

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____	<u>О. КОЛЛАРОВ</u>
(підпис)	(ініціали, прізвище)
«___» _____	2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
МАГІСТРА

на тему Розробка та дослідження системи керування електроприводу
конвеєру за критерієм енергоефективності

Виконав студент 2 курсу, групи ГЕМм-22
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва спеціальності підготовки)
та електромеханіка»

_____	_____
Сергій СТАРИКОВ	(підпис)
(ім'я та прізвище)	

Керівник <u>доц. каф. ЕлІн, к. т. н. Л. В. Сергієнко</u>	_____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)	(підпис)

Рецензент _____	_____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)	(підпис)

Нормоконтроль:

_____	Е. НЕМЦЕВ
(підпис)	

(дата)

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

Студент _____	_____
	(підпис)

(дата)

ЛУЦЬК – 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

« » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Сергію СТАРИКОВУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Розробка та дослідження системи керування електроприводу конвеєру за критерієм енергоефективності

керівник роботи _____ Ліана СЕРГІЄНКО, канд. техн. наук

(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 15 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Тип конвеєра – стрічковий, загальна довжина конвеєра 1635 м, транспортований вантаж – кам'яне вугілля, продуктивність 650 т/год, умови експлуатації – середні, тип приводного двигуна – асинхронний з короткозамкненим ротором, система керування – скалярна на основі перетворювача частоти, тип приводу – редукторний

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

1. Аналітичний огляд стрічкових конвеєрів і машин безперервного транспорту

2. Складання схеми траси, вибір та розрахунок основних вузлів стрічкового конвеєра. Тяговий розрахунок конвеєра

3. Розрахунок і перевірка приводного двигуна. Вибір перетворювача частоти

4. Синтез автоматичної системи керування електроприводу конвеєра

5. Моделювання розробленої системи та аналіз отриманих результатів

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

Тринадцять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 4	Л. СЕРГІЄНКО, доц. каф.		
Нормоконтроль	Е. НЄМЦЕВ, ст. викл. каф.		

7. Дата видачі завдання 02 жовтня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	02.10.23 – 09.10.23	
2.	Розділ 2	10.10.23 – 20.10.23	
3.	Розділ 3	21.10.23 – 26.11.23	
4.	Розділ 4	27.11.23 – 15.12.23	
5.			
6.			
7.			
8.			
9.			

Студент _____
(підпис)

Сергій СТАРИКОВ
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ліана СЕРГІЄНКО
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Сергій СТАРИКОВ. Розробка та дослідження системи керування електроприводу конвеєру за критерієм енергоефективності/ Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2023.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, переліку джерел посилання.

У першому розділі проведений історичний огляд розвитку конвеєрних механізмів, описано структуру та параметри конвеєрів, класифікацію за їх характеристиками та розглянуто питання енергоефективності конвеєрів.

У другому розділі визначено основні режими роботи конвеєрів, розглянуто шляхи підвищення енергоефективності, вказано переваги частотно-регульованого електроприводу та встановлено вимоги до електромеханічної системи.

У третьому розділі виконано розрахунки та вибір елементів електромеханічної системи конвеєра, таких як вибір двигуна, редуктора, перетворювача частоти, а також розроблено математичні моделі асинхронного двигуна та системи керування.

У четвертому розділі проведено дослідження енергетичних характеристик системи керування конвеєра в різних режимах, враховуючи оптимальне регулювання частоти та напруги, а також проведено аналіз результатів.

Ключові слова: стрічковий конвеєр, електропривод, система керування, регулятор, моделювання, Simulink, тяговий розрахунок, енергоефективність

ANNOTATION

S. STARYKOV, Development and research of a control system for conveyor electric drive based on energy efficiency criteria / Graduation qualification work for obtaining the master's degree in specialty 141 " Electric Power Engineering, Electrotechnics and Electromechanics ". SHEI DonNTU, Lutsk, 2023.

The thesis consists of an introduction, the main part, which includes four sections, conclusions, a list of reference sources.

In the first chapter, a historical review of the development of conveyor mechanisms is carried out, the structure and parameters of conveyors are described, classification according to their characteristics, and the issue of energy efficiency of conveyors is considered.

In the second chapter, the main modes of operation of conveyors are defined, the ways of increasing energy efficiency are considered, the advantages of the frequency-regulated electric drive are indicated, and the requirements for the electromechanical system are established.

In the third section, the calculations and selection of elements of the conveyor electromechanical system, such as the selection of the motor, reducer, frequency converter, and mathematical models of the asynchronous motor and control system were developed.

In the fourth chapter, a study of the energy characteristics of the conveyor control system in different modes, taking into account the optimal regulation of frequency and voltage, was carried out, as well as an analysis of the results.

Key words: belt conveyor, electric drive, control system, controller, simulation, Simulink, traction calculation, energy efficiency

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ У ГАЛУЗІ МАШИН БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ	9
1.1 Історія розвитку конвеєрних механізмів	9
1.2 Структура стрічкового конвеєру	11
1.3 Основні параметри конвеєра	16
1.4 Класифікація конвеєрів за способами переміщення та типом вантажу	17
1.5 Питання енергоефективності конвеєрів	18
1.6 Висновки за розділом	19
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ І КОНСТРУКЦІЇ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ	20
2.1 Основні режими роботи стрічкового конвеєра	20
2.2 Основні напрямки підвищення енергоефективності	22
2.3 Основні переваги частотно-регульованого електроприводу	24
2.4 Вимоги до електромеханічної системи	25
2.5 Вимоги до електроприводу	27
2.6 Визначення завдань дослідження	29
2.7 Висновки за розділом	29
РОЗДІЛ 3. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА, РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ	30
3.1 Функціональна схема електромеханічної системи конвеєра	30
3.2 Тяговий розрахунок конвеєра	32
3.3 Вибір двигуна та редуктора електроприводу стрічкового конвеєру	37
3.4 Розрахунок параметрів двигуна	42
3.5 Вибір перетворювача частоти	45
3.6 Математична модель асинхронного двигуна	45
3.7 Математична модель перетворювача частоти та синтез регулятора швидкості	48

3.8 Енергетична характеристика електромеханічної системи стрічкового конвеєру	52
3.9 Математичний опис оптимального по енергоефективності регулятора системи керування за напругою	56
3.10 Математичний опис оптимального по енергоефективності регулятора системи керування за частотою	57
3.11 Модель для дослідження енергетичних характеристик	58
3.12 Висновки за розділом	59
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КОНВЕЄРА	61
4.1 Дослідження системи без врахування оптимального регулювання	61
4.2 Дослідження системи при одночасному використанні оптимальних регуляторів частоти та напруги	63
4.3 Дослідження та аналіз енергетичних показників при різних налаштуваннях системи керування	65
4.4 Висновки за розділом	67
ВИСНОВКИ	68
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	69

ВСТУП

Підвищення економічного розвитку країни неможливе без модернізації технічного обладнання у виробництві. Ефективність цього завдання визначається впровадженням передових технологій, зокрема конвеєрів, які, завдяки високій продуктивності та великій довжині транспортування, витісняють машини з традиційних сфер застосування, таких як транспортування, вантажно-розвантажувальні та складські роботи. Конвеєри демонструють високу ефективність в сучасному масовому та великосерійному виробництві, де вони інтегруються в автоматичні лінії, що передають вироби від одного етапу технологічного процесу до іншого. Ці системи контролюють темпи виробництва, забезпечують його ритмічність, сприяють помітному підвищенню продуктивності праці та збільшенню обсягу випуску продукції.

У сучасному виробництві конвеєри стали неодмінною складовою частиною технологічного процесу. Вони контролюють темп виробництва, забезпечують його регулярність і сприяють підвищенню продуктивності праці. Крім того, вони дозволяють вирішувати завдання повної механізації транспортно-технологічних процесів. Конвеєрні машини повинні відповідати високим вимогам до міцності та можливості працювати в автоматичних режимах у зв'язку з їх прямим впливом на загальний технологічний процес виробництва.

Використання конвеєрного транспорту має численні переваги порівняно з традиційним автомобільним і залізничним. Працівник не взаємодіє безпосередньо з транспортним процесом, а займається лише обслуговуванням механізмів, чим забезпечується вища продуктивність праці і його безпека. Крім того, для конвеєрного транспорту потрібна лише електрична енергія, що робить його економічно вигіднішим порівняно з використанням дорогоцінного природного органічного палива.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ У ГАЛУЗІ МАШИН БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

1.1 Історія розвитку конвеєрних механізмів

Початок застосування конвеєрів з 1800-х років, коли для переміщення сільськогосподарських продуктів, таких як зерно та борошно, використовувалися стрічки з шкіри або полотна. Однак лише в XX столітті конвеєри почали широко використовуватися в промислових умовах.

У 1901 році шведський інженер Йохан О. Сміт створив першу конвеєрну стрічку з парусини та гуми для транспортування вугілля та руди. Цей винахід справив революцію в гірничодобувній промисловості, дозволяючи ефективно та швидко переміщати великі обсяги матеріалу.

Після винаходу Сміта конвеєри стали застосовуватися в інших галузях промисловості, включаючи харчову обробку та виробництво. У 1913 році Генрі Форд впровадив складальну лінію, використовуючи конвеєрні стрічки для переміщення деталей автомобіля, що сприяло масовому виробництву та доступності автомобілів для середнього споживача.

Під час Другої світової війни конвеєри стали широко використовуватися для транспортування матеріалів у військових цілях. Після війни виробнича галузь та використання конвеєрів продовжили свій розвиток. У 1950-60-х роках були впроваджені автоматизовані конвеєрні системи, що підвищило ефективність та продуктивність виробництва.

У 1970-х роках розвиток електроніки та комп'ютерних технологій призвів до створення програмованих логічних контролерів (ПЛК), які можна було використовувати для управління конвеєрними системами.

З розвитком технологій конвеєрів зросла потреба у більш складному обладнанні. У 1960-70-х роках компанії розробляли вдосконалені випробувальні стенди, використовуючи електронні датчики та інші технології

для точнішого моделювання навантаження на конвеєрну стрічку. Ці системи дозволили інженерам ефективніше управляти продуктивністю конвеєрів і пов'язаного обладнання в різних умовах роботи, покращуючи алгоритми управління конвеєрними системами для досягнення максимальної ефективності та продуктивності.

