук, С.І. Пастушенко - К.- Миколаїв: Вид.-во РВВ МДАУ, 2004.- 286 с.
11. **Ловейкін В.С.** Тенденції розвитку стрічкових ківшових елеваторів // Національний університет біоресурсів і природокористування України. / В.С. Ловейкін, В.А. Бортун. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/60814825.pdf> .

12. **Ляшук О.Л.** Створення та модернізація транспортно-технологічних механізмів машин і обладнання / О.Л. Ляшук, Р.Б. Гевко, В.О. Дзюра, О.М. Кирик, А.П. Довбиш. – Тернопіль: ТНТУ, 2019. – 167 с.

13. **Норія ківшева НЗ-50.** Паспорт. Руководство по эксплуатации.

14. **Основи охорони праці:** Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене. / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний, Д. В. Зеркалов, Р. В. Сабарно, О. І. Полукаров, В. С. Коз'яков, Л. О. Мітюк. За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. — К.:Основа, 2006 — 448 с.

15. **Регульований електропривод:** Підручник / І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, В.В. Козирський, Л.С. Червінський, Д.А. Абдураманов, А.В. Торопов, О.В. Санченко; За ред. І.М. Голодного. – К.: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. – 509 с.: іл.

16. **Строгина Ю. Б.** Совершенствование электропривода вертикальных установок конвейерного транспорта: автореф. дис. на получение науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.09.03 "Электротехнические системы и комплексы"/ Ю.Б. Строгина - Краснодар, 2004. - 20 с.

17. **Терехов В. М.** Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. - 2-е изд., стер. - М.: Издательский центр "Академия", 2006. - 304 с.

18. **Электропривод OMRON Varispeed F7.**

Техническое описание и инструкция по эксплуатации. URL: https://assets.omron.eu/downloads/manual/ru/g7_users_manual_ru.pdf

ДОДАТОК А

Мультимедійна презентація

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Волохов Володимир Володимирович

Кваліфікаційна робота магістра на тему:

"Модернізація системи керування електропривода конвеєра
завантаження зерна"

Керівник роботи – Васильєв О.Г.

Слайд 1 мультимедійної презентації

АКТУАЛЬНІСТЬ, МЕТА І ЗАДАЧІ РОБОТИ

Актуальність теми. Вертикальні стрічкові конвеєри – норії широко застосовуються на переробних підприємствах для переміщення неопрацьованого й обробленого зерна пшениці, соняшника, сої, шроту на різних стадіях їх переробки.

Збереження й раціональне використання всього вирощеного врожаю залежить від типу транспортуючого устаткування.

Основним вузлом, що визначає нормальну роботу норії, є її електропривод, моделювання процесу роботи якого надалі дозволить досліджувати й модернізувати конвеєрну установку з метою оптимізації її роботи, особливо в перехідних режимах та при різких стрибкоподібних змінах схем завантаження норії.

Наразі спостерігається тенденція впровадження в конвеєри, як найбільш продуктивний вид безперервного транспорту, частотно-керованих електроприводів.

Таким чином, застосування частотно-регульованого електропривода конвеєра, що забезпечує плавне регулювання лінійної швидкості стрічки, дозволяє отримати максимальну економію електроенергії транспортування вантажу при змінному вантажопотоці.

Тому розробка структури й ефективних алгоритмів функціонування системи автоматичного керування роботою норії є актуальним завданням.

