

Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

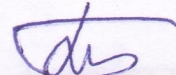
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

  
(підпис)

І. С. Білюк

« 16 » 06

2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код та назва спеціальності)

освітня програма Електромеханіка та електроенергетика

(назва освітньої програми)

на тему: Система керування електропривода ківшевого конвеєра

Виконав: студент IV курсу, групи 4371

Галенчик Кірілл Євгенійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник доц. каф. автоматики, к.т.н., доц. Васильєв О.Г.

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

Нормоконтроль доц. каф. автоматики, к.т.н., доц. Васильєв О.Г.

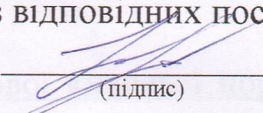
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

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

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

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

Студент

  
(підпис)

м. Миколаїв – 2025 р.

# Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

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

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри, к.т.н. доцент

І.С. Білюк

2025\_ року

«7» 02

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ

гр.4371 Галенчик Кірілл Євгенійович  
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Система керування електропривода ківшевого конвеєра»

керівник роботи Васильєв Олександр Григорович, кандидат технічних наук, доцент,

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «23» квітня 2025 р.  
 № УЧ-343.

2. Строк подання студентом роботи 10 червня 2025 р.

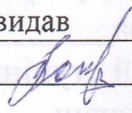
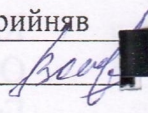
3. Вихідні дані до роботи: Норія ківшева, продуктивність: до 20 т/год; показники якості перехідного процесу: перерегулювання  $\sigma < 20 \%$ , час перехідного процесу  $T_{\max} < 2$  с; статична похибка  $\varepsilon = 0$ .

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Основні відомості та технічні характеристики норій. 2 Вибір типу електродвигуна та комплектного електропривода. 3 Загальна характеристика комплектного електропривода. 4 Дослідження та аналіз динаміки системи керування електропривода норії. 5 Охорона праці при експлуатації електропривода норії

5. Перелік графічного матеріалу

1. Загальний вид і основні складові частини стрічкової ківшевої норії Н20-20. 2. Функціональна схема двоконтурної системи частотного керування. 3. Схеми системи керування аналіз динаміки САК

## 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ        | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата                                                                        |                                                                                     |
|---------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|               |                                           | завдання видав                                                                      | завдання прийняв                                                                    |
| Охорона праці | Васильєв О.Г., к.т.н., доцент             |  |  |
|               |                                           |                                                                                     |                                                                                     |
|               |                                           |                                                                                     |                                                                                     |
|               |                                           |                                                                                     |                                                                                     |
|               |                                           |                                                                                     |                                                                                     |

## 7. Дата видачі завдання «4» березня 2025

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи                                   | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | Основні відомості та технічні характеристики норій                    | 06.04.25                      |          |
| 2     | Вибір типу електродвигуна та комплектного електропривода              | 04.05.25                      |          |
| 3     | Загальна характеристика комплектного електропривода                   | 18.05.25                      |          |
| 4     | Дослідження та аналіз динаміки системи керування електропривода норії | 27.05.25                      |          |
| 5     | Охорона праці при експлуатації електропривода норії                   | 05.06.25                      |          |
|       |                                                                       |                               |          |
|       |                                                                       |                               |          |

Студент

(підпис)

Галенчик К.Є.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Васильєв О.Г.

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з 49 сторінок: 42 сторінки пояснювальної записки, 5 розділів, 6 таблиць, 15 рисунків, 6 літературних джерел, 1 додатку на 7 сторінках.

У першому розділі представлено класифікацію ковшових норій, описано їх конструктивну схему та основні вузли. Як об'єкт дослідження розглядається норія типу Н20, подано її технічні характеристики та відомості про електротехнічне оснащення.

У другому розділі був проведений аналіз існуючих типів електродвигунів. Визначено основні вимоги до електроприводів ковшових норій, обґрунтовано вибір сучасного вибухозахищеного асинхронного електродвигуна та розглянуто методи регулювання його швидкості.

У третьому розділі наведено технічні характеристики трифазного частотного перетворювача типу ATV12HU40M3 , який обрано для керування роботою обраного електродвигуна.

Четвертий розділ містить розрахунки елементів системи управління, побудову динамічної моделі цієї системи та аналіз її динамічних властивостей. За результатами досліджень перехідних процесів визначено оптимальні параметри налаштування регулятора швидкості. Отримані результати свідчать про відповідність системи сучасним вимогам, що висуваються до електроприводів транспортуючих механізмів.

У п'ятому розділі розглянуто комплекс питань, пов'язаних із забезпеченням безпеки праці під час експлуатації електроприводу ковшової норії.

Додатки містять 7 слайдів мультимедійної презентації.

## ЗМІСТ

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                     | 5  |
| 1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ТА ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НОРІЙ.....                                      | 6  |
| 1.1 Загальні відомості, класифікація транспортуючих машин .....                                | 6  |
| 1.2 Устрій, технічні характеристики й робота норії Н20-20.....                                 | 7  |
| 1.3 Електричне обладнання норії .....                                                          | 11 |
| 2 ВИБІР ТИПУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА КОМПЛЕКТНОГО<br>ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....                             | 14 |
| 2.1 Вибір типу електродвигуна.....                                                             | 14 |
| 2.2 Класифікація методів регулювання кутової швидкості привода.....                            | 15 |
| 2.3 Частотне регулювання асинхронних електроприводів .....                                     | 17 |
| 3 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА КОМПЛЕКТНОГО<br>ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....                                  | 20 |
| РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ДИНАМІКИ СИСТЕМИ<br>КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НОРІЇ .....        | 24 |
| 4.1 Визначення параметрів регуляторів системи керування<br>електропривода.....                 | 24 |
| 4.1.1 Структурна схема електропривода з частотним керуванням.....                              | 24 |
| 4.1.2 Формування та розрахунок параметрів елементів структурної<br>схеми.....                  | 27 |
| 4.2 Аналіз динамічних властивостей системи керування електропривода<br>ківшевого конвеєра..... | 31 |
| 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НОРІЇ...                                       | 35 |
| 5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів при роботі ковшової<br>норії.....       | 35 |
| 5.2 Правила техніки безпеки під час роботи на ківшових норіях.....                             | 35 |
| 5.3 Заходи безпечної експлуатації електрообладнання.....                                       | 37 |
| ВИСНОВКИ .....                                                                                 | 50 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....                                                                 | 51 |
| Додаток А. Мультимедійна презентація.....                                                      | 52 |

## ВСТУП

Різноманітність вантажів, що підлягають транспортуванню, і різні умови виконання навантажувальних і розвантажувальних операцій обумовили появу широкої номенклатури підйомно-транспортних машин, як загального призначення, так і спеціалізованих для ефективного використання їх у річкових портах, ремонтно-експлуатаційних базах та ін. об'єктах промисловості.

За принципом дії підйомно-транспортні машини поділяють на дві самостійні конструктивні групи: машини періодичної й безперервної дії. До першої відносяться вантажопідйомні крани всіх типів, ліфти, засоби напольного транспорту (візки, навантажувачі, тягачі), підвісні рейкові й канатні дороги (періодичної дії), скрепери й інші подібні машини. До другого (їх також називають машинами безперервного транспорту й транспортуючими машинами) відносяться конвеєри різних типів, пристрої пневматичного й гідравлічного транспорту й подібні їм транспортуючі машини.

Завдяки безперервності переміщення вантажу, відсутності зупинок для завантаження й розвантаження й суміщенню робочого й зворотного рухів вантажонесучого елемента машини безперервної дії мають високу продуктивність, що дуже важливо для сучасних підприємств із великими вантажопотоками.

Основне призначення машин безперервної дії - переміщення вантажів по заданій трасі. Одночасно із транспортуванням вантажів вони можуть розподіляти їх по заданих пунктах, складувати, накопичуючи в обумовлених місцях, переміщати по технологічних операціях і забезпечувати необхідний ритм виробничого процесу.

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.

Для механізації завантаження, розвантаження, переміщення й підробітку зерна в зерноскладах застосовують наступні стаціонарні й пересувні механізми.

Зерноавантажувачі, застосовувані для подачі зерна в сортувальну машину. Розділяють пересувні й самопересувні зерноавантажувачі, що розрізняються типом пересування й принципом роботи: пересувні перевозяться за допомогою візка й приводяться в дію електродвигуном.

Стаціонарні стрічкові транспортери, застосовувані в різноманітних схемах залежно від місця установки й призначення.

Зернометальники, відмінною рисою яких, є принцип роботи: транспортування зерна здійснюється не шляхом переносу, а перекидається з місце на місце.

Таким чином, вибір устаткування залежить від майбутнього способу експлуатації. Однак вертикальні транспортери - норії є більш універсальним устаткуванням, яке можна використовувати в декількох виробничих процесах транспортування, зберігання й очищення зерна.

Одним із основних елементів в раціоні харчування людини, та зокрема корму для свійських тварин є зернова продукція. На сьогоднішня найбільш надійним місцем зберігання та транспортування зерна є зернові елеватори. Для підвищення продуктивності та раціональних витрат енергії на роботу зернових елеваторів потребується постійне удосконалення технологічних ліній за допомогою засобів автоматизації та механізації.

Одною з головних складових елементів зернового елеватора є норія. Це транспортуюча машина, метою якої є вертикальне транспортування зерна вгору до приймального пристрою зернового елеватора.

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.

Метою даної роботи є аналіз системи керування автоматизованого електропривода норії.

# 1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ТА ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НОРІЙ

## 1.1 Загальні відомості, класифікація транспортуючих машин

Норія, яку ще називають «ковшовим елеватором» відноситься до класу елеваторів у загальній класифікації транспортуючих машин (конвеєрів). Основною метою даної машини є транспортування сипких, шматкових та поштучних матеріалів у вертикальній площині.

У загальному вигляді схеми норії із робочими елементами представлена на рисунку 1.1. Як правило, тяговим елементом машини є стрічка (рис. 1.1, а), пластинчато-втулковий та втулково-роликові ланцюги (рис.1.1, б, в). Тяговий елемент огинає натяжний 4 та привідний 3 барабани чи зірочки, які закріплені у крайніх точках елеватора. В конструкції похилих та високих вертикальних елеваторів використовуються напрямні ролики, а ланцюг приводиться у рух роликами по напрямним (рис. 1.1, г) чи опирається, так само як і стрічка, на напрямні ролики (рис. 1.1, д). Норія ззовні має захист у вигляді металічного кожуху 5 з вікнами для огляду.