У 1980-90-х роках використання конвеєрів продовжувало розширюватися в нових галузях, таких як поштові служби та системи обробки багажу в аеропортах. Також були розроблені нові матеріали, такі як пластик і синтетичний каучук, що зробило конвеєрні стрічки ще міцнішими та довговічнішими.

Розвиток комп'ютерних технологій у 1980-90-х роках призвів до подальшого прогресу в галузі конвеєрів. Комп'ютерне моделювання та програмне забезпечення для моделювання дали інженерам можливість проектувати та тестувати конвеєрні системи у віртуальному середовищі, зменшуючи необхідність у фізичному тестуванні та прискорюючи модернізацію алгоритмів конвеєрів. Це призвело до впровадження конвеєрних систем в промисловість, де вони стали ключовим інструментом для виробників, підвищуючи енергоефективність і продуктивність їх операцій.

На сьогоднішній день конвеєри використовуються в різних галузях промисловості, від гірничодобування та сільського господарства до харчової та автомобільної промисловості. Вони мають різні розміри і конфігурації, починаючи від малих настільних конвеєрів і закінчуючи масивними системами для транспортування матеріалів на великі відстані. Розвиток конвеєрів має значний вплив на промисловість, забезпечуючи швидкий та ефективний транспорт великих обсягів матеріалів і сприяючи підвищенню безпеки на робочому місці за рахунок зменшення ручної праці та підйому важких речей.

У теперішній час виявляється зростаючий інтерес до конвеєрних систем, спрямованих на енергоефективність, що сприяють зменшенню споживання

енергії та оптимізації експлуатаційних витрат. Це призвело до виникнення нових технологій, таких як системи з частотним керуванням, які призначені для покращення управління та мінімізації енерговитрат в конвеєрних системах.

Загалом, історія конвеєрів служить свідченням винахідливості та новаторства інженерів і винахідників протягом багатьох століть. Від скромних початків із використанням шкіряних і полотняних стрічок до модернових складних систем, конвеєри відіграли ключову роль у формуванні сучасного промислового світу.

1.2 Структура стрічкового конвеєру

Загальну структуру конвеєра зображено на рис. 1.1.

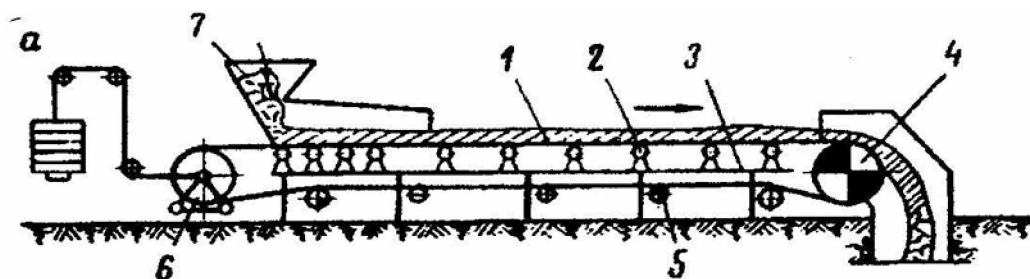


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд технологічної схеми стрічкового конвеєра

Позначення прийняті на рисунку 1.1: 1 – стрічка; 2 – роликоопори робочої вітки стрічки; 3 – став; 4 – приводний барабан; 5 – роликоопори неробочої вітки стрічки; 6 – натяжний барабан; 7 – завантажувальний пристрій.

Звичайна конструкція стрічкового конвеєра включає наступні основні компоненти.

Рама, також відома як станина, представляє собою основу конвеєрної системи, яка підтримує та утримує стрічку та транспортоване навантаження. Ця рама створена для забезпечення стійкої поверхні для руху стрічки та опори ваги транспортованого матеріалу.

Рама, як правило, складається з різних секцій, таких як головна, хвостова та центральна. Головна частина підтримує головний барабан, тоді як хвостова – хвостовий барабан. Центральна секція підтримує основну частину навантаження та часто є найдовшою секцією рами. Рама також призначена для підтримування роликів або направляючих роликів, що допомагають направляти стрічку по її траєкторії. Ці ролики кріпляться на кронштейнах або підставках, які приєднуються до рами. Крім того, рама може мати кронштейни або опори для інших компонентів, серед них: очищувачі стрічки і захисні пристрої.

Головний барабан розташований на розвантажувальному кінці конвеєрної стрічки та відіграє ключову роль у русі стрічки, надаючи їй необхідний натяг. Його рух здійснюється через електродвигун за допомогою редуктора та ведучого барабана.

Головний барабан може також включати захисне покриття, що запобігає зносу та розриву стрічки. Йому також відведена важлива роль у вирівнюванні стрічки та утриманні її в правильному положенні, що запобігає блуканню або перекосу, що може призвести до пошкоджень.

Хвостовий барабан, розташований на завантажувальному кінці стрічки, менший за головний барабан і служить для того, щоб стрічка проходила перед тим, як обертатися навколо головного барабана. Цей елемент часто виготовлений з міцних матеріалів, таких як сталь.

Хвостовий барабан виконує основну функцію правильної зміни напрямку руху стрічки та створення необхідного натягу. Зазвичай хвостовий барабан не приводиться в рух і обертається вільно. Проте в окремих випадках він також може приводитися в рух для підтримки руху стрічки. Також

хвостовий барабан може бути оснащений захисним покриттям, що запобігає зносу та розриву стрічки, або мати конструкцію самоочищення для запобігання накопиченню матеріалу і подовження терміну його служби.

Приводний двигун – це електродвигун, який відповідає за переміщення конвеєрної стрічки. Зазвичай він розташований у кінці головного барабана та з'єднаний з ним через редуктор і ведучий барабан. Приводний двигун відповідальний за обертання головного барабана, який, в свою чергу, переміщує стрічку. Швидкість конвеєрної стрічки визначається частотою обертання двигуна. Швидкість приводного двигуна може бути регульована за допомогою частотно-регульованого приводу та редуктора.

Приводні двигуни бувають різних типів і розмірів в залежності від конкретного застосування та конструкції конвеєра. Найпоширенішими є двигуни змінного струму, постійного струму та серводвигуни. Двигуни змінного струму здобули найбільшого поширення і доступні в трифазних, а також однофазних конфігураціях.

Правильне обслуговування приводного двигуна є також важливою частиною. Це включає регулярні перевірки, очищення та змащення двигуна та передач, а також моніторинг температури двигуна для впевненості у його нормальному функціонуванні.

Стрічка є ключовим компонентом конвеєрної системи, що відповідає за транспортування матеріалів. Зазвичай вона виготовлена з міцного матеріалу, наприклад, гуми або ПВХ, і підтримується роликоопорами.

Зазвичай, стрічка обертається навколо головного та хвостового барабанів і приводиться в рух за допомогою приводного двигуна, який з'єднаний із головним барабаном. Розроблена так, щоб витримувати вагу та абразивність матеріалів, стрічка також розрахована на опір ударним навантаженням, які можуть виникнути під час експлуатації.

Існують різні типи та дизайни стрічок, такі як плоскі, шевронні та ребристі. Плоскі стрічки застосовуються найширше і використовуються в

різноманітних галузях. Шевронні стрічки використовуються, коли є ймовірність ковзання матеріалу назад, а ребристі стрічки використовуються для утримання матеріалу на місці або запобігання його ковзанню назад.

Ширина та товщина стрічки є важливими параметрами при виборі для конвеєрної системи. Ширина повинна враховувати ширину транспортованих матеріалів, а товщина - вагу та абразивність матеріалів.

Важливо, щоб стрічка була належним чином натягнутою для запобігання ковзанню та забезпечення ефективної роботи. Треба регулярно перевіряти стрічку на знос, пошкодження та інші проблеми, а в разі необхідності проводити ремонт або заміну стрічки.

Ролики або натяжні ролики входять до складу конвеєрної системи і підтримують стрічку, допомагаючи утримувати її в правильному положенні на барабанах. Переважно вони розташовані під стрічкою та мають завдання зменшення тертя між стрічкою та рамою конвеєра.

Існують різні типи та конструкції роликів, включаючи ударні, зворотні та направляючі ролики. Ударні ролики, як правило, розташовані на завантажувальному кінці конвеєрної траси та призначені для поглинання ударів від падаючих матеріалів. Зворотні ролики розташовані під стрічкою і використовуються для підтримки та направлення стрічки навколо барабанів. Направляючі ролики утримують стрічку на одній лінії та запобігають її блуканню чи перекосам.

Ролики або направляючі можуть виготовлятися із різних матеріалів, таких як сталь чи пластик, в залежності від конкретного застосування чи конструкції конвеєра. Сталеві ролики, зазвичай, більш довговічні та здатні витримувати великі навантаження, тоді як пластикові ролики легші та більш стійкі до корозії.

Ролики відіграють ключову роль в конвеєрній системі, забезпечуючи підтримку стрічки, допомагаючи утримувати її на правильному шляху і зменшуючи тертя між стрічкою та рамою конвеєра. Також вони відіграють

важливу функцію у вирівнюванні та спрямуванні стрічки під час обертання навколо барабанів.

Регулярне технічне обслуговування роликів і натяжних роликів є ключовим для забезпечення безперебійної роботи конвеєра. Сюди відносяться періодичні перевірки, очищення та змащування роликів, а також заміна пошкоджених або зношених екземплярів.

Точки завантаження та розвантаження представляють собою ключові місця на конвеєрній системі, де матеріали вводяться або видаляються зі стрічки.

Зазвичай, точка завантаження знаходиться в хвостовій частині конвеєра, де матеріали наносяться на стрічку за допомогою різноманітних пристроїв, таких як бункери, жолоби або живильники. Завантажувальні пристрої дозволяють контролювати потік матеріалів та гарантувати послідовне та контрольоване їхнє введення.

Натомість, точка розвантаження, яка зазвичай розташована в головній частині конвеєра, служить для видалення матеріалів зі стрічки. Це може бути виконано вручну працівником або за допомогою спеціальних розвантажувальних пристроїв, таких як жолоби, бункери або конвеєри. Розвантажувальні пристрої забезпечують контроль над потоком матеріалів і гарантують їхнє послідовне та контрольоване видалення.

Правильно спроектовані точки завантаження та розвантаження є критичним елементом конвеєрної системи, оскільки вони можуть сприяти безперебійній роботі конвеєра, мінімізувати час простою та запобігати пошкодженням конвеєрної стрічки та інших компонентів. Регулярне технічне обслуговування точок завантаження та розвантаження важливе для забезпечення безперебійної роботи конвеєра, включаючи перевірки, очищення завантажувальних та розвантажувальних пристроїв, а також коректне регулювання та вирівнювання, з метою мінімізації пошкоджень стрічки та інших компонентів.