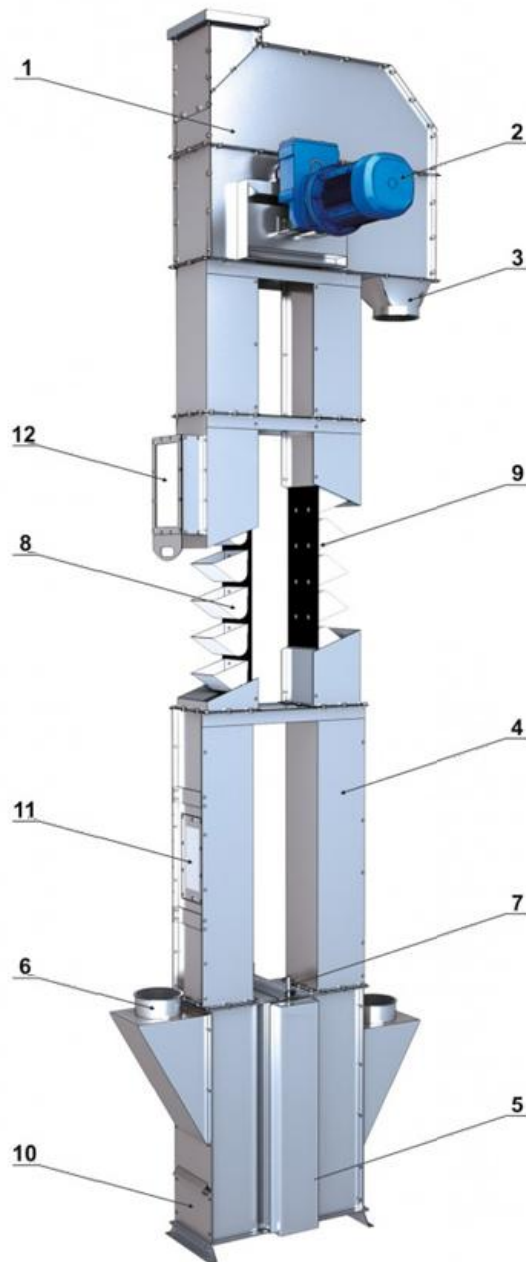
Мета роботи – Метою роботи є удосконалення системи керування електропривода конвеєра завантажування зерна (ківшевої норії) на основі застосування регульованих асинхронних двигунів (АД).

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні завдання:

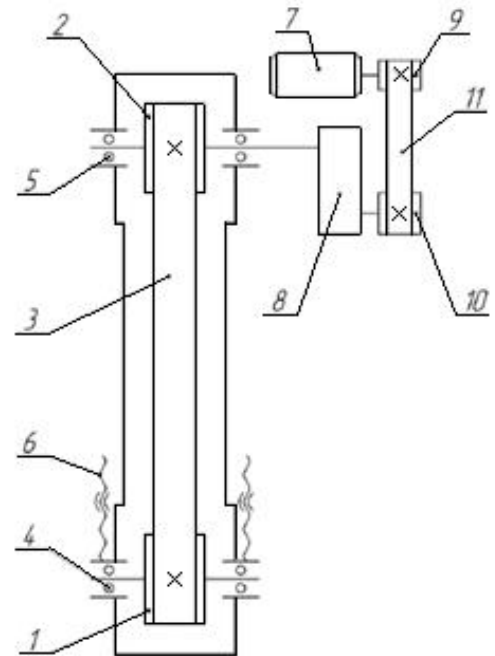
- складені адекватні математичні моделі і досліджувати фізичні процеси, що відбуваються в об'єкті, на базі сучасних комп'ютерних програм і методів розрахунку;
- проведені теоретичне і комп'ютерне дослідження значень основних показників якості роботи норії;
- проаналізовані результати моделювання й обґрунтовано правильність вибору системи керування для норії.

Об'єкт дослідження - процеси, що відбуваються у електроприводі норії.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИД ТА КІНЕМАТИЧНА СХЕМА СТІЧКОВОЇ КІВШЕВОЇ НОРІЇ НЗ-50



1 - верхня голівка ківшевого елеватора ; 2 - мотор-редуктор; 3 - патрубок вивантаження; 4 - шахта норії; 5 - нижній башмак ківшевого елеватора; 6 - патрубок завантаження; 7 - натяжна шпилька; 8 - ківші норії; 9 - стрічка норії; 10 - люк для очищення; 11 - люк обслуговування; 12 - вибухорозрядний пристрій