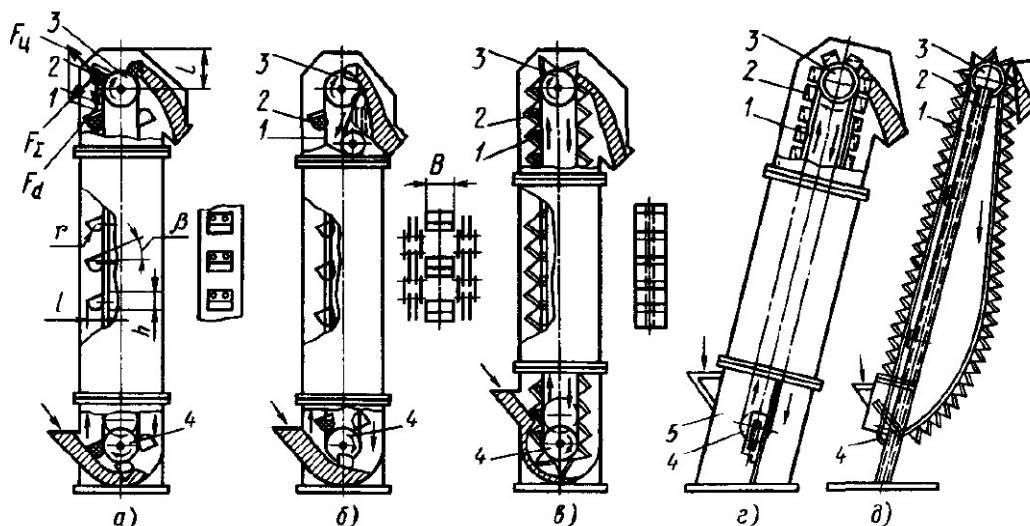


Рисунок 1.1 – Схеми елеваторів.

Ковші 2 при русі тягового елемента зачерпують вантаж (матеріал) для подальшого його транспортування угору, де під дією сили тяжіння та інерції матеріал з ковша потрапляє у розвантажувальний отвір.

Нижню частину норії називають «башмаком». До його складу входять: кожух, завантажувальний бункер та натяжний пристрій (зірочка, вал з підшипниками та гвинтового чи вантажного натяжного устаткування). Зірочка чи барабан здійснюють переміщення у напрямляючих пазах за допомогою натяжного пристрою. Крок переміщення натяжного пристрою складає 1,6 кроку ланцюга, а для стрічкових тягових елементів 1-3% висоти елеватора.

Верхня частина елеватора має назву «головки». Її складовими частинами є кожух, приводні зірочки чи барабан, редуктор з двигуном та гальма для запобігання зворотного ходу елеватора. В башмаку ковші завантажуються зачерпуванням вантажу із нижньої частини кожуху норії чи безпосередньо засипанням вантажу у ковші.

## **1.2 Устрій, технічні характеристики й робота норії Н20-20**

Стрічкова ківшова норія Н20-20 виробництва ПП Фірма «Гіпром», призначена для переміщення на елеваторах, млинах та інших зернопереробних підприємствах такої сировини як зерно, крупа, борошно та інші сипучі матеріали з питомою вагою 250 – 850 кг/м<sup>3</sup>. Характеристики даної транспортуючої машини представлені у таблиці 1.1 [5].

До комплектації норії Н20-20 входять: башмак; корпус башмака; засипна горловина; натяжний пристрій; натяжний барабан; приводна головка; корпус приводної головки; приводний барабан; мотор-редуктор; короби квадратного перетину; стрічка з ківшами.

Таблиця 1.1 – Характеристики норії Н20-20

| Висота                                    |       |
|-------------------------------------------|-------|
| Від «0» до центра барабану(Н), мм         | 20026 |
| Від «0» до вивантаження (Н1), мм          | 19216 |
| Від завантаження до вивантаження (Н2), мм | 18286 |
| Габаритна (Н3), мм                        | 20480 |
| Довжина стрічки, м                        | 41,73 |
| Кількість юрців, шт.                      | 159   |
| Потужність, кВт                           | 3     |
| Кількість коробів                         |       |
| Ревізійний, шт.                           | 1     |
| Підіймальний (2м), шт.                    | 7     |
| Підіймальний (1м), шт.                    | 1     |
| Монтажний, шт.                            | 1     |

Загальний вид норії Н-20-20 наведений на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 - Загальний вид норії Н20-20

Башмак (Рис. 1.3) складається з корпусу, натяжного пристрою, натяжного барабана і, засипної горловини. Корпус башмака – це конструкція, зібрана болтами, що має одну або дві засипні горловини для подачі вихідного продукту для транспортування. Засипна горловина розташована на передній частині Норії (де ковші переміщаються в кожусі вгору). При такому розташуванні споживання енергії найменше. У корпусі також є два шиберу для очищення донної частини корпусу і розміщується натяжний барабан, який закріплений на двох опорних підшипниках.

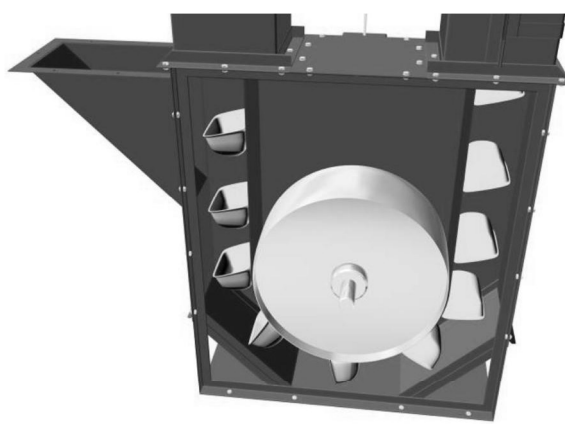


Рис. 1.3 – Башмак норії.

За допомогою натяжного пристрою здійснюється виставлення натяжного барабану разом із спорядженою стрічкою в робоче положення. Натяжний барабан в торці валу має різьбу для закріплення робочого елемента ємнісного датчика швидкості. На натяжному пристрої конструктивно передбачено кріплення безпосередньо самого ємнісного датчика, призначенням якого є припинення подачі струму до двигуна, якщо стрічка починає прослизати або зупиняється.

Приводна головка (Рис. 1.4) складається з корпусу, кожуха, приводного барабана та мотор-редуктора.

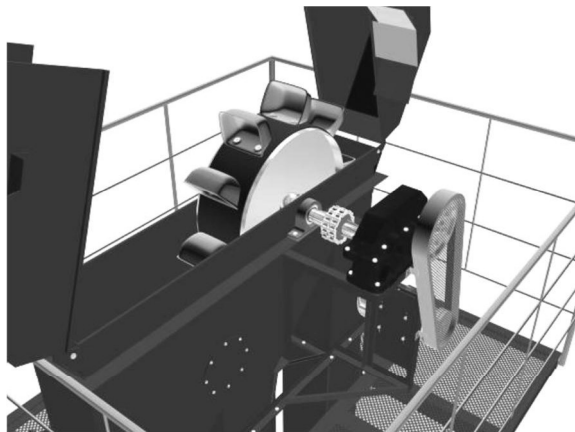


Рис. 1.4 – Приводна головка норії.

Корпус приводної головки – це суцільнозварна конструкція, у внутрішній частині якої розміщуються приводний барабан на опорних підшипниках, регульована знизу висипна горловина, а ззовні розміщується конструкція кріплення приводу.

Висипна горловина (Рис. 1.5) розташована на задній частині приводної головки. Кожух складається з двох незалежних половинок, які легко відкриваються на завісах при проведенні регламентних робіт. Мотор-редуктор одягається безпосередньо на вал приводного барабана.

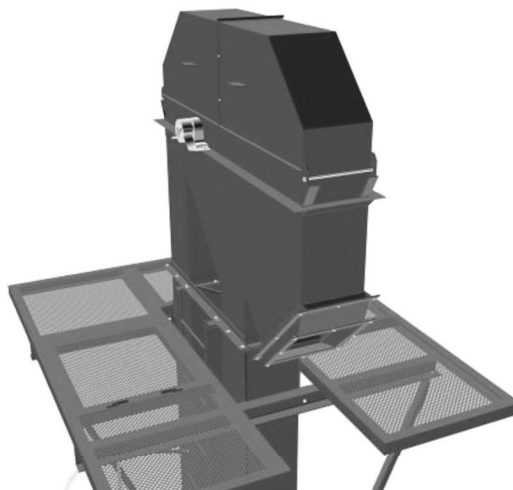


Рис. 1.5 – Висипна горловина з кожухом.

Пристрій запобігання зворотньому ходу стрічки розміщено на валу приводного барабана. Конструктивно на корпусі передбачено розміщення індуктивного (або сенсорного) датчика, який припиняє подачу струму до двигуна при переповненні продукту в висипній горловині.

На Рис. 1.6 зображена стрічка з ківшами, яка представляє собою замкнутий елемент, укладений в труби і натягнутий навколо барабанів.

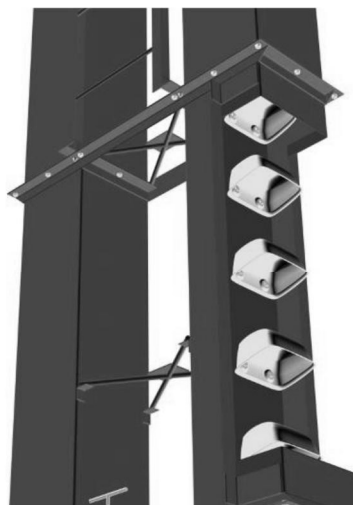


Рисунок 1.6 – Стрічка з ківшами.