1.3 Основні параметри конвеєра

Основними параметрами стрічкового конвеєра є:

1. Ширина стрічки: ширина стрічки є важливим параметром при конструюванні стрічкового конвеєра. Вибір ширини стрічки визначається розмірами транспортованих матеріалів.

2. Швидкість стрічки: Цей параметр визначає швидкість руху стрічки, зазвичай вимірювану метрах за секунду. Регулюючи швидкість стрічки, можна оптимізувати продуктивність конвеєра.

3. Натяг стрічки: Натяг стрічки визначає силу, яка застосовується до стрічки для її утримання у правильному положенні на барабанах. Належний натяг є ключовим для ефективної роботи конвеєра та упередження прослизання або пошкодження стрічки.

4. Вантажопідйомність: Це максимальна вага матеріалів, яку може переміщувати конвеєр. Вибір вантажопідйомності залежить від ваги та абразивності транспортованих матеріалів.

5. Довжина конвеєра: Включає в себе точки завантаження та розвантаження. Цей параметр важливий для врахування при проектуванні системи та забезпечення необхідної відстані переміщення.

6. Кут нахилу: Кут нахилу вказує на нахил конвеєра. Більший кут нахилу дозволяє піднімати матеріали, тоді як менший кут опускати.

7. Потужність приводного двигуна: Потужність приводного двигуна важлива для задоволення вимог до навантаження конвеєра та обраної швидкості руху стрічки.

8. Система управління: Система управління, яка включає датчики, програмовані логічні контролери та людино-машинний інтерфейс, служить для моніторингу та контролю роботи конвеєра, щоб забезпечити ефективну та безпечну експлуатацію, мінімізуючи час простою.

З урахуванням цих параметрів можна розробити стрічковий конвеєр, що ефективно переміщає матеріали на великі відстані, обробляє різні види вантажів та працює в різноманітних умовах і середовищах. Ці параметри визначають успішну експлуатацію конвеєрної системи та гарантують виконання конкретних вимог застосування.

1.4 Класифікація конвеєрів за способами переміщення та типом вантажу

Класифікація за способом переміщення:

1. Стрічкові конвеєри: Використовують гумові або інші матеріали, щоб транспортувати товари вздовж фіксованого маршруту.
2. Роликові конвеєри: Використовують ролики або валки для транспортування товарів.
3. Ланцюгові конвеєри: Мають ланцюги, які приводяться в рух для переміщення товарів.
4. Плоскі конвеєри: Мають плоску поверхню для переміщення товарів.
5. Повітряні конвеєри: Використовують потік повітря для транспортування легких матеріалів.

Класифікація за типом вантажу:

1. Важкі конвеєри: Призначені для транспортування великих і важких навантажень, таких як руди або великі вироби.
2. Легкі конвеєри: Використовуються для транспортування легких вантажів, таких як коробки, пакети тощо.
3. Порожні конвеєри: Спроектвані для транспортування контейнерів або товарів безпосередньо в контейнерах.
4. Закриті конвеєри: Мають каркас або покриття, щоб захистити товари від погодних умов або забруднення.

5. Конвеєри для рідких матеріалів: Використовуються для транспортування рідин або пастоподібних матеріалів.

6. Конвеєри для в'язких матеріалів: Спроектовані для транспортування матеріалів, які можуть прилипати до стрічки.

7. Конвеєри для сипучих матеріалів: Використовуються для транспортування сипучих товарів, таких як зерно, цемент тощо.

8. Конвеєри для дрібних виробів: Спеціалізовані для транспортування дрібних деталей або продуктів.

1.5 Питання енергоефективності конвеєрів

Енергоефективність конвеєра залежить від режиму роботи та навантаження окремих його механізмів. Збільшення навантаження зазвичай веде до високих витрат енергії та підвищених капітальних витрат на обслуговування. Для подолання цих проблем важливо оптимізувати конструкцію та функціонування конвеєрів з метою зниження споживання енергії та підвищення ефективності. Це можна досягти, використовуючи енергоефективні двигуни, ефективні системи приводу та впроваджуючи технології збереження енергії, такі як приводи зі змінною частотою та регенеративні приводи. Важливе значення також має профілактичне обслуговування, яке допомагає виявляти потенційні проблеми перед їх появою та скорочує час простою. [6]

Регулярне технічне обслуговування та актуалізація компонентів конвеєра також важливі для забезпечення їхньої оптимальної роботи та ефективного використання енергії. Додатково, використання вдосконалених систем керування дозволяє в реальному часі моніторити та регулювати

споживання енергії, дозволяючи вносити корективи для оптимізації використання енергії.

Технологічні інновації, спрямовані на підвищення енергоефективності конвеєрів, включають регенеративні приводи, які відновлюють та повторно використовують енергію, що інакше б втратилася у вигляді тепла.

Підвищення енергоефективності конвеєрів можливе через контроль параметрів частоти та напруги електроприводу. Регулюючи швидкість приводного двигуна, можна знизити втрати енергії, що призведе до підвищення ефективності системи. Використання систем керування приводом за допомогою перетворювача частоти дозволяє точно регулювати частоту та напругу двигуна. Це забезпечує кращий контроль швидкості конвеєрної стрічки, зменшуючи споживання енергії.

В останні роки у промисловості зростає увага до сталого розвитку та зменшення викидів вуглекислого газу, що призводить до активного впровадження більш енергоефективних конвеєрних технологій. Загалом підвищення енергоефективності конвеєрів – це перманентний процес, що вимагає поєднання технологічних оновлень, операційних покращень і зобов'язань відносно сталого розвитку.

1.6 Висновки за розділом

Був проведений аналіз сучасних тенденцій у розвитку систем безперервного транспорту, включаючи стрічкові конвеєри. Висвітлено як вдосконалення елементів механічної частини, так і розробки та дослідження сучасних електромеханічних систем безперервного транспорту.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ І КОНСТРУКЦІЇ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ

2.1 Основні режими роботи стрічкового конвеєра

При експлуатації стрічкового конвеєра можуть виникати різні режими роботи, що залежать від характеристик та властивостей транспортованого вантажу, а також налаштувань конвеєрної системи. Режими роботи електромеханічної системи стрічкового конвеєра можна класифікувати наступним чином:

1. Режим запуску: Цей режим настає, коли конвеєрна система активується і розпочинає переміщення вантажу з положення спокою. Для цього режиму потрібний великий пусковий момент і можливі короточасні стрибки потужності.

2. Нормальний режим роботи: У цьому режимі конвеєрна система безперервно транспортує вантаж з постійною швидкістю та сталим потоком матеріалу. В цьому режимі система працює з релятивно стабільним рівнем споживаної енергії, хоча можливі коригування, залежно від навантаження.

3. Режим зупинки: Конвеєрна система вимикається та припиняє рух матеріалу. Це вимагає зменшення крутного моменту і може призвести до короточасних стрибків потужності.

4. Режим перевантаження: Коли навантаження на стрічкову систему перевищує номінальну потужність, це може призвести до збільшення споживання електроенергії та можливого пошкодження системи.

Управління потоком вантажу на стрічковому конвеєрі є ключовим аспектом ефективності його функціонування при переміщенні матеріалу. Основна мета контролю потоку полягає в тому, щоб забезпечити відповідність кількості транспортованого матеріалу вимогам подальших процесів, мінімізуючи при цьому витрати енергії під час транспортування.

Існують різні методи керування потоком вантажу на стрічкових конвеєрах, наприклад:

Ручне керування: За такого методу оператори вручну регулюють швидкість конвеєрної системи та швидкість подачі. Незважаючи на його простоту і невисоку вартість, цей метод не є ефективним для систем із високим рівнем пропускної здатності або тих, які вимагають високої точності.

Автоматизоване керування: системи автоматичного управління використовують датчики та обладнані зворотними зв'язками для автоматичного регулювання швидкості та подачі матеріалів на стрічкові конвеєри. Цей метод є точнішим і ефективнішим порівняно з ручним керуванням, і його можна використовувати для систем із великою пропускною здатністю та високими вимогами до точності.

Застосовують математичні моделі та програмне забезпечення для моделювання та визначення оптимальної швидкості та подачі матеріалів на стрічковий конвеєр враховуючи властивості матеріалу, вимоги до процесу та енергоспоживання. Цей передовий та ефективний метод вимагає значних обчислювальних ресурсів і досвіду.

Аналіз продуктивності стрічкового конвеєра дозволяє виявляти тенденції та закономірності, які можна використовувати для оптимізації його роботи. Це включає в себе аналіз темпів виробництва, простоїв, витрат на технічне обслуговування та інших факторів.

Експертний висновок може бути корисним для визначення ключових параметрів дискретного регулювання стрічкових конвеєрів, враховуючи знання та досвід фахівців в області конвеєрних систем.

Для забезпечення ефективної роботи конвеєрного механізму важливий аналіз та оптимізація режимів енергоспоживання з урахуванням характеристик транспортованого вантажу та конкретних налаштувань системи. Це досягається за допомогою різноманітних методів керування,

наприклад: регулювання частоти та напруги, для адаптації продуктивності системи до змінних умов навантаження.

2.2 Основні напрямки підвищення енергоефективності

Існує кілька можливостей оптимізації алгоритмів управління в системах з частотно-регульованими приводами для стрічкових конвеєрів. Ось деякі з найпоширеніших алгоритмів управління:

1. Регулювання швидкості:

Використання розширених алгоритмів управління частотним перетворювачем дозволяє точно контролювати швидкість стрічки, що призводить до підвищення ефективності та продуктивності конвеєра.

2. Оптимізація енергії:

Розширені алгоритми частотного керування дозволяють оптимізувати споживання енергії, регулюючи швидкість електродвигуна приводу відповідно до вимог конвеєра.

3. Керування навантаженням:

Розширені алгоритми керування можуть забезпечувати взаємодію крутного моменту та швидкості електродвигуна з вимогами до навантаження конвеєра, що покращує його продуктивність.

4. Прогнозне керування:

Використання розширених алгоритмів управління, що передбачають та адаптуються до змінних умов навантаження, може покращити продуктивність та енергоефективність технологічного процесу.

5. Керування нечіткою логікою:

Алгоритми керування нечіткою логікою можуть приймати рішення основуючись на неточних або невизначених даних, що дозволяє оптимізувати роботу конвеєра в невизначених чи змінних умовах.