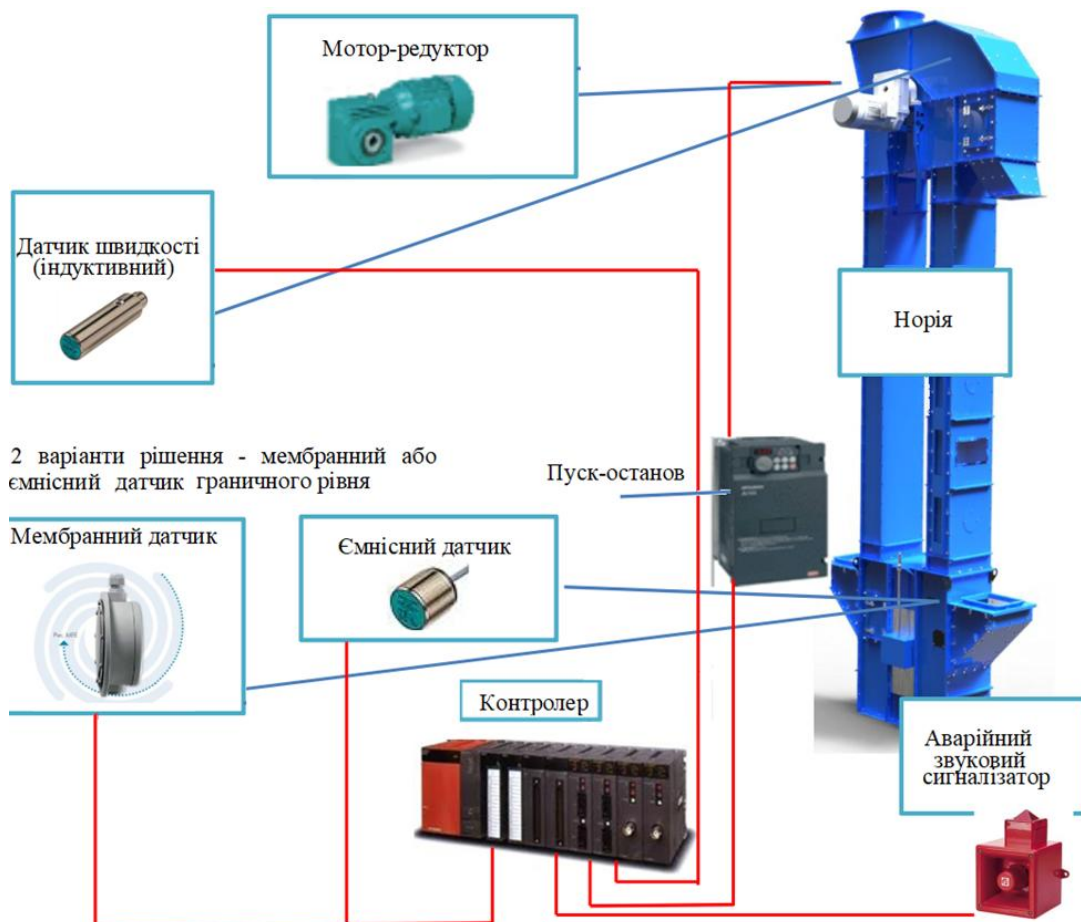
1 – барабан натяжний;
2 – барабан приводний;
3 – стрічка;
4, 5 – підшипниковий вузол;
6 – механізм натягу стрічки;
7 – електродвигун;
8 – редуктор;
9, 10 – шків;
11 – ремінь клиновий