Цикл роботи норії можна поділити на наступні етапи:

1. Сировина надходить в башмак норії через засипну головину;
2. З башмака сировина забирається ковшами, закріпленими на безперервній норійній стрічці;
3. Стрічка з завантаженими ковшами рухається від башмака до приводної головки по квадратної форми норійним коробам;
4. В головці норії сировина вивантажується в патрубок для вивантаження під дією відцентрової сили;
5. Стрічка з порожніми ковшами повертається до башмака для завантаження.

### **1.3 Електричне обладнання норії**

Електрообладнання норії складається з електродвигунів, пускорегулювальної та захисної апаратури, кінцевих вимикачів, освітлювальної та сигнальної апаратури. кабелів і проводів [5].

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.

Норії постачені автоматично діючим гальмовим пристроєм для запобігання зворотного ходу стрічки й датчиками підпору й контролю швидкості.

Контрольними приладами норії є: датчик підпору, датчик швидкості, датчик контролю температури підшипника й датчик сходу стрічки.

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».

На рисунку 1.4 показана рекомендована схема електрична принципова керування норії.



Рисунок 1.4 - 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         |

## 2 ВИБІР ТИПУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА КОМПЛЕКТНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

### 2.1 Вибір типу електродвигуна

Для роботи норії обирають асинхронні електродвигуни перемінного струму з короткозамкнутим ротором. Цей тип електродвигуна має такі переваги, як

- практично постійну швидкість при різних навантаженнях;
- стійкість до нетривалих механічних навантажень;
- простота конструкції, отже й його висока ремонтпридатність;
- простота запуску та легкість до автоматизації.

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

Враховуючи характеристику даного транспортного засобу по пожежній та вибухонебезпечності, для подальшого дослідження системи керування електропривода норії вибираємо більш сучасний електродвигун типу АИР112МВ6У3 зі ступенем захисту IP54/55, основні технічні характеристики якого наведені в таблиці 2.1 [1].

**Асинхронний двигун АИР100L4** має наступні технічні характеристики, вказані в Таблиці 2.1

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики двигуна

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| Номінальний струм при 380 В, А | 8,8  |
| Кількість пар полюсів          | 4p=p |
| Частота f, Гц                  | 50   |
| Потужність, кВт                | 4    |
| Частота обертання, об/хв       | 1500 |
| ККД, %                         | 83,1 |

Продовження Таблиці 2.1

|                                                                 |       |
|-----------------------------------------------------------------|-------|
| $\cos \varphi$                                                  | 0,84  |
| $\frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{н}}}$                          | 2.1   |
| $\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{н}}}$                           | 2.4   |
| $\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{н}}}$                          | 7     |
| Максимально допустимий рівень звукової потужності $L_w$ , Дб(А) | 80    |
| Маса                                                            | 29,2  |
| Динамічний момент інерції ротора, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$  | 0.013 |

## 2.2 Класифікація методів регулювання кутової швидкості привода

В залежності від типу існуючих асинхронних двигунів перемінного струму існують численні способи для регулювання їхньої кутової швидкості. Найбільше поширення отримали наступні способи [2]:

- параметричне регулювання;
- частотне регулювання;
- векторне керування.

**Основні показники якості способів регулювання.** Параметрами, які виступають на першому плані при оцінці якості регулювання кутової швидкості електроприводів є:

- діапазон регулювання — це відношення максимальної швидкості до мінімальної;
- плавність регулювання, що дорівнює відношенню більшої швидкості до меншої швидкості двох сусідніх ступенів:  $n_k/n_{k+1}$ . Вона змінюється від величини, близької до одиниці при практично плавному регулюванні, до двох — при східчастому;

– жорсткість механічної характеристики, що виражається у вигляді відношення збільшення моменту до збільшення швидкості обертання:  $\Delta M / \Delta n$ . Чим більше ця величина, тим менше змінюється швидкість в процесі зміни навантаження двигуна;

– допустима корисна потужність (або момент) на валу в регульованій зоні, обумовлені максимально припустимою температурою нагрівання ізоляції обмоток двигуна;

– коефіцієнт підсилення потужності регульованої системи, що дорівнює відношенню вихідної потужності до регулюючої. Зі зменшенням регулюючої потужності спрощуються засоби автоматизації та їх вартість;

– коефіцієнт корисної дії (ККД) системи в зоні регулювання

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P}, \quad (2.1)$$

де  $P_2$  — потужність на валу двигуна;

$\Delta P$  — сумарні втрати потужності;

– економічність системи регулювання, що містить витрати на устаткування, експлуатаційні втрати й інші фактори.

### **Класифікація способів регулювання асинхронних двигунів.**

Найпоширенішими із можливих способів регулювання є:

- реостатне регулювання швидкості;
- регулювання швидкості зміною числа пар полюсів  $p_n$ ;
- регулювання швидкості зміною напруги живлення  $U_1$ ;
- регулювання швидкості зміною частоти живильної напруги  $f_1$  (що є найбільш перспективним та бажаним у використанні для короткозамкнених асинхронних двигунів).

## 2.3 Частотне регулювання асинхронних електроприводів

Для попередньо обраного асинхронного двигуна буде використовуватись метод частотного регулювання. Цей метод дозволяє отримати невеликі втрати електроенергії при регулюванні, велику швидкість роботи механізмів, а також підвищити надійність електропривода з точки зору технічної безпеки [10].

Для реалізації цього способу необхідно мати джерело живлення з регульованою частотою  $f_1$ , у якості якого можуть виступати синхронні генератори або перетворювачі частоти.

Якщо знехтувати відносно невеликим спадом напруги первинного кола АД, то

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 \omega_1 k_{об1} \Phi \quad (2.2)$$

Збільшення магнітного потоку більше номінального викликає збільшення насичення магнітного кола і значне збільшення струму намагнічування, а зменшення магнітного потоку  $\Phi$  – недовикористання машини, зменшення перевантажувальної здатності й збільшення струму  $I_2$  при тому самому значенні  $M$ . Тому суттєво змінювати  $\Phi$  при регулюванні  $n$  небажано, тобто повинна виконуватися умова  $\Phi = const$ . При цьому зі співвідношення (2.2) випливає, що одночасно з регулюванням частоти  $f_1$  пропорційно їй необхідно змінювати також напругу  $U_1$ , тобто підтримувати

$$\frac{U_1}{f_1} = const \quad (2.3)$$

При широкому діапазоні регулювання краще підтримувати  $\frac{\Phi E_1}{f_1} = const$ .

Відношення максимальних моментів при двох значеннях частоти буде дорівнювати

$$\frac{M_{\max(1)}}{M_{\max(2)}} = \left( \frac{U_{1(1)} f_{1(1)}}{U_{1(2)} f_{1(2)}} \right)^2 \quad (2.4)$$

де індекси (1) і (2) відносяться до різних частот обертання.

Виходячи з (2.4) можна отримати в загальному вигляді закон змінення напруги  $U_1$  при регулюванні частоти  $f_1$ :

$$\frac{U_{1(2)}}{U_{1(1)}} = \frac{f_{1(2)}}{f_{1(1)}} \sqrt{\frac{M_{\max(2)}}{M_{\max(1)}}}. \quad (2.5)$$

Механічні характеристики АД при регулюванні частоти обертання з  $M_{\max} = \text{const}$  наведені на рисунку 2.1, а).

Якщо регулювання відбувається з постійною потужністю  $P_2$ , то момент повинен змінюватися обернено пропорційно частоті обертання, а тому і  $f_1$ :

$$\frac{M_{\max(2)}}{M_{\max(1)}} = \frac{\omega_{(1)}}{\omega_{(2)}} = \frac{f_{1(1)}}{f_{1(2)}}. \quad (2.6)$$

Після деяких перетворень можна отримати закон змінення напруги при регулюванні частоти обертання з постійною потужністю.

$$\frac{U_{1(2)}}{U_{1(1)}} = \sqrt{\frac{f_{1(2)}}{f_{1(1)}}}. \quad (2.7)$$

Механічні характеристики для цього випадку наведені на рис. 2.1, б).

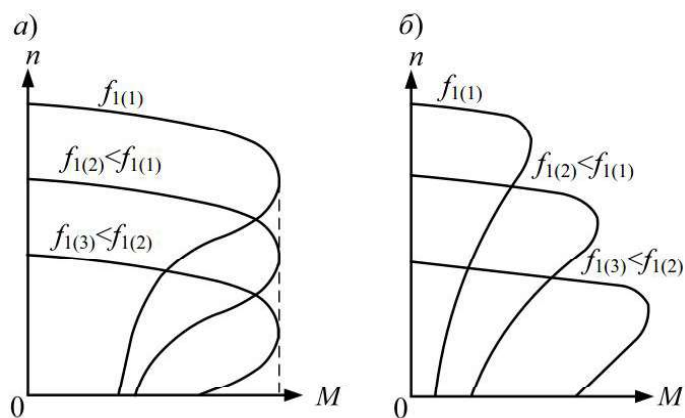


Рисунок 2.1 – Механічні характеристики АД.

Перевагами частотного регулювання є:

- можливість отримувати великий пусковий момент (рівний критичному);
- плавність регулювання;
- точність регулювання.

Недоліки даного способу регулювання:

- порівняно висока вартість;
- складність регулювання.

Не дивлячись на вказані недоліки частотне регулювання в сучасних електроприводах поступово витісняє всі інші типи регулювання.

Для керування обраним двигуном доцільно використати комплектний електродвигун типу **Schneider ATV12HU40M3**.

### РОЗДІЛ 3. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА КОМПЛЕКТНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Загальнопромислові перетворювачі частоти Schneider є сучасними та доступними рішеннями для використання на підприємствах. Зазвичай використовуються для керування простих машин та механізмів. Перетворювач Schneider можуть забезпечити високий пусковий момент та точне регулювання в технологічних лініях та машинах. В перетворювачах використовуються надійні та сучасні системи захисту.

Завдяки своїй **простоті у налаштуванні**, компактним розмірам та підтримці широкого спектра режимів, перетворювач **ATV12HU40M3** ідеально підходить для використання в автоматизованих системах керування електроприводами [9].