6. Адаптивне керування:

Алгоритми адаптивного керування частотно-регульованого приводу можуть регулювати свої параметри в реальному часі відповідно до змінних умов конвеєра, що дозволяє ефективно та безпечно працювати.

7. Керування нейронною мережею:

Використання алгоритмів керування нейронною мережею дозволяє системі навчатися на історичних даних, покращуючи продуктивність та оптимізуючи роботу конвеєра з часом.

8. Модель прогнозування керування:

Алгоритми, що використовують математичні моделі для прогнозування поведінки конвеєра, дозволяють оптимізувати управління частотою, забезпечуючи ефективну роботу навіть у змінних та невизначених умовах.

Алгоритми ПІД-регулювання зазвичай використовуються для управління параметрами конвеєра через зворотний зв'язок, наприклад, для підтримки постійної швидкості. Ці алгоритми є простими у використанні та можуть бути налаштовані для досягнення оптимальної продуктивності.

Оптимальне управління за допомогою передових методів математичної оптимізації дозволяє використовувати оптимальні алгоритми керування для визначення найкращої стратегії управління перетворювачем частоти та оптимізації продуктивності або енергоефективності конвеєра.

Впровадження цих стратегій оптимізації дозволяє алгоритмам керування частотою поліпшувати продуктивність, енергоефективність та безпеку стрічкового конвеєра, а також забезпечувати його безперебійну роботу.

Ці стратегії оптимізації можуть сприяти покращенню продуктивності та енергоефективності електромеханічної системи, а також забезпечити плавний характер роботи стрічкового конвеєра.

2.3 Основні переваги частотно-регульованого електроприводу

Система управління частотно-регульованим приводом широко застосовується в електромеханічних системах стрічкових конвеєрів.

До основних функцій системи частотного керування відносять:

1. Контроль швидкості: Перетворювач частоти здатний регулювати швидкість електродвигуна, налаштовуючи частоту електричної енергії, що постачається на двигун. Це дозволяє точно контролювати швидкість стрічки відповідно до потоку матеріалів.

2. Плавний пуск: Перетворювач частоти може бути налаштований на поступовий запуск електродвигуна, що допомагає зменшити навантаження на двигун та інші компоненти конвеєра, сприяючи при цьому подовженню терміну служби обладнання.

3. Енергоефективність: Регулюючи швидкість двигуна приводу відповідно до вимог навантаження конвеєра, система може підвищити енергоефективність конвеєра.

4. Захист: Система надає захист від перенапруги, зниження рівня напруги, перевантажень по струму, перегріву та короткого замикання, забезпечуючи безпечну роботу конвеєра.

5. Контроль: Частотно-регульований привод може бути налаштований для моніторингу роботи електродвигуна та подавати сигнали тривоги або вимикати двигун у разі виявлення будь-яких проблем.

6. Сумісність: Він сумісний з різноманітними системами керування, такими як програмовані логічні контролери, системи віддаленого моніторингу, що можна використовувати для контролю та управління роботою конвеєра.

7. Масштабованість: Легко масштабується відповідно до різних типів вантажів, довжин та швидкостей конвеєра та інших вимог програми.

Використання системи управління частотно-регульованим приводом дозволяє оператору конвеєра регулювати швидкість конвеєрної стрічки згідно з потоком матеріалів, що підвищує ефективність та продуктивність конвеєра. Крім того, частотні електроприводи також сприяють зменшенню споживання енергії та подовженню терміну служби конвеєрного обладнання.

2.4 Вимоги до електромеханічної системи

Вагомим аспектом функціонування стрічкових конвеєрів, які використовуються для переміщення вантажів, є впроваджені системи автоматизації та управління. Ці системи призначені для спостереження, контролю та оптимізації роботи конвеєра, забезпечуючи ефективне та безпечне переміщення вантажу та мінімізуючи час простою. Декілька ключових систем автоматизації та контролю, які є важливими для стрічкових конвеєрів під час пересування вантажів, включають:

1. Системи керування двигуном: Вони використовуються для регулювання швидкості та крутного моменту приводного двигуна і можуть адаптуватися для регулювання швидкості стрічки відповідно до потоку матеріалів.

2. Вирівнювання та відстеження стрічки: Датчики та системи керування використовуються для контролю положення стрічки, гарантуючи її вирівняність, відсутність блукання та відсутність перекосу.

3. Системи безпеки: Вони включають кнопки аварійної зупинки, датчики та блокування для захисту працівників та забезпечення безпечної роботи конвеєрного механізму.

4. Контроль навантаження: Датчики навантаження контролюють вагу вантажу на стрічці, а системи керування регулюють швидкість або призупиняють конвеєр, якщо навантаження перевищує встановлену межу.

5. Моніторинг стану: Датчики використовуються для вимірювання температури, вібрації й інших параметрів конвеєра, а системи керування надсилають сигнали тривоги обслуговуючому персоналу у випадку виявлення проблем.

6. Дистанційний моніторинг і керування: Системи віддаленого моніторингу та управління дозволяють відслідковувати роботу конвеєра з центрального пункту та коригувати параметри для оптимізації продуктивності.

7. Автоматизоване сортування, перенаправлення та збирання вантажу: До додаткового обладнання входять роботизовані руки, системи сортування, перенаправлення та складання, які можуть бути інтегровані з конвеєром для ефективного сортування, перенаправлення та складання вантажу під час його переміщення вздовж конвеєра.

Всі ці системи автоматизації та управління взаємодіють для забезпечення ефективної та безпечної роботи стрічкового конвеєра, сприяючи оптимізації продуктивності, мінімізації часу простою та підвищенню загальної ефективності логістичного процесу.

Стрічкові конвеєри повинні бути оснащені спеціальними системами захисту для забезпечення безпеки та максимальної продуктивності. Серед цих систем входять датчики, які виявляють бічне зміщення стрічки та автоматично

вимикають конвеєр у випадку відхилення більше ніж на 10% від центру. Крім того, на конвеєрах встановлені пристрої для запобігання переборювання в точках перевантаження та системи уловлювання лінії навантаження стрічки у випадку її розриву, а також для контролю цілісності кабельних муфт.

Додаткове обладнання також охоплює захисні пристрої, які автоматично відключають конвеєр при перевищенні рівня матеріалу, а також пристрої для відключення приводу конвеєра, гальмівні механізми та системи пожежогасіння. Обладнання для автоматичного чи дистанційного управління повинне включати функції, такі як установка номінальної швидкості стрічки кожного конвеєра в лінії, автоматичне вимкнення всіх конвеєрів при зупинці хоча б одного, а також унеможливлення дистанційного повторного запуску непрацюючого конвеєра з різних причин, таких як тривалий запуск або перевищення номінальної швидкості.

До інших функцій відносять локальне блокування, системи зв'язку, дотримання вимог щодо трубопроводу пожежогасіння, блокування запуску конвеєра при відсутності огорожі, а також автоматичне відключення завантажувального пристрою, якщо він подає вантаж на зупинений конвеєр.

2.5 Вимоги до електроприводу

Електропривод є необхідним компонентом стрічкового конвеєра, який використовується для переміщення вантажів. Цей привід відповідає за рух стрічки та обертання головного барабану, що в свою чергу приводить в рух конвеєрну стрічку. Нижче перераховані ключові вимоги до електроприводу стрічкових конвеєрів під час переміщення:

1. Номінальна потужність: Потужність електроприводу повинна бути обрана з урахуванням вимог до навантаження конвеєра та швидкості руху

стрічки. Для великих навантажень або вищих швидкостей може знадобитися більш потужний приводний двигун.

2. Регулювання швидкості: Електричний привод повинен мати можливість регулювати швидкість стрічки згідно з потоком матеріалів. Це може бути досягнуто, наприклад, за допомогою частотно-регульованого приводу.

3. Контроль крутного моменту: Електропривод повинен мати здатність регулювати крутний момент стрічки відповідно до вимог навантаження конвеєра. Це може бути досягнуто за допомогою серводвигуна або привода з прямим приводом.

4. Функції безпеки: В електроприводі мають бути передбачені засоби безпеки, такі як захист від перевантажень, кнопки аварійної зупинки, датчики для захисту працівників і гарантування безпечної роботи конвеєра.

5. Технічне обслуговування: Електричний привод повинен бути легко обслуговуваним для забезпечення безперебійної роботи протягом тривалого періоду часу.

6. Енергоефективність: Електропривод повинен бути спроектований з огляду на енергоефективність для зменшення споживання електроенергії та експлуатаційних витрат конвеєра.

7. Сумісність: Електропривід повинен бути сумісним із системами керування та іншим автоматизованим обладнанням, яке використовується на конвеєрі.

8. Довговічність: Електричний привід повинен бути розроблений з урахуванням умов навколишнього середовища конвеєра, вібрації та ударів, які можуть виникнути під час його експлуатації.

Враховуючи ці критерії, електропривод може бути спроектований для ефективного живлення стрічкового конвеєра та забезпечення неперервної роботи під час процесу переміщення.

2.6 Визначення завдань дослідження

Для досягнення поставленої мети дослідження необхідно виконати наступні кроки:

1. Отримати функціональну схему електромеханічної системи стрічкового конвеєру, провести розрахунки та вибір її компонентів, а також розробити математичну модель системи.

2. Створити моделі у середовищі Matlab Simulink для дослідження енергетичних характеристик електромеханічної системи транспортного механізму.

3. Провести комплекс досліджень і на їх основі розробити рекомендації щодо проектування нових та модернізації існуючих механізмів безперервної дії.

2.7 Висновки за розділом

Після аналізу режимів роботи та конструктивних особливостей стрічкових конвеєрів, а також розгляду сучасних систем електроприводів, визначено використання електромеханічних систем із асинхронним електродвигуном із частотним керуванням як найбільш перспективний варіант.

Сформульовані вимоги до електроприводу конвеєра та електромеханічної системи в цілому.

Отримані результати дозволяють визначити та вибрати компоненти електромеханічної системи, а також розробити структуру системи управління.

РОЗДІЛ 3. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА, РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ

3.1 Функціональна схема електромеханічної системи конвеєра

Функціональну схему конвеєрного механізму з частотним перетворювачем, оптимальними регуляторами напруги та частоти, і конвеєрним механізмом може бути подана наступним чином:

Основою системи є перетворювач частоти, який постачає необхідну потужність та керуючі сигнали на двигун конвеєрного механізму. На цей перетворювач надходять керуючі сигнали від оптимальних регуляторів напруги та частоти.