Кінематична схема норії

ЕЛЕКТРИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ НОРІЇ



Рекомендована електрична принципова схема системи керування норії



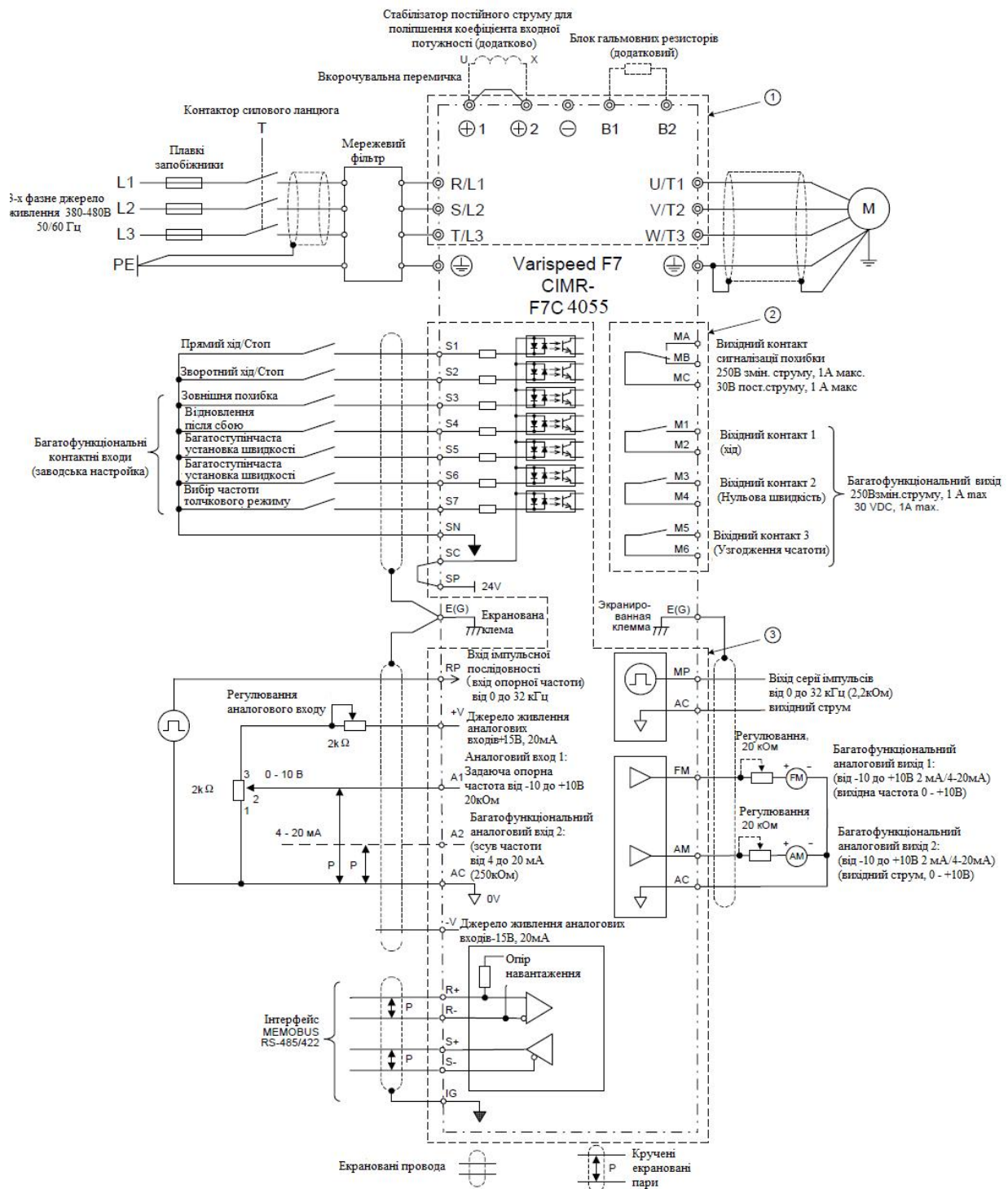
Складові пуско-регулювальної апаратури

Слайд 4 мультимедійної презентації

СТРУКТУРНО-ЛОГІЧНА СХЕМА МАГІСТЕРСЬКОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