Переваги застосування перетворювача частоти Schneider **ATV12HU40M3**:

- Регулювання швидкості обертання двигуна дозволяє зменшити споживання електроенергії , особливо в конвеєрах та насосах. Можливість ручного, автоматичного, аналогового або цифрового(наприклад, через Modbus) керування.
- Відбувається зменшення пускових струмів та зниження зношуваності механіки. Усувається ударне навантаження.
- Присутня можливість точно змінювати частоту обертання під потреби технологічного процесу без зміни редукторів або шківів.
- Використання ПД-регулювання дозволяє точно підтримувати параметри технологічного процесу, що дозволяє оптимізувати швидкість двигуна, а впливаючи з цього зменшує механічний шум і вібрації.

Технічні характеристики перетворювача частоти **ATV12HU40M3** наведені в **таблиці 3.1**.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики перетворювача ATV12HU40M3 [4]

| Характеристика                                    | Параметр                                                                              |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Модель перетворювача                              | Schneider Electric ATV12HU40M3                                                        |
| Максимальна припустима вихідна потужність двигуна | 4,0 кВт                                                                               |
| Номінальна вихідна потужність                     | до 4,0 кВт                                                                            |
| Номінальний вихідний струм                        | 9,5 А                                                                                 |
| Джерело живлення                                  | - максимальна напруга 3 фази, 380 В змінного струму;<br>- номінальна частота 50/60 Гц |
| Область застосування                              | Конвеєри, насоси, вентилятори, компресори, дозатори, мішалки                          |
| Вхідна напруга (3-фазна)                          | 380 В $\pm 15\%$ , 50/60 Гц                                                           |
| Потужність двигуна                                | до 4,0 кВт                                                                            |
| Номінальний струм                                 | до 9,5 А                                                                              |
| Час розгону/гальмування                           | Налаштовується, стандартно 0,1 – 999,9 с                                              |
| Режими роботи                                     | 4 режими (V/f, векторне керування, PID-регулювання, керування по Modbus)              |
| U/f control                                       | Вольт-частотний принцип керування, підходить для простих приводів                     |
| Open Loop Vector Control                          | Векторне керування без зворотного зв'язку                                             |
| PID Control                                       | Автоматичне регулювання швидкості/тиску/потoku за зворотним сигналом                  |
| Modbus Control                                    | Можливість цифрового керування через Modbus RTU                                       |
| Діапазон регулювання швидкості                    | 1:20 (при U/f), до 1:100 (відкрите векторне керування)                                |
| Інтерфейси                                        | Аналогові входи/виходи, цифрові входи, Modbus                                         |

## Продовження таблиці 3.1

|                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Основні функції | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Плавний пуск і зупинка двигуна</li> <li>- PID-регулятор для автоматичного керування</li> <li>- Налаштування параметрів через дисплей або ПК</li> <li>- Можливість дистанційного керування (Modbus RTU)</li> <li>- Захист двигуна від перевантаження, короткого замикання, перенапруги</li> <li>- Вбудовані аналогові та цифрові входи/виходи</li> <li>- Функція збереження енергії за рахунок оптимізації роботи двигуна</li> <li>- Самодіагностика і відображення помилок на дисплеї</li> </ul> |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Стандартна підключення схема частотного перетворювача Schneider Electric ATV12HU40M3 наведена на рисунку 3.1.

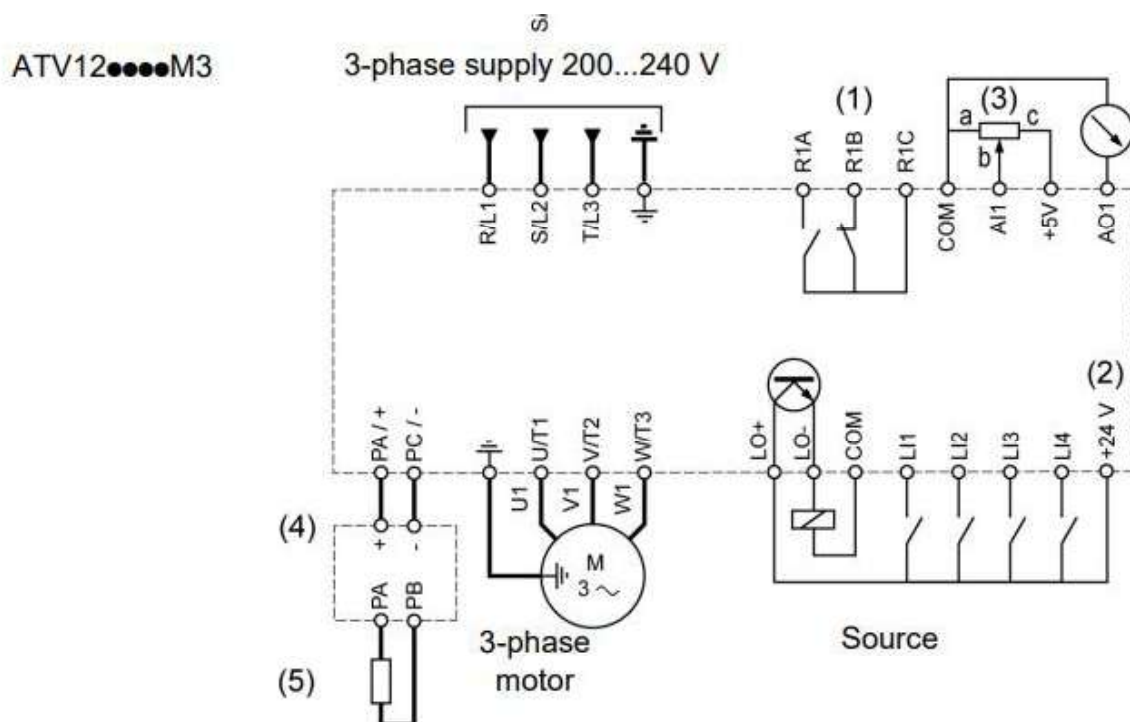


Рисунок 3.1 – Стандартна схема підключення перетворювача Schneider Electric

#### 4 РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Частотний спосіб керування полягає в тому, що змінюючи напругу та частоту можна змінювати частоту обертання валу двигуна. Цей спосіб забезпечує плавне регулювання частоти обертання валу двигуна в широкому діапазоні [2,10].

Функціональна схема частотного регулювання зі зворотнім зв'язком за швидкістю при живленні від ПЧ, як джерела напруги, наведена на рисунку 4.1.

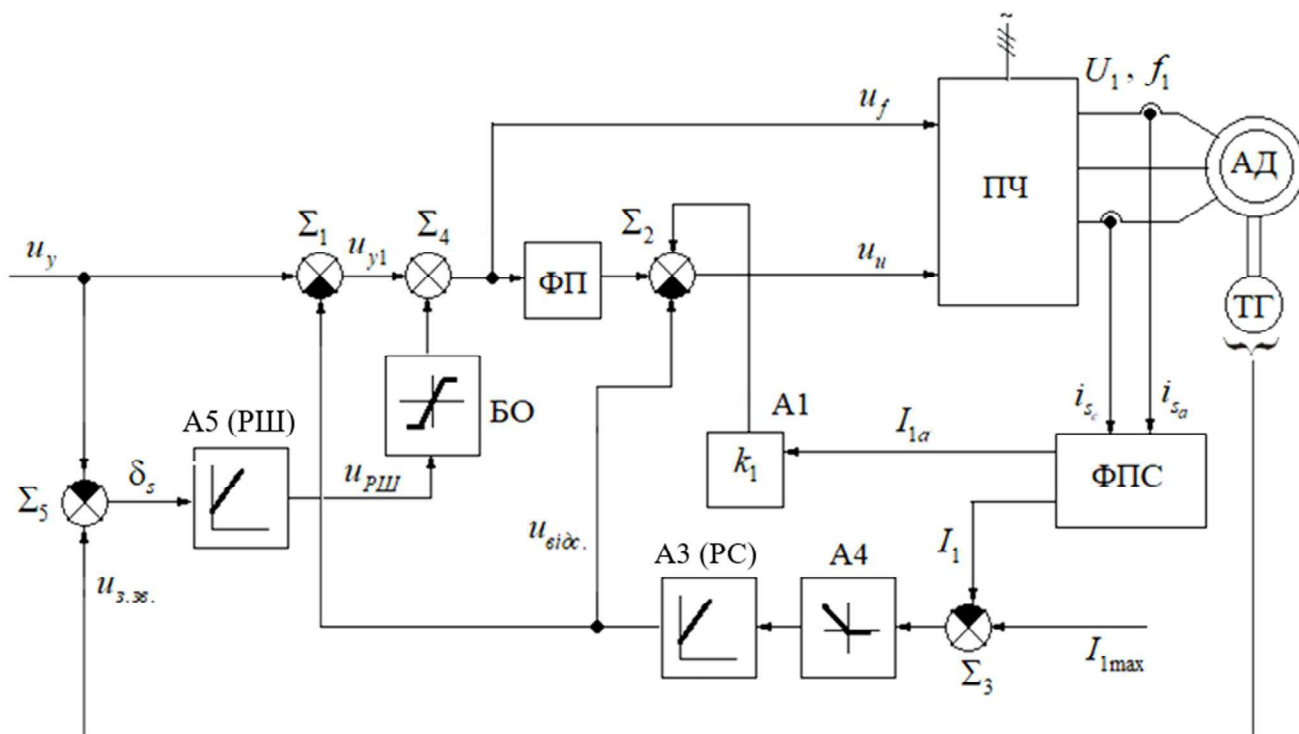


Рисунок 4.1 - Функціональна схема системи частотного регулювання ПЧ -АД зі зворотним зв'язком за швидкістю

На схемі позначено:

ПЧ - перетворювач частоти;

АД - асинхронний двигун;

А5 (РШ) - регулятор швидкості;

А3 (РС) - регулятор струму;

А4 - регулятор (забезпечує проходження сигналу на вхід А3 (РС) лише при його перевищенні на суматорі сигналу );

ТГ - тахогенератор - датчик зворотного зв'язку по швидкості;

А1 ( ) - датчик зворотного зв'язку по струму (трансформатор струму);

БО - блок обмеження вихідної напруги ;

ФПС - функціональний перетворювач струму;

ФП - функціональний перетворювач напруги

Тут канал негативного зворотного зв'язку за швидкістю включає в себе тахогенератор ТГ, як датчик зворотного зв'язку, вузол  $\Sigma_5$  підсумовування напруг керування швидкістю АД  $u_y$  і зворотного негативного зв'язку за швидкістю  $u_{3.3.}$ , регулятор абсолютного ковзання АЗ, блок БО обмеження його вихідної напруги  $u_{PII}$ , а також вузол  $\Sigma_4$  підсумовування напруги  $u_{PII}$  і результуючої напруги  $u_{y1}$  з виходу суматора  $\Sigma_1$ .