Оптимальні регулятори відповідають за контроль напруги та частоти, що живлять двигун, з метою досягнення максимальної ефективності конвеєрної системи. Ці регулятори адаптуються до фактичного навантаження на конвеєр і регулюють напругу та частоту для забезпечення оптимальної ефективності двигуна.

Механізм конвеєра включає в себе приводний двигун та конвеєрну стрічку. Двигун керується перетворювачем частоти, який, в свою чергу, керується регуляторами оптимальної напруги та частоти. Конвеєрна стрічка транспортує матеріал з одного кінця системи в інший.

Функціональну схему системи керування можна побачити на рис. 3.1.

Позначення прийняті на рис. 3.1: ЗІ – задавач інтенсивності, РШ – регулятор швидкості, ОРЧ, ОРЧ – оптимальний регулятор і напруги, відповідно, K_{ω} – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю, ПП – перетворювальний пристрій, ВО – виконавчий орган, ОК – об'єкт керування.

ЗІ формує траєкторію, після надходження сигналу зворотного зв'язку за швидкістю, отримуємо результуюче значення швидкості, яке визначає траєкторію напруги та частоти, після проходження через оптимальні регулятори отримуємо відповідні значення напруги U та частоту f , що

подаються на статор двигуна. У результаті утворене магнітне поле статор визначає швидкість і момент двигуна, що передається на приводний барабан і приводить у рух стрічку.

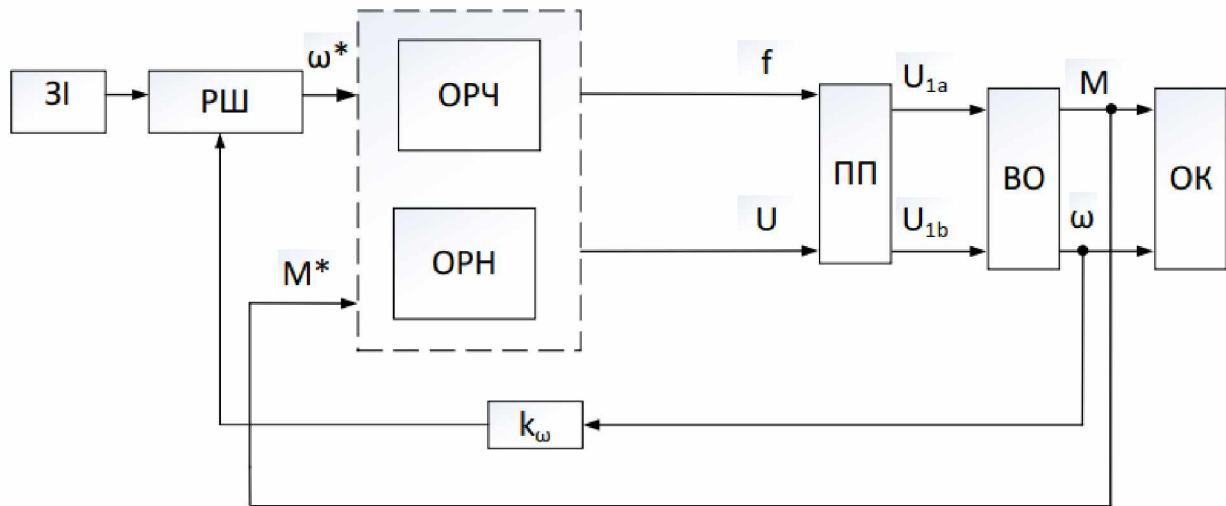


Рисунок 3.1 – Функціональна схема системи керування

Управління всією системою відбувається центральним блоком керування, що отримує сигнали зворотного зв'язку щодо швидкості та моменту.

Розроблений алгоритм має кілька варіантів управління, які використовуються в залежності від конфігурації. Зокрема, передбачено сценарії, коли керування здійснюється по окремим каналам без взаємозв'язку між частотою і напругою, або коли для певного значення моменту визначаються оптимальні параметри напруги і частоти. Крім того, система може автоматично коригувати оптимальні значення напруги та частоти при зміні моменту навантаження, забезпечуючи оптимальні умови для конкретного режиму.

3.2 Тяговий розрахунок конвеєра

На рисунку 3.2 приведена розрахункова схема стрічкового конвеєра.

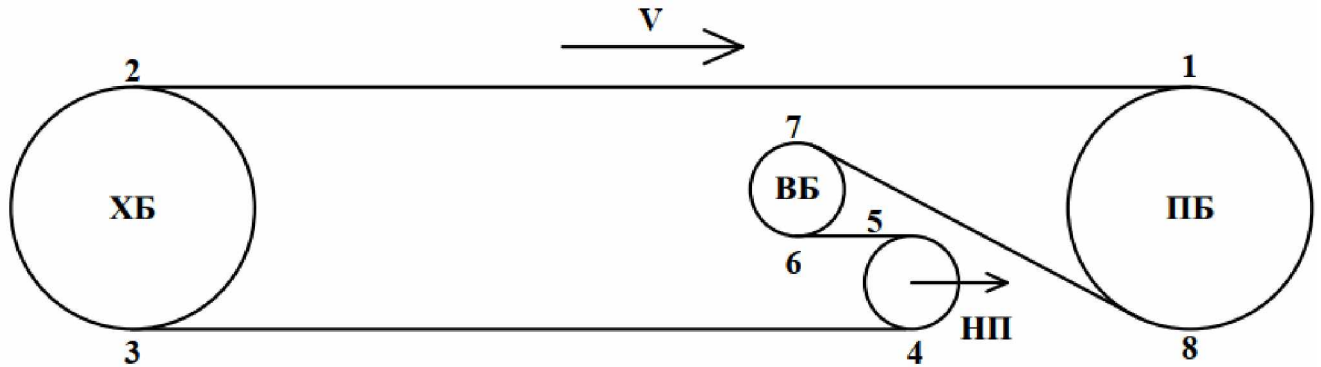


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема стрічкового конвеєра

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку

Продуктивність, Q , $t/год$		650
Довжина ділянки	$l_{1-2}, м$	780
	$l_{3-4}, м$	650
	$l_{5-6}, м$	25
	$l_{7-8}, м$	180
Кут повороту	$\beta_{1-2}, ^\circ$	0
	$\beta_{3-4}, ^\circ$	0
	$\beta_{5-6}, ^\circ$	0
	$\beta_{7-8}, ^\circ$	30

Визначимо вагу вантажу на 1 м стрічки за заданою продуктивністю[2]:

$$m_e = \frac{Q}{3600 \cdot v} = \frac{650}{3600 \cdot 1.5} = 120.4 \text{ кг / м.}$$

Вага різних відповідних ділянок конвеєра:

– ділянка 1–2:

$$m_{1-2} = (m_0 + m_6) \cdot l_{1-2} = (26 + 120,4) \cdot 780 = 114169 \text{ кг}.$$

– ділянка 3–4:

$$m_{3-4} = m_0 \cdot l_{3-4} = 26 \cdot 650 = 16,9 \cdot 10^3 \text{ кг}.$$

– ділянка 5–6:

$$m_{5-6} = m_0 \cdot l_{5-6} = 26 \cdot 25 = 650 \text{ кг}.$$

– ділянка 7–8:

$$m_{7-8} = m_0 \cdot l_{7-8} = 26 \cdot 180 = 4,68 \cdot 10^3 \text{ кг}.$$

Сумарне значення приведеної до точки набігання на приводний барабан ваги:

$$m_{\Sigma} = m_{1-2} + m_{3-4} \cdot k_{u1} + m_{5-6} \cdot k_{u1}^2 + m_{7-8} \cdot k_{u1}^3 = 114169 + 16900 + 650 + 4680 = 137712 \text{ кг}.$$

Знайдемо сили опору прямолінійних ділянок конвеєру:

– ділянка 1–2:

$$\Delta F_{1-2} = g \cdot m_{1-2} \cdot (C_n \cdot \cos(\beta_{1-2}) + \sin(\beta_{1-2})) =$$

$$= 9.81 \cdot 114169 \cdot (0.006 \cdot \cos(0) + \sin(0)) = 6720 \text{ H}$$

– ділянка 3–4:

$$\begin{aligned} \Delta F_{3-4} &= g \cdot m_{3-4} \cdot (C_n \cdot \cos(\beta_{3-4}) + \sin(\beta_{3-4})) = \\ &= 9.81 \cdot 16900 \cdot (0.006 \cdot \cos(0) + \sin(0)) = 994,7 \text{ H} \end{aligned}$$

– ділянка 5–6:

$$\begin{aligned} \Delta F_{5-6} &= g \cdot m_{5-6} \cdot (C_n \cdot \cos(\beta_{5-6}) + \sin(\beta_{5-6})) = \\ &= 9.81 \cdot 650 \cdot (0.006 \cdot \cos(0) + \sin(0)) = 38,3 \text{ H} \end{aligned}$$

– ділянка 7–8:

$$\begin{aligned} \Delta F_{7-8} &= g \cdot m_{7-8} \cdot (C_n \cdot \cos(\beta_{7-8}) + \sin(\beta_{7-8})) = \\ &= 9.81 \cdot 4680 \cdot (0.006 \cdot \cos(30^\circ) + \sin 30^\circ) = 23194 \text{ H} \end{aligned}$$

Загальна сила опору:

$$\Delta F_{\Sigma} = \Delta F_{1-2} + \Delta F_{3-4} + \Delta F_{5-6} + \Delta F_{7-8} = 6720 + 994.7 + 38.3 + 23194 = 30947 \text{ H}$$

Мінімальний необхідний натяг стрічки при збіганні з приводного барабана для роботи без проковзування:

$$T_{\text{зб min}} = \frac{\Delta F_{\Sigma} + m_{\Sigma} \cdot a_{\text{дон}}}{e^{\mu \cdot \alpha} - k_{u1}^3} = \frac{30947 + 137712}{e^{0,2 \cdot 3,66} - 1,04^3} = 61286 \text{ H}$$

Для компенсації припущень $T_{зб}$ беремо з запасом

$$T_{зб} = 1,1 \cdot T_{зб \min} = 1,1 \cdot 61286 = 67414 \text{ Н}$$

Визначимо найменший натяг у точці 8:

$$\begin{aligned} T_8 &= (T_{зб} + \Delta F_{1-2}) \cdot k_{u1} + \Delta F_{7-8} = \\ &= (67414 + 6720) \cdot 1,04 + 23194 = 100294 \text{ Н} \end{aligned}$$