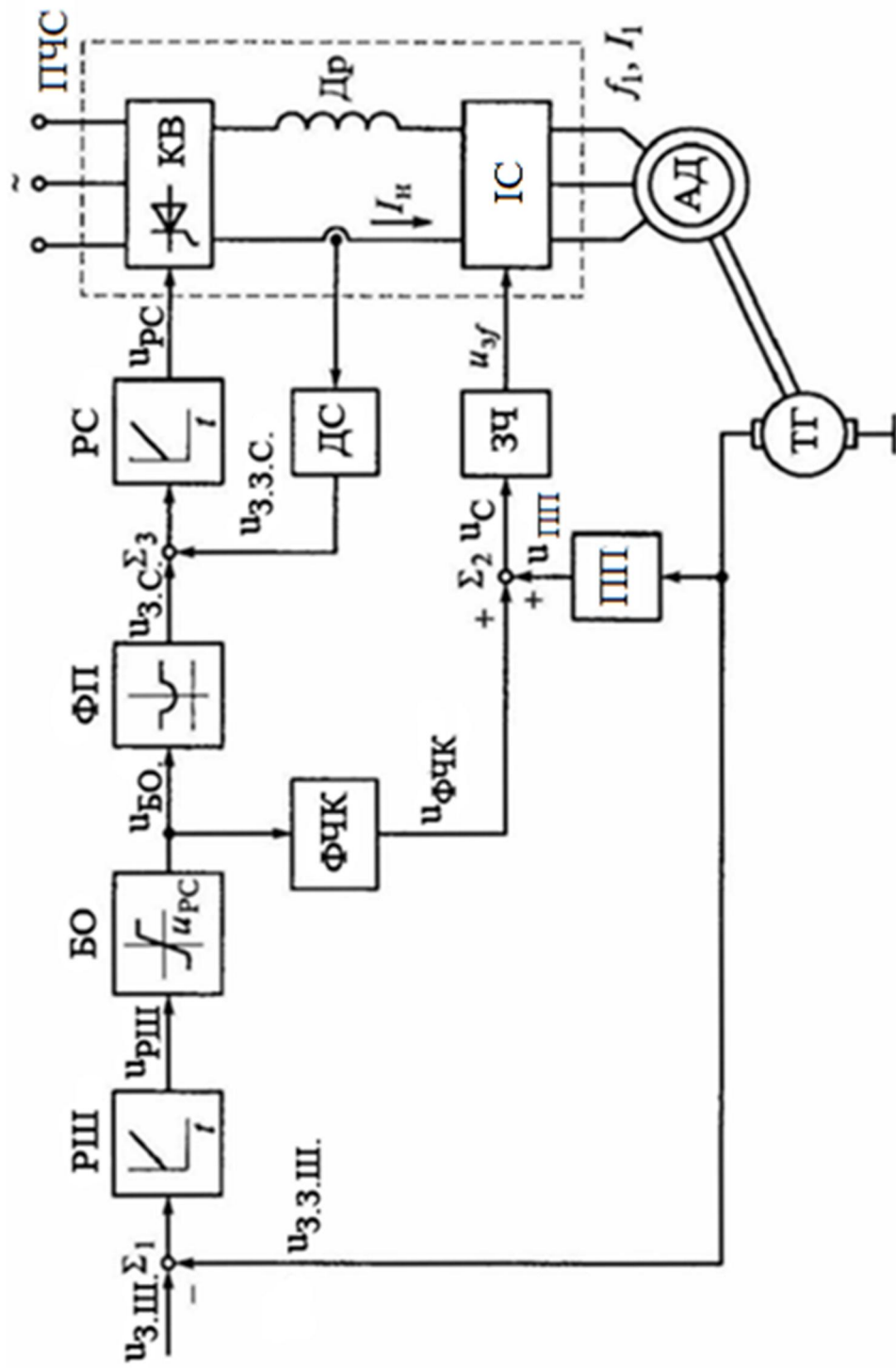
Дослідження енергозберігаючого електропривода ківшевої норії	
Складання індивідуального календарного плану роботи	
Пошук літератури за темою, її аналіз, складання бібліографії	
Підготовка теоретичної частини	Сучасний стан досліджень транспортно-технологічних механізмів, аналіз систем керування приводами конвеєрів
	Класифікація транспортуючих машин
Опис об'єкту дослідження	Розгляд будови, конструкції і основні вузли ківшевої норії
	Аналіз існуючих типів електродвигунів, обґрунтований вибір двигуна
	Аналіз та вибір системи керування обраним двигуном
Опис процесу дослідження	Розгляд способів регулювання кутової швидкості електродвигуна, вибір електропривода
	Моделювання перехідних процесів та аналіз результатів
Узагальнення результатів моделювання	Інтерпретація отриманих результатів дослідження
	Формулювання висновків
Узагальнення науково-теоретичних результатів	
Розробка заходів з охорони праці	
Реалізація отриманих результатів у навчальний процес	