#### **4.1 Визначення параметрів регуляторів системи керування електропривода**

##### **4.1.1 Структурна схема електропривода з частотним керуванням**

Під час розробки математичної моделі електропривода були прийняті такі припущення:

- Частотний перетворювач функціонує в замкнутому контурі регулювання швидкості, забезпечуючи плавну зміну частоти живлення двигуна. При цьому вважається, що двигун працює на лінійній ділянці механічної характеристики — тобто в діапазоні від нульового до номінального моменту опору при ковзанні від 0 до номінального значення.
- Інерційністю датчика швидкості знехтувано, оскільки вона є незначною й практично не впливає на динаміку системи. На основі цих припущень сформовано структурну схему електропривода для подальшого моделювання.

Вважається, що система керування з частотним перетворювачем реалізована у вигляді двоконтурної системи підлеглого керування: із внутрішнім контуром регулювання струму та зовнішнім контуром регулювання швидкості.

Побудовано структурну схему привода (рисунок 4.2), яка базується на спрощеній математичній моделі асинхронного двигуна.

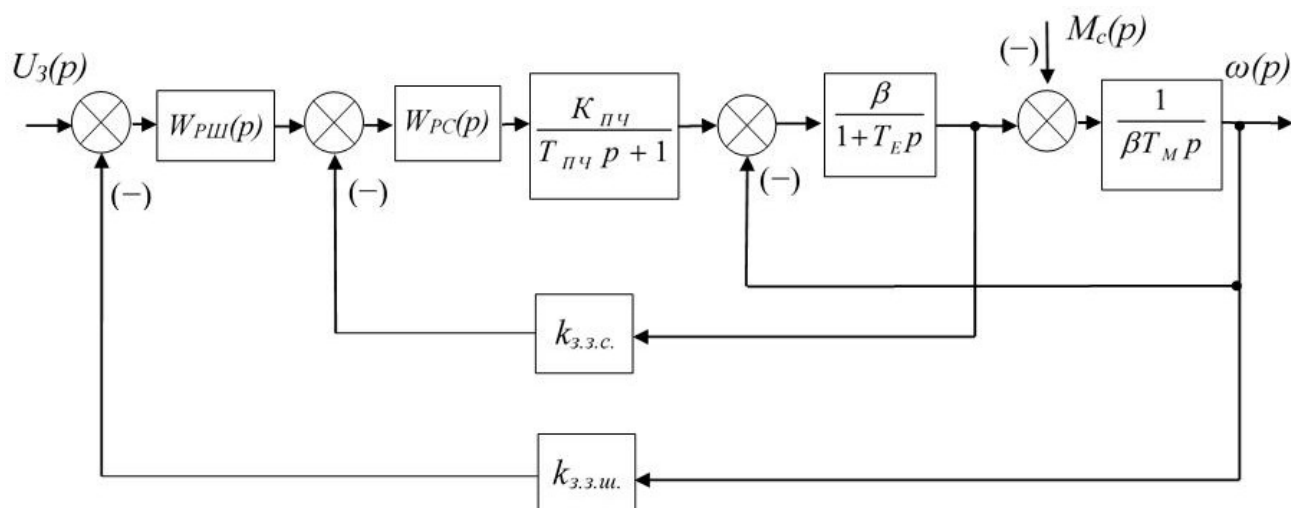


Рисунок 4.2 – Структурна схема електропривода зі спрощеною математичною моделлю електродвигуна

Розглянемо докладніше структурну схему зображену на рисунку 4.2.

На схемі прийняті наступні позначення:

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

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

$\beta$  – 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 0,005с.  $T_{пч} = 0,005$  с.

Зворотні зв'язки за струмом та швидкістю виконаємо за допомогою пропорційних ланок з коефіцієнтами  $k_{3.3.с}$  і  $k_{3.3.ш}$  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.

Коефіцієнти підсилення регуляторів  $k_{рс}$  і  $k_{рш}$ , що відповідають датчикам струму і швидкості, вважаємо рівними 10.

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

Передатна функція ПІ-регулятора швидкості

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

Передатна функція ланцюга зворотного зв'язку за швидкістю двигуна:

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

Передатна функція ПІ-регулятора струму

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

Передатна функція ланцюга зворотного зв'язку за струмом двигуна

$$W_{3.3.C}(p) = \frac{\Delta u_{3.3.C}}{\Delta M} = k_{3.3.C}.$$

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

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

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

Структурна схема з наведеними передатними функціями регуляторів зображена на рисунку 4.3.

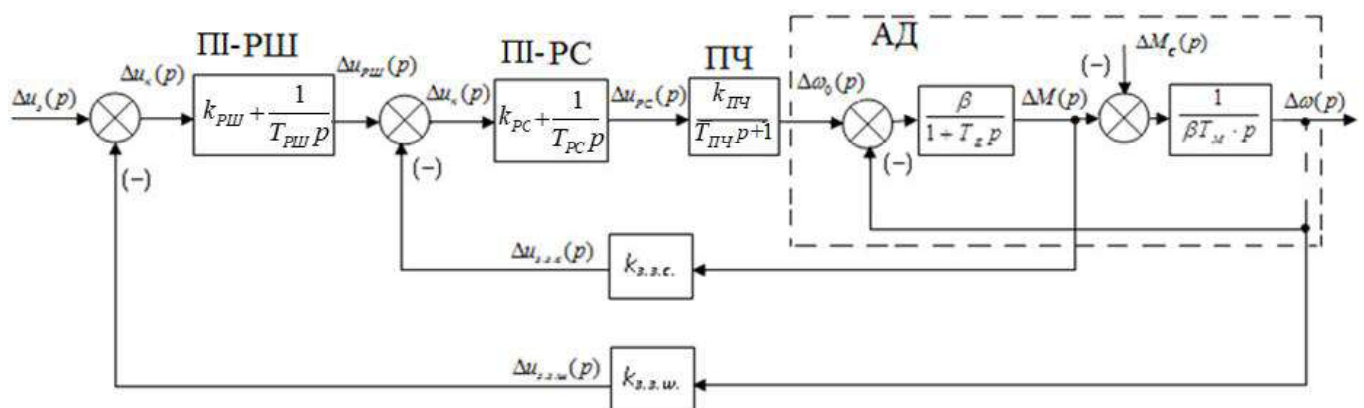


Рисунок 4.3 – Структурна схема електропривода

У відповідності зі структурною схемою передатна функція асинхронного

двигуна

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

де  $T_E$  – електромагнітна постійна часу асинхронного двигуна, с;

$T_M$  – електромеханічна постійна часу двигуна.

Для моделювання системи керування електроприводом приймаємо, що нелінійна характеристика асинхронного двигуна може бути замінена її лінеаризованою формою. Це спрощення базується на таких припущеннях:

- навантаження змінюється різко, у вигляді миттєвого прикладання або зняття сталого моменту;
- величина збурення не перевищує максимального моменту, який здатен розвинути двигун, отже, як до, так і після збурення, двигун працює в межах стійкої ділянки своєї механічної характеристики.

Оскільки двигун працює у зв'язці з частотним перетворювачем, його робоча область обмежується стійкою частиною характеристики, яка може бути описана лінійною залежністю за наступним рівнянням:

$$\frac{M_H}{2 \cdot M_{\max} \cdot \omega_c} \cdot p + \frac{S_{кр} \cdot M_H}{2 \cdot M_{\max}} = S_H.$$

Напишемо рівняння в такому вигляді

$$\frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_c \cdot S_H}{Z_p} \cdot p + M_H = M_{CT}.$$

Ці рівняння разом утворюють систему, яка описує динаміку асинхронного двигуна під час перехідних процесів з урахуванням електромагнітних ефектів. Якщо вважати, що перед раптовою зміною навантаження двигун працював у сталому режимі, то цю робочу точку можна прийняти як початкову з нульовими умовами для подальшого аналізу. Після відповідних математичних перетворень дана система набуває наступного вигляду:

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

$$\frac{S_{кр}}{2 \cdot M_{\max}} \cdot (T_E \cdot p + 1) \cdot M_H = S_H.$$

З цих рівнянь можна отримати передатну функцію розглянутої системи електропривода. Вхідною величиною тут є статичний момент опору  $M_{CT}$ , а вихідною – значення кутової швидкості і моменту двигуна. Передатна функція по ковзанню має вигляд

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

#### 4.1.2 Формування та розрахунок параметрів елементів структурної схеми

Визначення параметрів здійснюється за допомогою перехідних характеристик [2,3].

Параметри двигуна АИР АИР100L4 для розрахунку перехідних процесів наведені в таблиці 4.1 [1].

Таблиця 4.1 - Вихідні дані для розрахунку

| Параметр                                         | Значення |
|--------------------------------------------------|----------|
| Тип                                              | АИР100L4 |
| Потужність $P_H$ , кВт                           | 4,0      |
| Синхронна частота обертання $n$ , об./хв.        | 1500     |
| Число пар полюсів $p$                            | 4        |
| Швидкість обертання валу $n_s$ , об./хв.         | 1410     |
| ККД, %                                           | 83,1     |
| Коефіцієнт потужності, $\cos\phi$                | 0,84     |
| Ковзання $S_H$ , %                               | 4,33     |
| Струм $I_H$ , А (при $U = 380$ кВт)              | 8,8      |
| Кратність пускового струму $I_n / I_H$           | 7        |
| Кратність максимального моменту $M_{\max} / M_H$ | 2,1      |
| Кратність пускового моменту $M_n / M_H$          | 2,4      |
| Момент інерції, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$     | 0,013    |
| Маса, кг                                         | 29,1     |

Для розрахунку параметрів структурної схеми [2,10] необхідно визначити відсутні для параметри системи, технічні данні якого наведені в таблиці 4.1.