Вантаж, що створює такий натяг:

$$G_{нв} = 2 \cdot T_8 = 2 \cdot 100294 = 200587 \text{ Н}$$

Найбільший натяг в точці набігу на приводний барабан:

$$T_{нб} = k_{u1} \cdot T_{зб} + \Delta F_{\Sigma} + m_{\Sigma} \cdot a_{дон} = 1,04 \cdot 67414 + 30950 + 137712 \cdot 0, = 128600 \text{ Н}$$

Визначимо потужність приводного двигуна конвеєру:

$$P_c = k_z \cdot \frac{(T_{нб} - T_{зб})v}{\eta_p} = 1,2 \cdot \frac{(128600 - 67414) \cdot 1,5}{0,85} = 129,6 \text{ кВт}$$

Визначимо натяги в усіх точках набігу та збігу з барабанів і побудуємо відповідну діаграму:

— точка 8:

$$T_8 = T_{зб} = 67474 \text{ Н}$$

— точка 7:

$$T_7 = T_8 + \Delta F_{7-8} = 67414 + 23194 = 90608 \text{ H}$$

— точка 6:

$$T_6 = T_7 \cdot k_{u1} = 90608 \cdot 1,04 = 94233 \text{ H}$$

— точка 5:

$$T_5 = T_6 + \Delta F_{5-6} = 94233 + 38 = 94271 \text{ H}$$

— точка 4:

$$T_4 = T_5 \cdot k_{u1} = 94271 \cdot 1,04 = 98042 \text{ H}$$

— точка 3:

$$T_3 = T_4 + \Delta F_{3-4} = 98042 + 994,7 = 99037 \text{ H}$$

— точка 2:

$$T_2 = T_3 \cdot k_{u1} = 99037 \cdot 1,04 = 102998 \text{ H}$$

— точка 1:

$$T_1 = T_2 + \Delta F_{1-2} = 102998 + 6720 = 109718 \text{ H}$$

Діаграма натягу в замкнутому контурі стрічкового конвеєру зображена на рис 3.3.

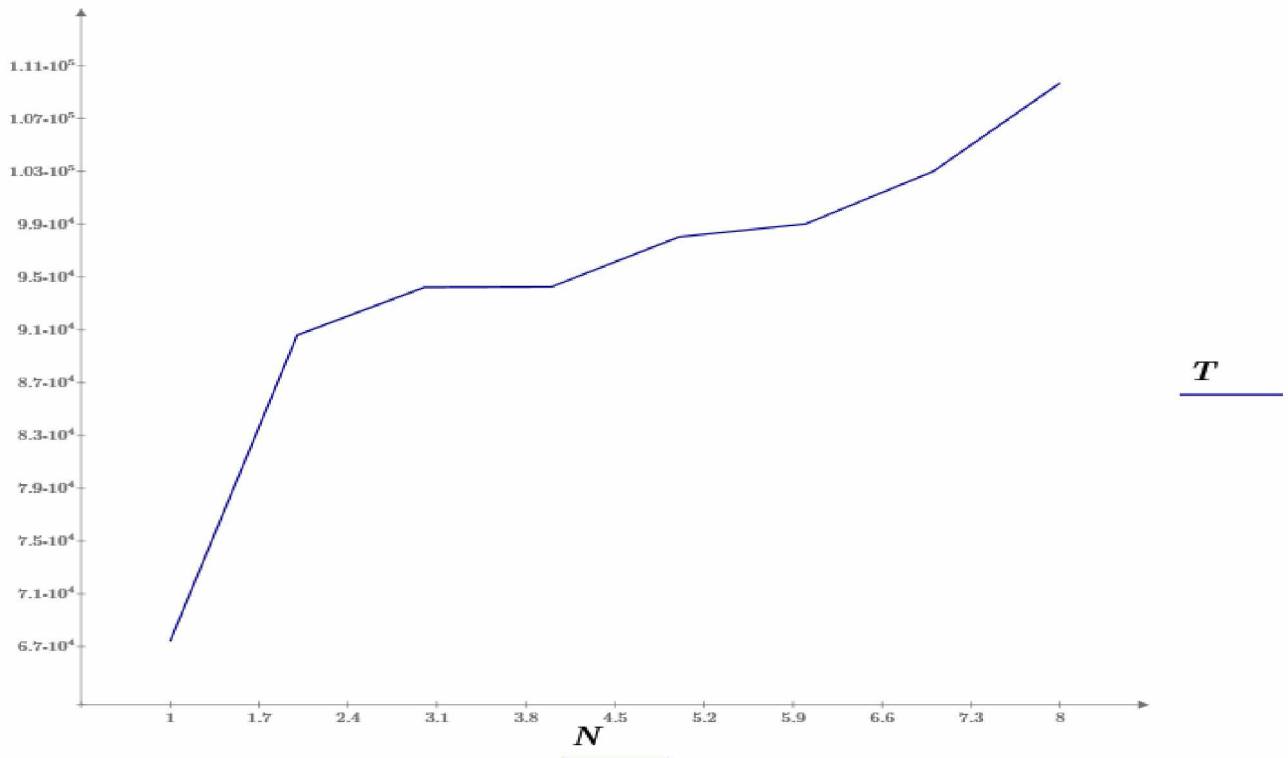


Рисунок 3.3 – Діаграма натягу вздовж замкненого контуру конвеєру

3.3 Вибір двигуна та редуктора електроприводу стрічкового конвеєру

Виходячи з розрахованої потужності в п.2.3 обираємо асинхронний двигун 4A280M4У3[7] потужністю 132 кВт та синхронною частотою обертання $n_0 = 1500 \text{ об / хв.}$

Діаметр барабану $D = 0,63 \text{ м.}$

Частота обертання барабану:

$$n_{\sigma} = \frac{v \cdot 60}{\pi D} = \frac{1,5 \cdot 60}{3,14 \cdot 0,63} = 45,5 \text{ об / хв}$$

Попереднє визначене передатне число редуктора:

$$i = \frac{n_{\partial}}{n_{\sigma}} = \frac{1466}{45,5} = 32,2$$

де $n_{\partial} = n_0 \cdot (1 - s_n) = 1500 \cdot (1 - 0,023) = 1466 \text{ об / хв}$ – номінальна частота обертання двигуна.

Обираємо редуктор від виробника JIE HOLDING GROUP модель JRHH3. Параметри редуктора: $i_p = 31,5$; $\eta_p = 0.85$. Загальний вигляд представлений на рис. 3.4.

Уточнене значення швидкості руху стрічки:

$$v = \pi \cdot D \cdot \frac{n_{\sigma}}{60} = 3,14 \cdot 0,63 \cdot \frac{46,5}{60} = 1,54 \text{ м / с},$$

де $n_{\sigma} = \frac{n_{\partial}}{i_p} = \frac{1466}{31,5} = 46,5 \text{ об / хв}$ – частота обертання валу приводного барабану.

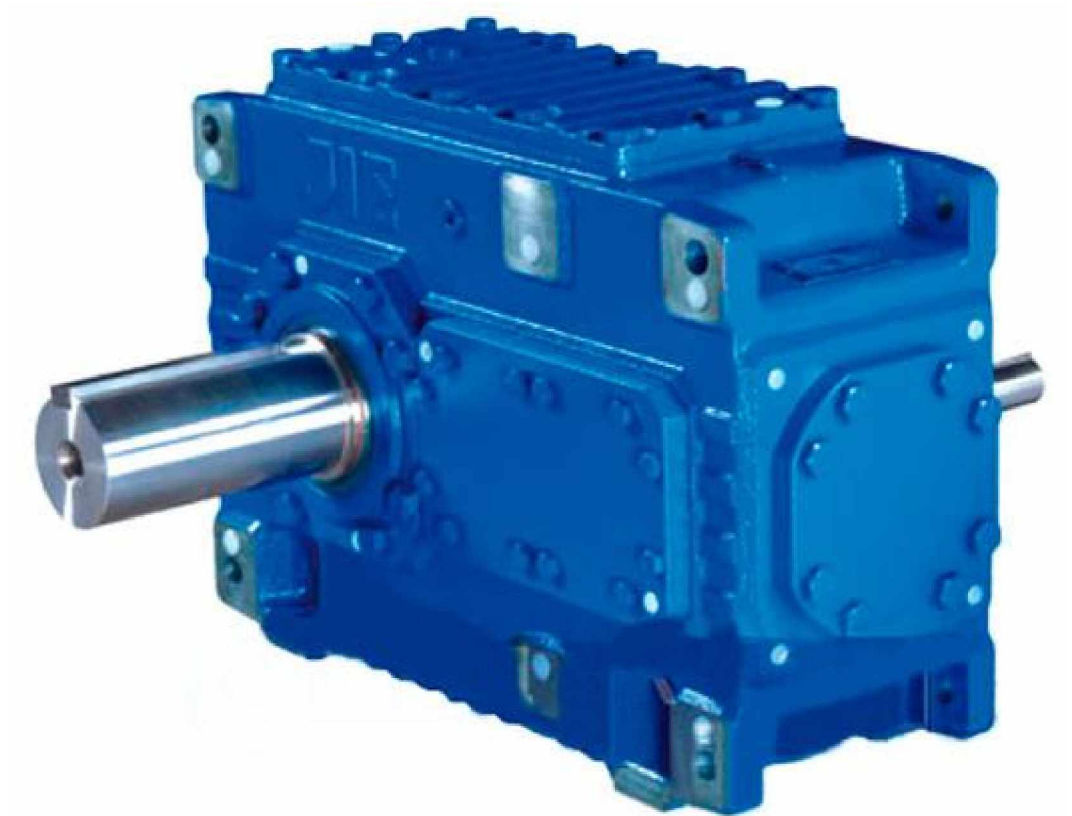


Рисунок 3.4 – Загальний вигляд редуктора JRNH3

Момент навантаження на валу барабана:

$$M_c = \frac{(T_{нб} - T_{зб}) \cdot D}{2 \cdot \eta_p} = \frac{(128600 - 67414) \cdot 0.63}{2 \cdot 0,85} = 22675 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Приведений момент навантаження до валу:

$$M_{c.прив} = \frac{M_c}{i_p} = \frac{22675}{31,5} = 719,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Приведений момент інерції механічної частини:

$$J_{\Sigma прив} = \frac{m_{\Sigma} \cdot D^2}{i_p^2 \cdot 4} = \frac{137712 \cdot 0.63^2}{31.5^2 \cdot 4} = 13.77 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Кутове прискорення барабана:

$$\varepsilon_{\delta} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\delta} \cdot a_{\delta \text{don}}}{v \cdot 60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 46,5 \cdot 0,2}{1,54 \cdot 60} = 0,635 \text{ рад} / \text{с}^2$$

Прискорення барабана приведені до двигуна:

$$\varepsilon_{\text{прив}} = \varepsilon_{\delta} \cdot i_p = 0,635 \cdot 31,5 = 20 \text{ рад} / \text{с}^2$$

Найбільший момент двигуна:

$$M_{\text{max}} = M_{\text{с.прив}} + J_{\Sigma \text{прив}} \cdot \varepsilon_{\delta} = 719,8 + 13,77 \cdot 20 = 995,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Перевірка двигуна за перевантажувальною здатністю:

$$M_{\text{max}} < \lambda_{\kappa} \cdot M_n$$

$$995,3 < 1720$$

Двигун відповідає вимогам за перевантажувальною здатністю.