ЗАГАЛЬНА СХЕМА ПІДКЛЮЧЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ ТИПУ OMRON VARISPEED F7

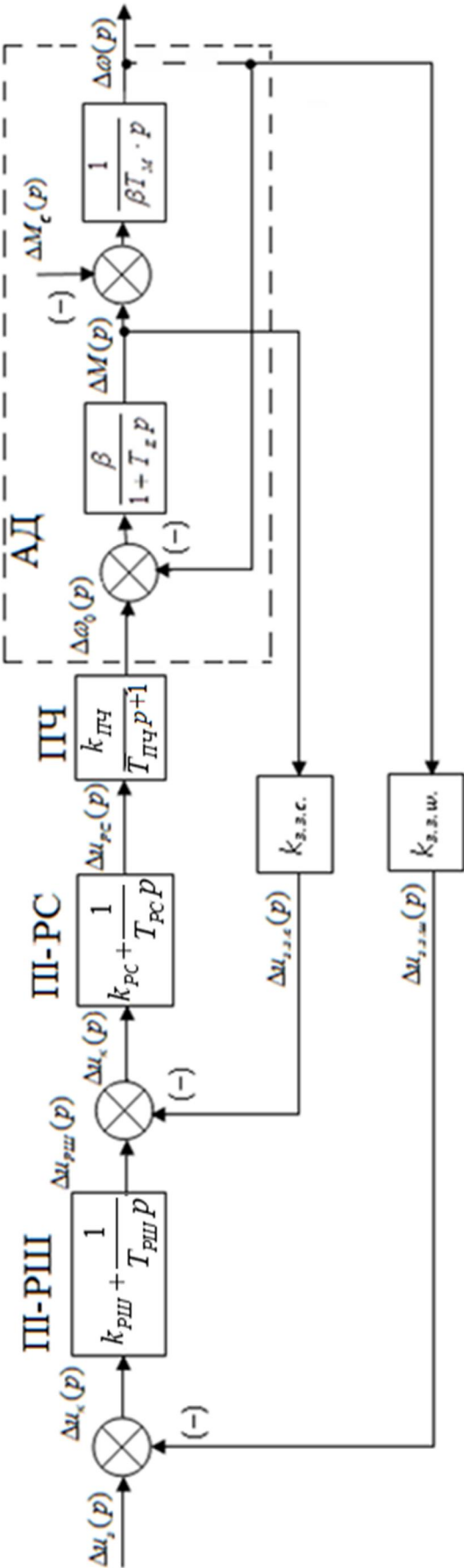


Слайд 6 мультимедійної презентації

ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА ЗАМКНУТОЇ СИСТЕМИ ПЧ-АД З ЧАСТОТНО-СТРУМОВИМ КЕРУВАННЯМ



СТРУКТУРНА СХЕМА ЕЛЕКТРОПРИВОДА



ДИНАМІЧНІ РОЗРАХУНКОВІ МОДЕЛІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Схема моделі з ПІ-регулятором швидкості