Кутова швидкість холстого ходу електродвигуна  $\omega_{ДВ}$ ,  $\text{с}^{-1}$ ,

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

Номінальний момент двигуна  $M_H$ ,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ,

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_{ДВ}}; \quad M_H = \frac{4000}{157} = 25,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критичний момент електродвигуна  $M_K$ ,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ,

$$M_K = (M_{\max} / M_H) \cdot M_H;$$

$$M_K = 2,1 \cdot 25,5 = 53,55 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критичне ковзання  $S_{KP} = 0,25$ .

Кутова швидкість електромагнітного поля статора  $\omega_c$ ,  $\text{рад/с}$ ,

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot f_c,$$

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

Номінальна кутова швидкість ротора двигуна  $\omega_H$ ,  $\text{рад/с}$ ,

$$\omega_H = \frac{\omega_c \cdot (1 - s_H)}{p_n},$$

$$\omega_H = \frac{314,16 \cdot (1 - 0,04)}{4} = 75,4 \text{ рад/с}.$$

Номінальний момент двигуна  $M_H$ ,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ,

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}, \quad M_H = \frac{4000}{75,4} = 53,1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковий момент двигуна  $M_{\Pi}$ ,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ,

$$M_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_H} \cdot M_H,$$

$$M_{\Pi} = 2,4 \cdot 53,1 = 127,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

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

$$M_{\max} = \frac{M_{\max}}{M_H} \cdot M_H,$$

$$M_{\max} = 2,1 \cdot 53,1 = 111,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номінальна фазна напруга двигуна  $U_\phi$ , В,

$$U_\phi = \frac{U_H}{\sqrt{3}},$$

$$U_\phi = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}.$$

Номінальний струм статора  $I_H = 8,8 \text{ А}$  (таблиця 4.1),

Модуль жорсткості механічної характеристики АД  $\beta$ ,  $\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}^{-1}}$ ,

$$\beta = \frac{M_H}{\omega_H \cdot S_H}, \quad \beta = \frac{53,1}{75,4 \cdot 0,04} = 17,6 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}^{-1}}.$$

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

$$T_E = \frac{1}{\omega_c \cdot S_{кр}},$$

$$T_E = \frac{1}{314,15 \cdot 0,25} = 0,013 \text{ с}.$$

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

$$J_\Sigma = J_H + 0,6 \cdot J_H,$$

$$J_\Sigma = 0,013 + 0,6 \cdot 0,013 = 0,021 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Електромеханічна постійна часу двигуна  $T_M$ , с,

$$T_M = \frac{J_\Sigma}{\beta},$$

$$T_M = \frac{0,021}{17,6} = 0,0012 \text{ с}.$$

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

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

де  $u_{3.3.ш.ном}$  – напруга зворотного зв'язку за швидкістю,  $u_{3.3.ш.ном} = 10$  В.

$$k_{3.3.ш} = \frac{10}{75,4} = 0,133 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом  $k_{3.3.с}, \frac{B \cdot A}{H \cdot M}$ .

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

де  $u_{3.3.с.ном}$  – напруга зворотного зв'язку за швидкістю,  $u_{3.3.с.ном} = 10$  В.

$$k_{3.3.с} = \frac{10}{53,1/8,8} = 1,66 \frac{B \cdot A}{H \cdot M}.$$

Коефіцієнт підсилення частотного перетворювача приймаємо  $k_{пч} = 80$ .

Для первинних розрахунків приймаємо:

$$T_{рш} = T_M = 0,0012,$$

$$k_{рш} = k_{рс} = 10;$$

$$T_{рс} = T_{пч} = 0,003.$$

Передатна функція регулятора швидкості  $W_{рш}(p)$

$$W_{рш}(p) = k_{рш} + \frac{1}{T_{рш}p},$$

$$W_{рш}(p) = 10 + \frac{1}{0,0012 \cdot p}.$$

Передатна функція регулятора струму  $W_{рс}(p)$

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

$$W_{рс}(p) = 10 + \frac{1}{0,003 \cdot p}.$$

## 4.2 Аналіз динамічних властивостей системи керування електропривода ківшевого конвеєра

Сформована структурна схема обраного електропривода є основою для побудови динамічної структурної схеми системи керування.

Початкові дані для розрахунку перехідних процесів зведено у таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 - Початкові дані для розрахунку перехідних процесів системи

| Параметр                                                   | Одиниці виміру                | Значення                  |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики | $\frac{H \cdot m}{c^{-1}}$    | $\beta = 17,6$            |
| Електромагнітна постійна часу                              | с                             | $T_E = 0,013$             |
| Електромеханічна постійна часу                             | с                             | $T_M = 0,0012$            |
| Постійна часу регулятора швидкості                         | с                             | $T_{PШ} = T_M = 0,0012$   |
| Постійна часу регулятора струму                            | с                             | $T_{PC} = T_{ПЧ} = 0,003$ |
| Постійна часу перетворювача                                | с                             | $T_{ПЧ} = 0,003$          |
| Коефіцієнт підсилення (передачі) перетворювача             | -                             | $k_{ПЧ} = 80$             |
| Коефіцієнт підсилення регулятора швидкості                 | -                             | $k_{PШ} = 10$             |
| Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку швидкістю           | В·с                           | $k_{з.з.ш} = 0,133$       |
| Коефіцієнт підсилення регулятора швидкості                 |                               | $k_{PC} = 10$             |
| Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом          | $\frac{B \cdot A}{H \cdot m}$ | $k_{з.з.с} = 1,66$        |

Передатні функції ланок.

Електромагнітної частини двигуна

$$W_{e.дв}(p) = \frac{\beta}{T_E \cdot p + 1}$$

$$W_{м.дв}(p) = \frac{17,6}{0,013 \cdot p + 1}$$

Електромеханічної частини двигуна

$$W_{м.дв}(p) = \frac{1}{\beta \cdot T_M \cdot p}$$

$$W_{м.дв}(p) = \frac{1}{17,6 \cdot 0,0012 \cdot p} = \frac{1}{0,021p}$$

Перетворювача частоти

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

$$W_{ПЧ}(p) = \frac{50}{0,003 \cdot p + 1}$$

Регулятора струму

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

$$W_{PC}(p) = 10 + \frac{1}{0,003 \cdot p}$$

Регулятора швидкості

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

$$W_{PII}(p) = 10 + \frac{1}{0,0012 \cdot p}$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку  
за струмом

$$W_{ззс}(p) = k_{ззс}$$

$$k_{з.з.с} = 1,66$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку  
за швидкістю

$$W_{ззш}(p) = k_{з.з.ш}$$

$$k_{з.з.ш} = 0,133$$

При дослідженні динамічних характеристик системи керування прийнято, що статичний момент, що прикладений до валу двигуна, у момент часу  $t = 1,5$  с складає:

$$M_{CT} = 30\% \cdot M_H ;$$

$$M_{CT} = 0,3 \cdot 53,1 = 15,9 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Після обчислення всіх параметрів, необхідних для структурної схеми (рисунок 4.2), було побудовано структурну схему динамічної моделі системи управління, яка представлена на рисунку 4.3.

На схемі 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-регуляторів швидкості та струму відповідно.

«Transfer Fcn3» - реалізує передатну функцію частотного перетворювача;

«Transfer Fcn4» та «Transfer Fcn5» – реалізують лінеаризовану модель двигуна;

«Gain4» та «Gain5» - датчики струму та швидкості відповідно;

За допомогою блоків «Gain3» та «Gain6» виконується перерахування отриманих даних у відносні одиниці (для спрощення подальшого порівняння).

«Score1», «Score2» та «Score» – використовуються для отримання графіку перехідного процесу за швидкістю та струмом та напрузі відповідно.

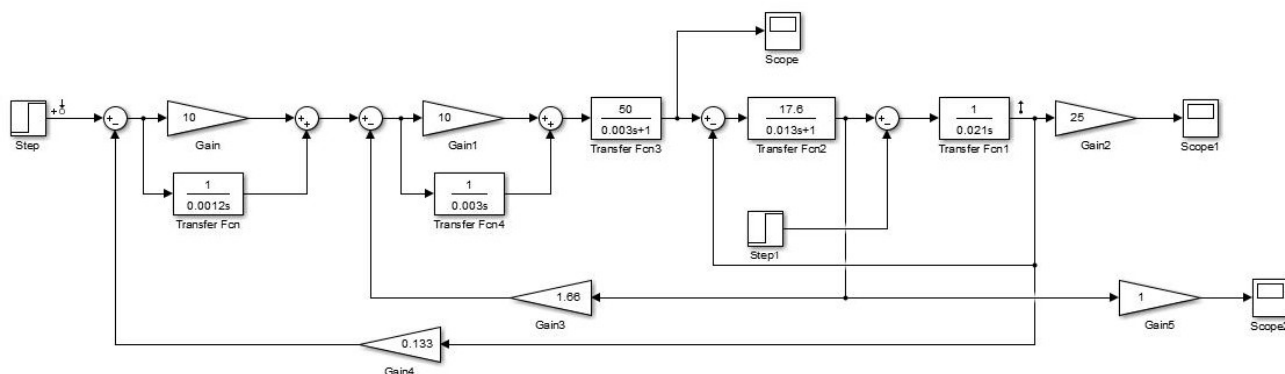


Рисунок 4.3 - Схема розрахункової моделі з ПІ-регулятором швидкості

На основі динамічної моделі (рисунок 4.3) та її параметрів за допомогою програмного забезпечення "MATLAB" і прикладних пакетів для нього Simulink Toolbox і Control Toolbox проведена побудова перехідних характеристик системи керування асинхронним двигуном [5].

На рисунку 4.4 представлений перехідний процес системи з ПІ-регулятором швидкості.