Таблиця 3.2 – Параметри двигуна

Назва	4A280M4Y3
Потужність, кВт	132
Частота обертання поля статора, об/хв	1500
Частота обертання валу двигуна, об/хв	1466
Напруга живлення, В	380
Номінальний струм, А	239,6
ККД, %	93
Коефіцієнт потужності	0,9
Перевантажувальна здатність	2
Момент інерції, кг • м ²	2,5
Номінальний момент, Нм	860
Параметри Г-подібної схеми заміщення	
Активний опір обмотки статора, $R_1', Ом$	0,021
Індуктивний опір розсіювання статора, $X_1', Ом$	0,115
Активний опір обмотки ротора, $R_2'', Ом$	0,018
Індуктивний опір розсіювання ротора, $X_2'', Ом$	0,15
Взаємний індуктивний опір, $X_\mu, Ом$	4,5

3.4 Розрахунок параметрів двигуна

Паспортні дані та параметри Г-подібної схеми наведені в таблиці 3.2. За паспортними даними визначимо деякі необхідні в подальшому величини.

Номінальна фазна напруга:

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219.4 \text{ В}$$

Номінальний струм статора:

$$I_{1\phi} = \frac{P_{2\text{н}}}{3 \cdot U_{\phi} \cdot \eta_{\text{н}} \cdot \cos \varphi} = \frac{132 \cdot 10^3}{3 \cdot 219 \cdot 0.93 \cdot 0.9} = 239.6 \text{ А}$$

Кутова швидкість струму статора:

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314.16 \text{ рад / с}$$

Синхронна кутова швидкість ротора (ідеальний холостий хід):

$$\omega_0 = \frac{\omega_c}{p_n} = \frac{314.16}{2} = 157.1 \text{ рад / с}$$

Номінальна кутова швидкість ротора

$$\omega_{\text{н}} = \omega_0 \cdot (1 - s_{\text{н}}) = 157.1 \cdot (1 - 0.023) = 153.5 \text{ рад / с}$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{132 \cdot 10^3}{153,5} = 860,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для розробки системи керування електроприводу використовують Т-подібну схему заміщення асинхронного двигуна. Для переведення параметрів від Г- до Т-подібної схеми існує методика, за якою проведемо розрахунок нижче.[7,8]

Коефіцієнт переведення параметрів схеми:

$$c_1 = \frac{X_\mu + \sqrt{X_\mu^2 + 4 \cdot X_1' \cdot X_\mu}}{2 \cdot X_\mu} = \frac{4.5 + \sqrt{4.5^2 + 4 \cdot 0.115 \cdot 4.5}}{2 \cdot 4.5} = 1.025$$

Тоді визначимо параметри схеми:

- індуктивний опір розсіювання кола статора

$$X_1 = \frac{X_1' \cdot U_\phi}{c^2 \cdot I_\phi} = \frac{0,115 \cdot 219.4}{1,025^2 \cdot 239.6} = 100.2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

- активний опір статора

$$R_1 = \frac{R_1' \cdot U_\phi}{c \cdot I_\phi} = \frac{0,021 \cdot 219.4}{1,025 \cdot 239.6} = 18.76 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

- індуктивний опір розсіювання кола статора

$$X_2 = \frac{X_2'' \cdot U_\phi}{c^2 \cdot I_\phi} = \frac{0,15 \cdot 219.4}{1,025^2 \cdot 239.6} = 130.7 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

- активний опір ротора

$$R_2 = \frac{R_2'' \cdot U_\phi}{c \cdot I_\phi} = \frac{0,018 \cdot 219.4}{1,025 \cdot 239.6} = 16.1 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

- індуктивний опір між фазою статора і фазою ротора

$$X_m = X_\mu \cdot \frac{U_\mu}{I_\mu} = 4,5 \cdot \frac{219.4}{239.6} = 4.1 \text{ Ом}$$

- індуктивність розсіювання статора

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{\omega_c} = \frac{100.2 \cdot 10^{-3}}{314} = 0,319 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

- індуктивність розсіювання ротора

–

$$L_{2\sigma} = \frac{X_2}{\omega_c} = \frac{130.7 \cdot 10^{-3}}{314} = 0.42 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

- взаємна індуктивність

$$L_m = \frac{X_m}{\omega_c} = \frac{4.12}{314} = 13.1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

- повна індуктивність кола статора

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 13.1 \cdot 10^{-3} + 0.32 \cdot 10^{-3} = 13.4 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

– повна індуктивність кола ротора

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 13.1 \cdot 10^{-3} + 0.42 \cdot 10^{-3} = 13.5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

3.5 Вибір перетворювача частоти

При виборі перетворювача в першу чергу орієнтуємося на значення номінального струму. Обираємо із запасом на режими перевантаження. Після цього перевіряємо потужність.

Обираємо перетворювач Schneider Electric Altivar 71 160 кВт 3-фаз. - ATV71HC16N4 з параметрами:

Номінальний струм: $I_n = 314 \text{ А}$.

Номінальна потужність: $P_n = 160 \text{ кВт}$

Номінальна напруга: $U_n = 380 \text{ В}$

3.6 Математична модель асинхронного двигуна

Математична модель асинхронного двигуна виражає поведінку даного двигуна через набір рівнянь, які встановлюють зв'язок між електричними входами двигуна та його механічними вихідними сигналами. Ця модель використовується для симуляції функціонування двигуна в різних умовах і для розробки систем управління двигуном.

Двофазна форма моделі (див. рис. 3.5) базується на припущенні, що електродвигун працює при фіксованій частоті, а величина потоку статора є постійною. Це передбачення означає, що модель не передбачає врахування

впливу змінної частоти та величини потоку на функціонування двигуна. Зазвичай модель включає в себе рівняння для струмів статора та ротора, а також електромагнітного крутного моменту, що генерується двигуном. Струм статора визначається прикладеною до двигуна напругою, струмом ротора та повним опором обмоток двигуна.

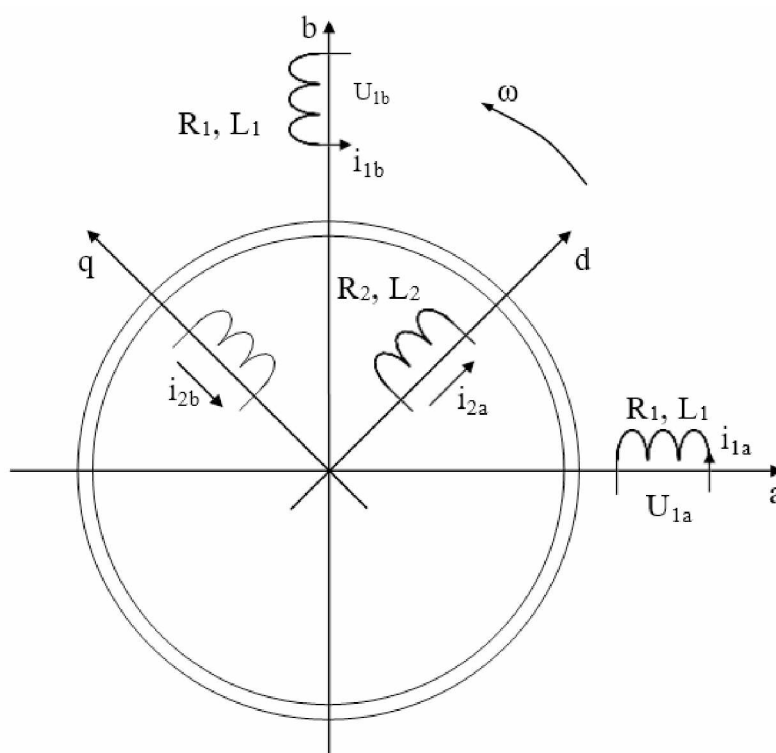


Рисунок 3.5 – Двофазна модель узагальненої машини

Струм ротора формується через електромагнітний момент і механічне навантаження, яке діє на ротор. Електромагнітний крутний момент визначається струмами статора і ротора, а також магнітним полем, що генерується самим двигуном.

У динамічній моделі асинхронного двигуна в двофазній формі [1,6] цей процес можна виразити наступним чином:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega, \\ \dot{\omega} = \frac{1}{J}(M - M_c), \\ M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_1} p_n (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}), \\ \dot{i}_{1a} = -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta p_n \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a}, \\ \dot{i}_{1b} = -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta p_n \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b}, \\ \dot{\psi}_{2a} = -\alpha \psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \\ \dot{\psi}_{2b} = -\alpha \psi_{2b} + p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}. \end{cases}$$

де u_{1a}, u_{1b} – проєкції вектора напруги статора на осі a і b ;

i_{1a}, i_{1b} – проєкція вектора струму статора на осі a і b ;

ψ_{2a}, ψ_{2b} – проєкція вектора потокозчеплення ротора на осі a, b .

Виходом системи рівнянь є момент двигуна, тоді як кутова швидкість ротора виступає незалежною змінною. Виразу для напруги живлення статора записуються у вигляді:

$$\begin{aligned} u_{1a} &= U \cdot \cos(\omega_0 t), \\ u_{1b} &= U \cdot \cos(\omega_0 t). \end{aligned}$$

Модель можна використовувати для симуляції роботи двигуна при різних умовах експлуатації конвеєра, серед них зміна моменту навантаження або зміна швидкості. Також її можна використовувати для розробки систем управління двигуном, наприклад, для регулювання швидкості чи крутного моменту. На основі отриманих рівнянь була створена математична модель в середовищі Matlab, яку можна бачити на рисунку 3.6.