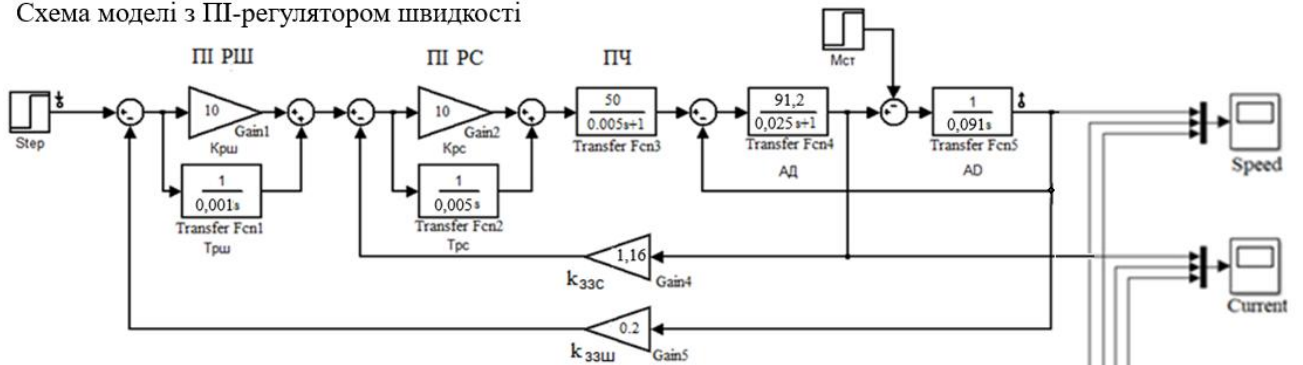


Схема моделі з ПІ-регулятором швидкості

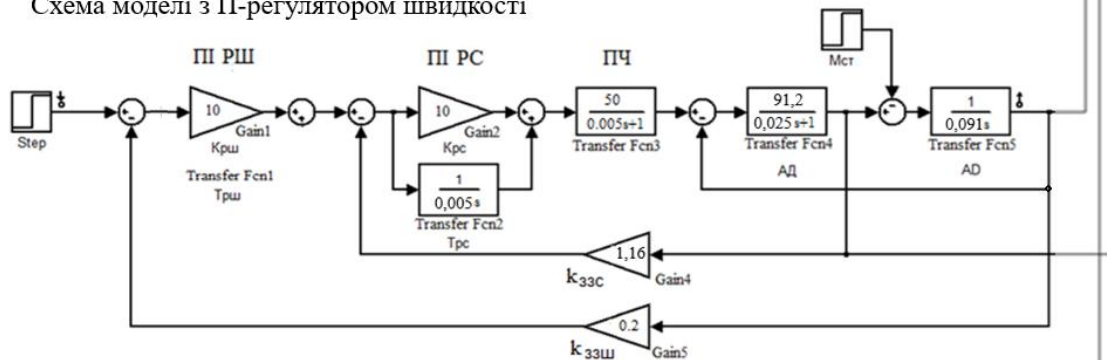
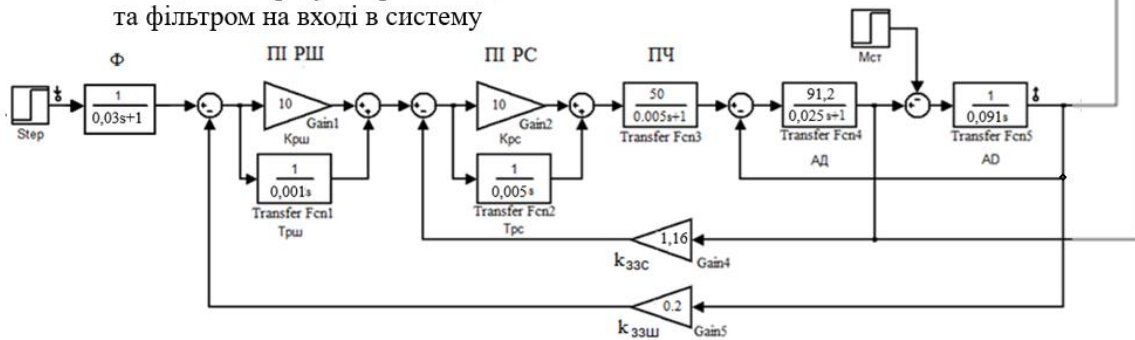
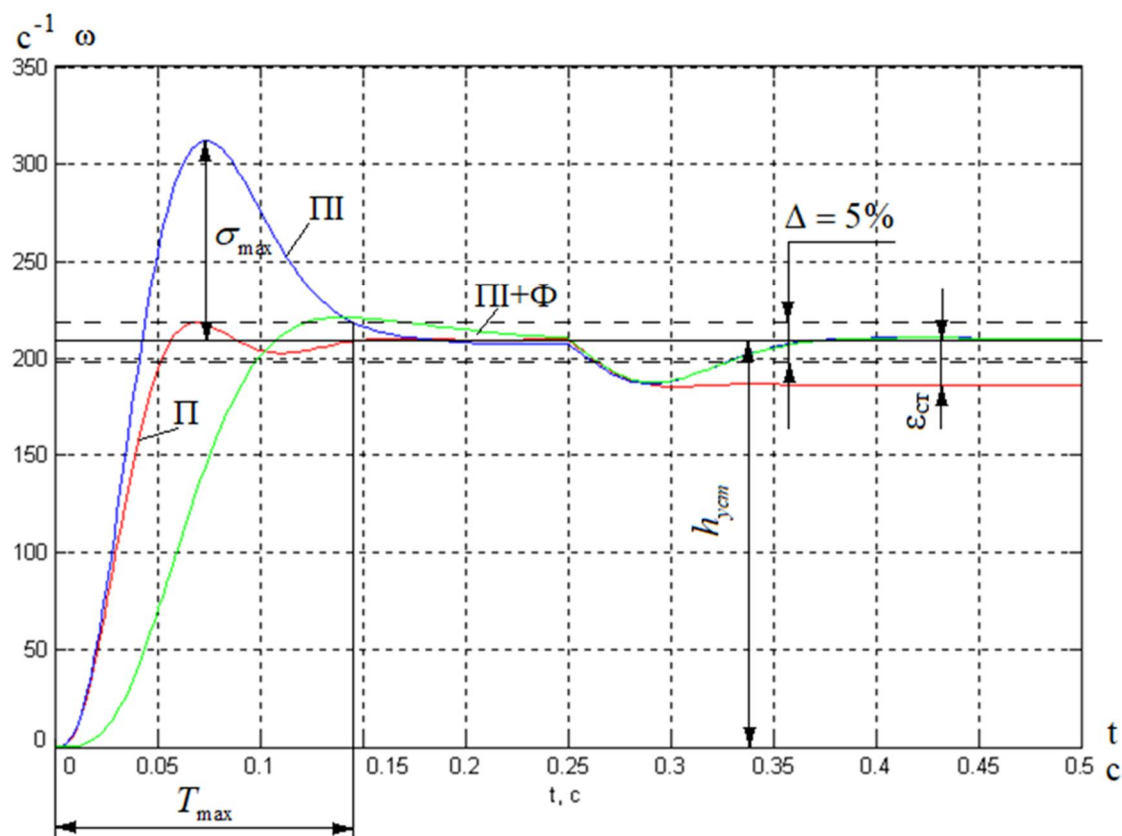