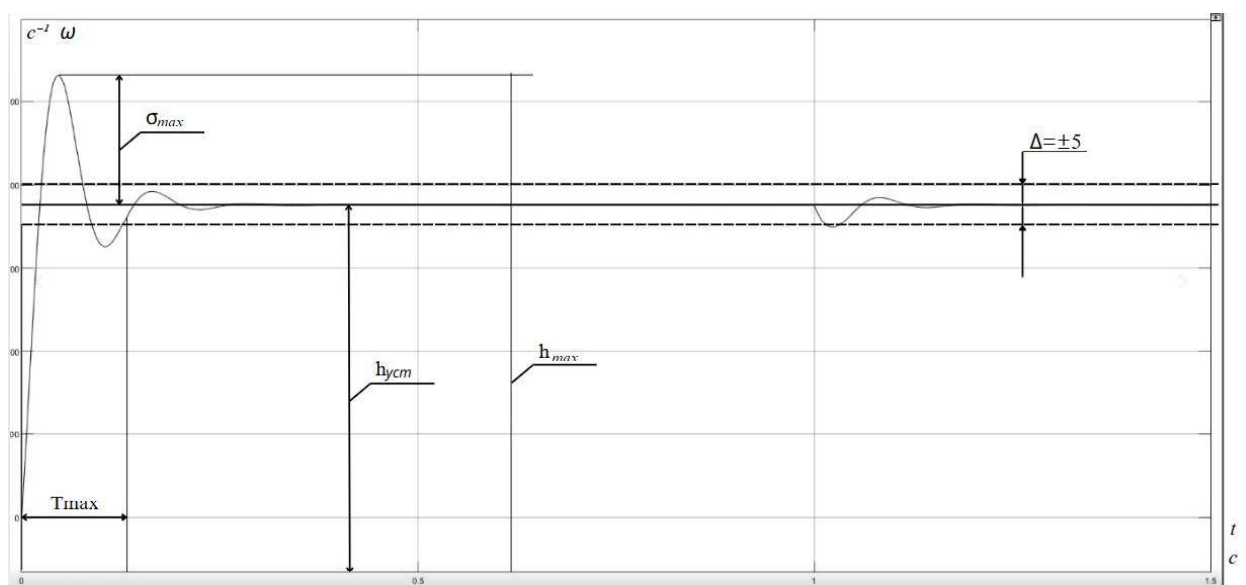


Рисунок 4.4 - Перехідна характеристика частоти обертання ротора

Аналіз показників якості перехідного процесу показав, що перегулювання  $\sigma_{\max} = 6,5\%$ , час перехідного процесу  $T_{\max} = 0,13$  с.

Коливальність  $N = 1$  статична помилка – помилка в сталому режимі роботи системи при дії на неї постійного сигналу,  $\Delta = 0\%$ .

Такі показники якості задовольняють вимогам до системи керування.

На рисунку 4.5 представлений перехідний процес системи по струму статора.

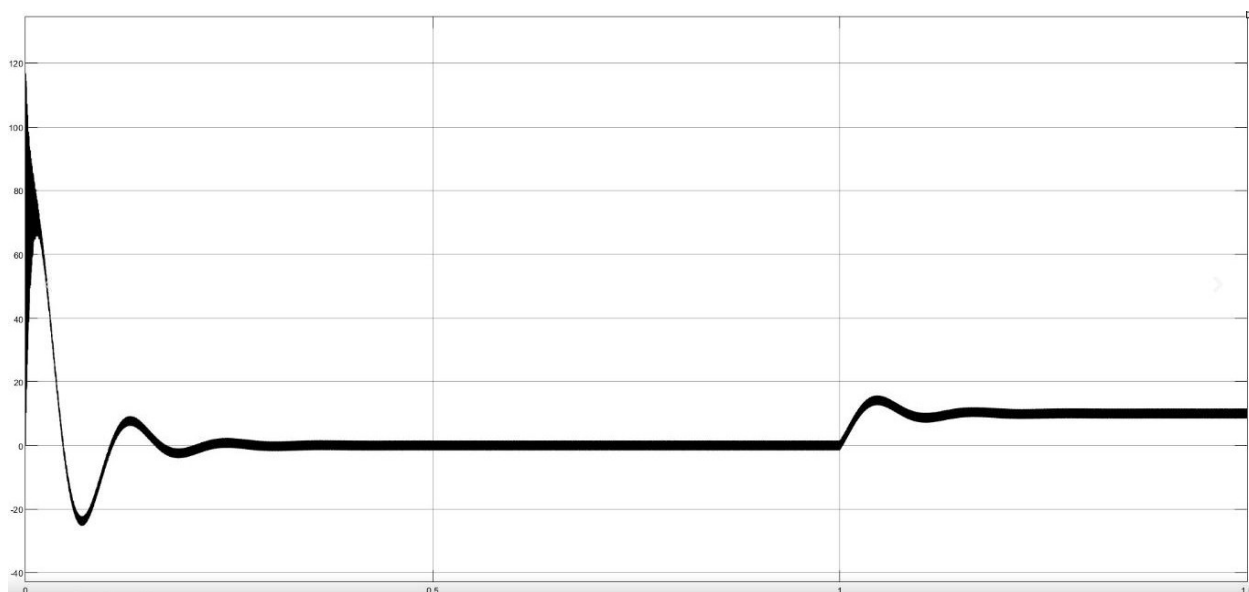


Рисунок 4.5 - Перехідна характеристика струму статора

Аналізуючи цю характеристику, можна зробити висновок, що система функціонує стабільно: максимальний пусковий струм не перевищує допустимого струму короткого замикання, який у кілька разів більший за номінальний. Після прикладання навантаження на вал двигуна струм стабілізується й переходить у номінальний режим.

## **5 ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА КІВШЕВОГО КОНВЕЄРА**

### **5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів при роботі ковшової норії**

Обслуговуючий персонал ковшових норій піддається таким загрозам [7]:

- електротравми — обладнання з напругою 220/380 В: недостатня ізоляція, несправне заземлення або помилки в схемі збільшують ризик ураження електричним струмом;
- механічні небезпеки — рухомі вузли, відкриті агрегати, можливість обриву стрічки з падінням ковшів або розривом ланцюга;
- пирогенне середовище — утворення пилоповітряних сумішей із зернового пилу. Вони можуть спричиняти локальні вибухи, залежно від дисперсності, концентрації, вологості та наявності джерела запалення;
- шум, тепло, електроконтакт — підвищений рівень шуму, нагріті зони обладнання, небезпека опіків; можливі ураження через струми витoku електроустаткування.

### **5.2 Правила техніки безпеки під час роботи на ковшових норіях**

Керівництво: тільки відповідальна особа (назначена офіційно) контролює справність, інформує про послідовність роботи, не допускає сторонніх до зони [8].

Допуск до роботи: лише люди  $\geq 18$ р., які пройшли інструктаж та ознайомлені з конструкцією та правилами експлуатації.

Одяг та зовнішній вигляд: застебнутий закріплений робочий одяг, прибрані волосся, платки без вільних кінців.

Огородження механізмів: всі рухомі елементи закривати огорожами. Заборонено працювати з відкритим кожухом або знятим забором.

Обслуговування та чищення: дозволено лише за повного зупинення й відключення живлення; люки і корпус повинні бути закриті герметично. Заборонено очищати руками через оглядові відчинки; лише спеціальними інструментами, на безпечному відстані.

Очищення від завалів: нижню частину чистити за допомогою скребка, лише після відключення приводу та встановлення плакату “Не включати – працюють люди”.

Платформи для обслуговування: огорожені майданчики з поручнями  $\geq 1$  м заввишки, з обшиттям від дошки до  $\geq 0,2$  м від підлоги.

Проходь: мінімальні ширини — 1,5 м між робочими зонами, 0,8–1,0 м між машинами та стінами.

Пожежні заходи: обладнання має бути оснащено аспірацією. Забороняється курити або проводити вогневі роботи без дозволу. На місцях з високим ризиком — вогнегасники ОХП-4, ОУ-2А, пісок, відра з водою, а також системи пожежної сигналізації та захист IP44 на ел. обладнанні .

Антипилові заходи: герметичні головки, люки, труби; аспіраційні системи з блокуванням при включенні; вибухорозрядники на овідних вузлах (головки, циклоні, фільтри).

**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.

### 5.3 Заходи безпечної експлуатації електрообладнання

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, зтягнутому пуску, відсутності захисту електродвигуна, при зниженні швидкості стрічки або бічному сходженні її тощо;
- установка тимчасових огорожень струмоведучих 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 струмоведучих частинах, що для безпеки проведення робіт підлягають замиканню накоротко і заземленню;
- накладення переносних заземлень на відключені струмоведучі частини електропривода відразу після перевірки відсутності напруги або включення спеціальних роз'єднувачів, що заземлюють;
- огороження робочого місця і вивішування на огороженні напис "Працювати тут".

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.

Для запобігання виникнення пожежі в приміщенні передбачена електрична пожежна сигналізація, що складається з датчиків, що сповіщають, встановлених у приміщенні складу.

Для швидкої ліквідації вогнищ загоряння використовуються вогнегасники типу ОХП - 4 і ОУ - 2А, що розташовуються в безпосередній близькості від ковшової норії.

Для запобігання можливого загоряння в небезпечних зонах оболонки електричних апаратів, приладів, шаф, зборок виконані зі ступенем захисту

IP44. Також використовується ряд інших первинних засобів пожежогасіння, таких як пісок, багри, цебра, що знаходяться на пожежних щитах або біля них. Організаційні заходи щодо пожежної профілактики проводять з метою забезпечення правильної експлуатації електроустановки і проведення протипожежного інструктажу серед оперативно-ремонтного персоналу.

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.

Очищення напрямків заглиблених норій з метою запобігання отруєнню газами, що накопичуються в них, необхідно проводити бригадою не менше 2 осіб під наглядом керівника робіт із використанням страхувальних засобів.

## ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена системам керування ківшевого конвеєра.

Основні результати виконаної роботи можна сформулювати наступним чином:

- розглянуті класифікація транспортуючих машин та сфери використання типу норія Н20-20 , наведені дані про конструкцію, роботу та електричне обладнання ківшевих норій;

- проведена заміна існуючого електродвигуна на більш сучасний зі ступенем захисту IP54/55 електродвигун типу АІР100L4 ;

- проведений вибір комплектного електропривода типу **АТV12НU40М3** для керування обраним двигуном;

- на основі функціональної схеми складена структурна схема частотної системи керування та розраховані її параметри; проведено дослідження значень основних показників якості перехідних процесів САК.