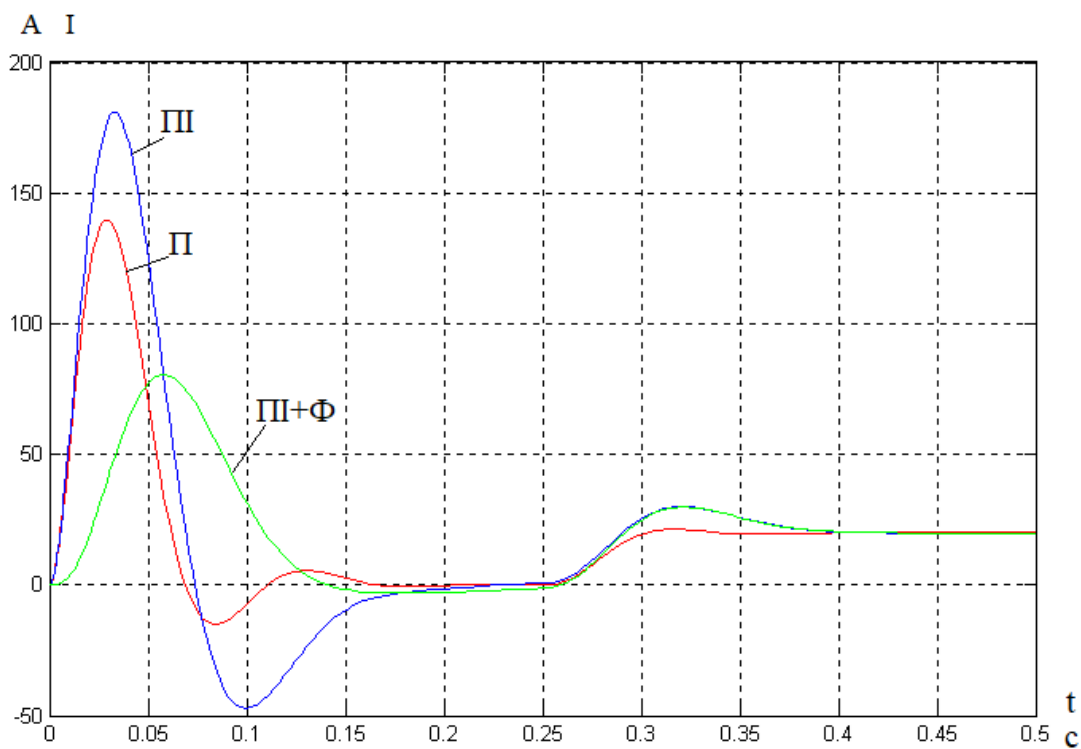
Схема моделі з ПІ-регулятором швидкості та фільтром на вході в систему



АНАЛІЗ ДИНАМІКИ САК



Перехідні процеси по швидкості



Перехідні процеси по струму

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота магістра присвячена модернізації системи керування електропривода конвеєра завантаження зерна (ківшевої норії) на основі застосування регульованого асинхронного двигуна.

Основні результати виконаної роботи можна сформулювати наступним чином:

- розглянуті класифікація транспортуючих машин та сфери використання норій, наведені дані про конструкцію, роботу та електричне обладнання ківшевих норій;
- проведена заміна існуючого електродвигуна на більш сучасний електродвигун типу АІР132М6У3 зі ступенем захисту ІР44;
- проведений вибір комплектного електропривода типу OMRON Varispeed F7 для керування обраним двигуном;
- на основі функціональної схеми складена структурна схема частотно-струмової системи керування та розраховані її параметри; проведено дослідження значень основних показників якості перехідних процесів САК **при зміні законів керування.**

Отримані наступні результати дослідження:

- при застосуванні пропорційно-інтегрального закону регулювання (ПІ-регулятор) перерегулювання склало $\sigma = 53 \%$, час перехідного процесу (по входу кривої в п'ятивідсоткову зону щодо значення, що встановилося,) $T_{\max} = 0,14$ с;
- при застосуванні пропорційного закону регулювання (П-регулятор) перерегулювання склало $\sigma = 5,7 \%$, час перехідного процесу зменшився до $T_{\max} = 0,06$ с, але при цьому виникла статична похибка $\varepsilon = 8 \%$;
- при введенні аперіодичної ланки (у якості фільтра) на вхід системи керування з ПІ-регулятором, перерегулювання склало $\sigma = 6 \%$, час перехідного процесу $T_{\max} = 0,11$ с, коливальність $N = 1$, статична похибка відсутня $\varepsilon = 0$.

Враховуючи отримані результати дослідження, остаточно для системи керування була обрана схема з ПІ-регулятором та фільтром на вході в систему, яка забезпечує задані вимоги, таким чином завдання дослідження виконане.

В результаті проведеного аналізу потенційно небезпечних та шкідливих факторів були визначені заходи щодо безпечної експлуатації електрообладнання при роботі на ківшевих норіях.

Результати роботи можуть бути використані при проектуванні систем керування електроприводів в навчальному процесі кафедри автоматики НУК.