Отримані наступні результати дослідження:

- аналіз показників якості перехідного процесу з розрахунковими параметрами налаштувань регулятора швидкості показав, що перерегулювання  $\sigma_{\max} = 6,5\%$ , час перехідного процесу  $T_{\max} = 0,13$  с. Коливальність  $N = 1$  статична помилка – помилка в сталому режимі роботи системи при дії на неї постійного сигналу,  $\Delta = 0 \%$ .

Проведений аналіз динамічних властивостей розглянутої схеми системи керування показав, що вона 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.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Асинхронные электродвигатели общего назначения серии АИР. Технический каталог. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://elmo.ua/wp-content/uploads/2018/07/tehopisanie-air-ru.pdf>
2. **Голодний І.М.** Регульований електропривод: Підручник / І.М. Голодний, Ю.М. Лаврінченко, 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
3. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.; За ред. П.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. - К.: Либідь, 2005.
4. **Жигулін О. А.** Підйомно-транспортні машини: Навчальний посібник. / О. А. Жигулін., І. І. Махмудов, Н. О. Жигуліна. Ніжин, 2020. 150 с.
5. **Лазарєв Ю. Ф.** Моделювання динамічних систем у Matlab. Електронний навчальний посібник. – Київ: НТУУ "КПІ", 2011. – 421 с.
6. Нория ковшовая. Тип Н. Руководство по эксплуатации.
7. Основи охорони праці. Навч. посіб. / В. В. Березуцький, Т. С. Бондаренко, Г. Г. Валенко та ін.; За заг. ред. В. В. Березуцького. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Х.: Факт, 2007. – 480 с.
8. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів: НПАОП 40.1-1.21-98 [Електронний ресурс]. – Затв. наказом Держнаглядохоронпраці України від 09.01.1998 № 4. – Зареєстровано в Мін'юсті України 10.02.1998 за № 93/2533. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98>
9. Посібник з експлуатації перетворювача частоти ATV12HU40M3.
10. Частотне керування асинхронним приводом: Методичні вказівки для самостійної роботи з дисципліни „Основи електропривода” для студентів напряму підготовки 6.100101 – „Енергетика та електротехнічні системи в АПК” / Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. – Ніжин.: 2011.

## Додаток А

### Мультимедійна презентація

Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Галенчик Кірілл Євгенійович

Кваліфікаційна робота бакалавра на тему:

" Система керування електропривода ківшевого конвеєра"

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.

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.

**Мета роботи** – Метою роботи є удосконалення електропривода норії на основі застосування регульованих асинхронних двигунів (АД).

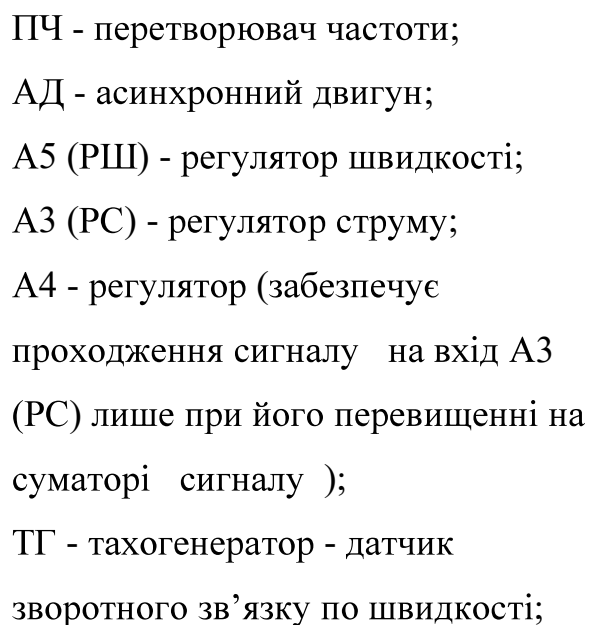
### Задачі роботи:

- розглянути автоматизовану систему керування електропривода норії;
- провести аналіз існуючих, сучасних засобів та систем керування електродвигунами змінного струму і на базі цього аналізу вибрати найбільш підходящий електропривод для керування електродвигуном норії;
- виконати аналіз динамічних властивостей роботи системи керування;
- привести загальні положення по технічній експлуатації електрообладнання норії.

## ЗАГАЛЬНИЙ ВИД І ОСНОВНІ СКЛАДОВІ ЧАСТИНИ СТРІЧКОВОЇ КІВШЕВОЇ НОРІЇ Н20-20



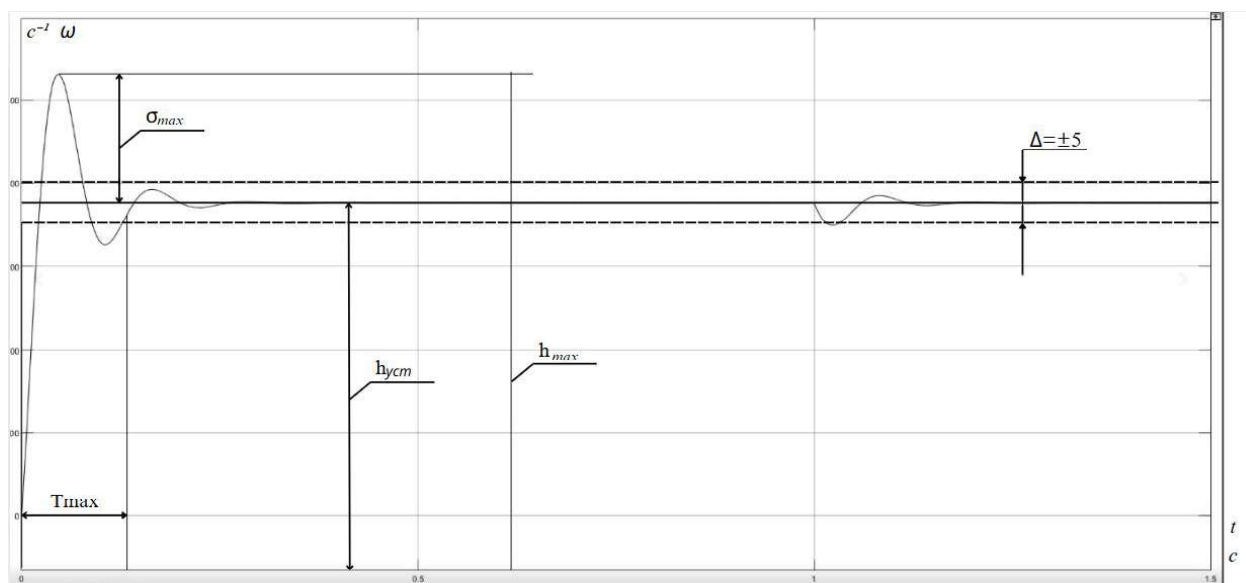
Слайд 3 мультимедійної презентації



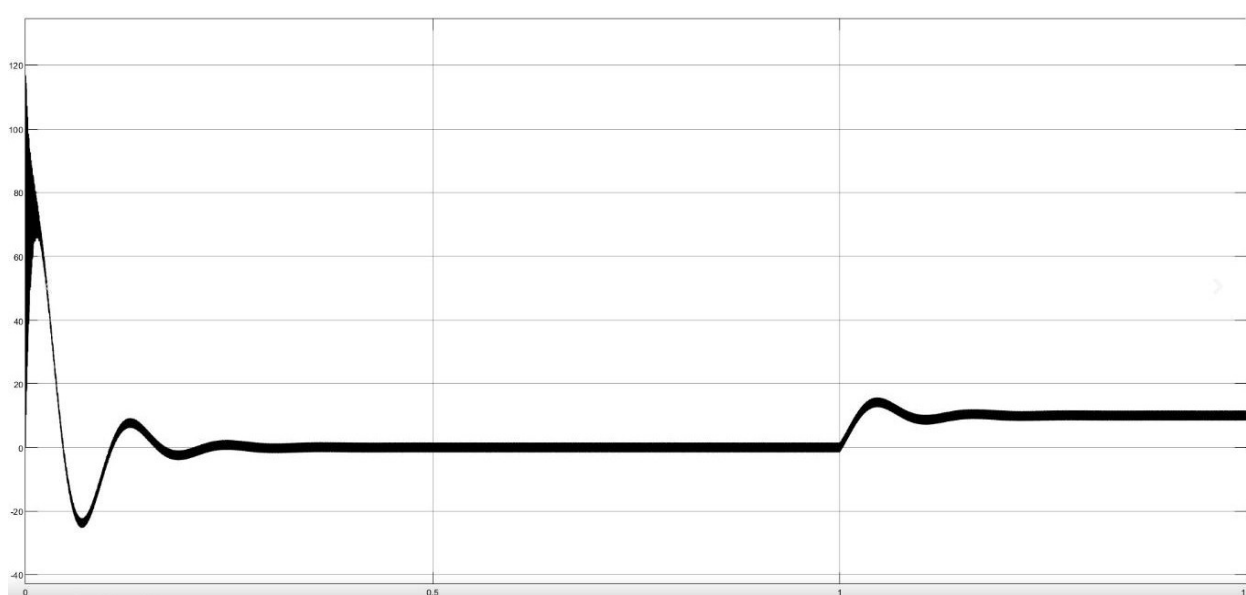
## Слайд 4 мультимедійної презентації



# АНАЛІЗ ДИНАМІКИ САК



Перехідна характеристика частоти обертання ротора



Перехідна характеристика струму статора

## ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена удосконаленню електропривода ківшевої норії.

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 зі ступенем захисту IP54/55 електродвигун типу АІР100L4;
- проведений вибір комплектного електропривода типу АТV12 для керування обраним двигуном;
- на основі функціональної схеми складена структурна схема частотної системи керування та розраховані її параметри; проведено дослідження значень основних показників якості перехідних процесів САК.

Отримані наступні результати дослідження:

- аналіз показників якості перехідного процесу з розрахунковими параметрами настройки регулятора швидкості показав, що перерегулювання  $\sigma_{\max} = 6,5\%$ , час перехідного процесу  $T_{\max} = 0,13$  с. Коливальність  $N = 1$  статична помилка – помилка в сталому режимі роботи системи при дії на неї постійного сигналу,  $\Delta = 0\%$ .

Проведений аналіз динамічних властивостей розглянутої схеми системи керування показав, що вона 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.