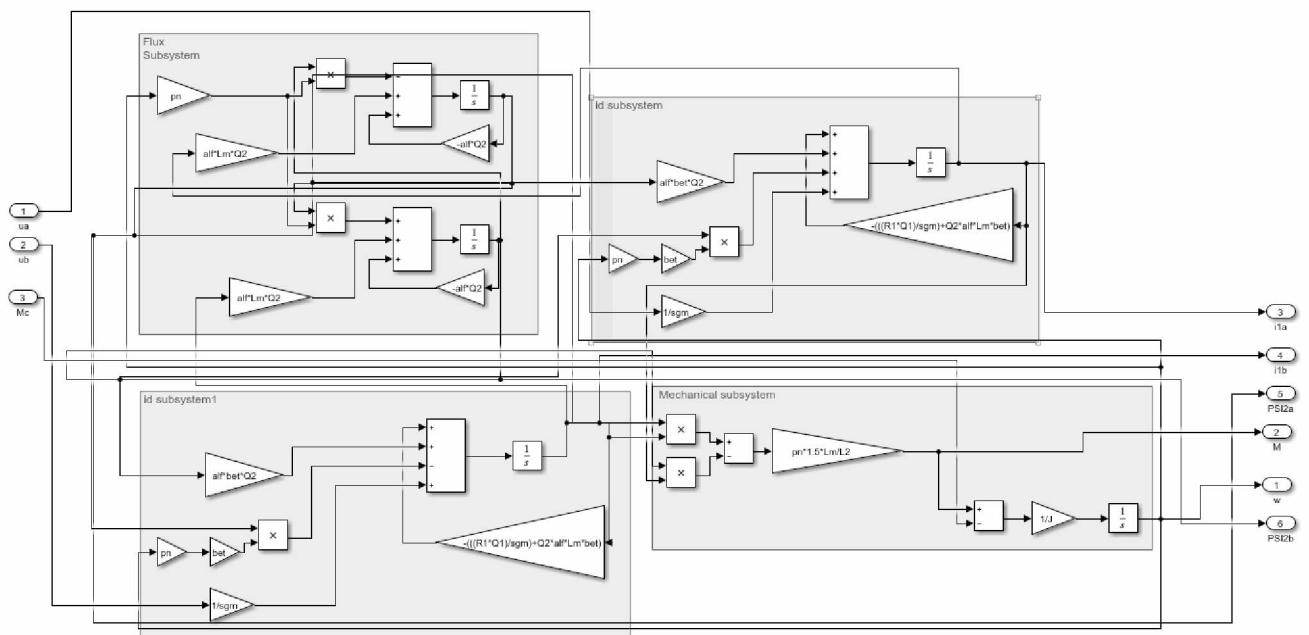


Рисунок 3.6 – Модель асинхронного двигуна

3.7 Математична модель перетворювача частоти та синтез регулятора швидкості

Принцип частотного керування асинхронним двигуном, розроблений Костенко М. П., представляє собою простий метод управління двигуном з короткозамкненим ротором, що вважався основним до виникнення векторних методів[1]. Налаштування цього алгоритму є ключовим аспектом управління електродвигунами в різних областях застосувань, включаючи конвеєрні системи.

Пропорційне керування – це вид регулювання частоти, при якому швидкість двигуна пропорційна частоті поданої напруги. Іншими словами, швидкість двигуна прямо пропорційна частоті поданої напруги, що означає, що при збільшенні частоти напруги двигун буде працювати швидше, а при

зниженні – повільніше. Пропорційне керування просте у впровадженні та може бути ефективним у багатьох сценаріях, де навантаження є сталим.

Квадратичне керування – це інший вид регулювання частоти, де швидкість двигуна пропорційна квадрату частоти поданої напруги. Це означає, що швидкість двигуна зростає швидше при збільшенні частоти напруги. Квадратичне керування часто використовується в сценаріях, де навантаження з часом змінюється, і воно забезпечує краще регулювання швидкості, відносно пропорційного керування.

Нелінійне керування – це підхід до регулювання частоти, що для визначення оптимальних параметрів частоти і напруги для двигуна використовує складну математичну модель в залежності від умов навантаження. Нелінійне регулювання є найбільш вдосконалим, проте воно є найскладнішим та найвитратнішим в реалізації.

Частотне керування, хоча й не надає можливості точного регулювання координат електропривода з визначеними динамічними та статичними характеристиками, має кілька важливих переваг: простота впровадження та запуску в роботу, відсутність потреби у вимірюванні кутової швидкості та струмів статора, а також можливість використання параметрів, які легко визначаються або користуються лише номінальними даними. Згідно класичного формулювання частотне керування ґрунтується на залежностях, що отримані з розгляду усталених режимів роботи асинхронного двигуна [1].

Напруга, яка подається на обмотки двигуна:

$$\begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0(t) & -\sin(\theta_0(t)) \\ \sin \theta_0(t) & \cos \theta_0(t) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \psi^* \\ \omega^* p_n \psi^* \end{pmatrix},$$

$$\dot{\theta}_0 = \omega^* p_n.$$

де ψ^* – задане постійне значення потокозчеплення; ω^* – задане постійне значення кутової швидкості.

За отриманими рівняннями створено математичну модель[3] в середовищі Matlab, що представлена на рисунку 3.7.

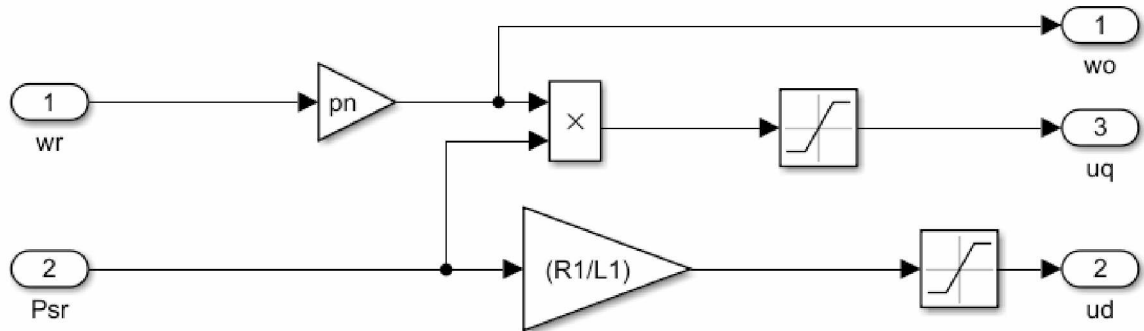


Рисунок 3.7 – Блок-схема математичної моделі перетворювача частоти

Для управління двигуном використовується регулятор швидкості, який забезпечує регулювання обертової швидкості двигуна (лінійної швидкості руху стрічки) за допомогою зміни вихідної частоти перетворювача. Синтез регулятора швидкості виконаний відповідно до методики [3].

Регулятор швидкості включає контур зворотного зв'язку, який вимірює фактичну швидкість двигуна і порівнює її з бажаною швидкістю, яка встановлена оператором. У випадку відхилення фактичної швидкості від бажаної, контролер виконує регулювання вихідної частоти для корекції швидкості. Зазвичай контролер використовує пропорційно-інтегрально-диференціальний (PID) алгоритм для забезпечення точного та стабільного управління швидкістю.

В результаті проміжних перетворень ми отримуємо вираз передавальної функції регулятора швидкості(РШ) (рис. 3.8) у наступному вигляді:

$$W_{psi}(p) = \frac{W_{baj}(p)}{W_{okw}(p)} = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)K_{\omega}} \cdot \frac{T_{\mu}p+1}{K_f} \cdot \frac{p_n}{2\pi} \cdot (T_mT_e p^2 + T_m p + 1) =$$

$$= \frac{T_mT_e p^2 + T_m p + 1}{2T_{\mu}K_f \frac{2\pi}{p_n} K_{\omega} p},$$

де $W_{\text{баз}}(p)$ – бажана передаточна функція розімкненої системи:

$$W_{\text{баз}}(p) = \frac{1 / K_{\omega}}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)},$$

$W_{\text{оки}}(p)$ – передаточна функція об'єкту контуру швидкості:

$$W_{\text{оки}}(p) = \frac{K_f}{T_{\mu}p + 1} \cdot \frac{2\pi}{p_n} \cdot \frac{1}{(T_{\mu}T_e p^2 + T_m p + 1)}.$$

Параметри алгоритму PID можуть бути налаштовані для оптимізації продуктивності контролера для різного типу навантажень двигуна та умов експлуатації.[8]

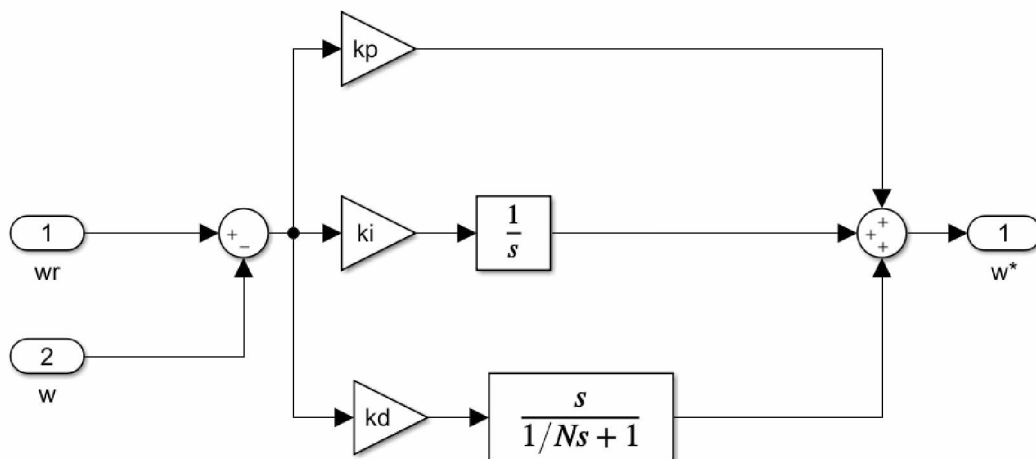


Рисунок 3.8 – Блок-схема математичної моделі РШ

3.8 Енергетична характеристика електромеханічної системи стрічкового конвеєру

Енергетичну діаграма асинхронного електродвигуна [1] приведено на рисунку 3.9

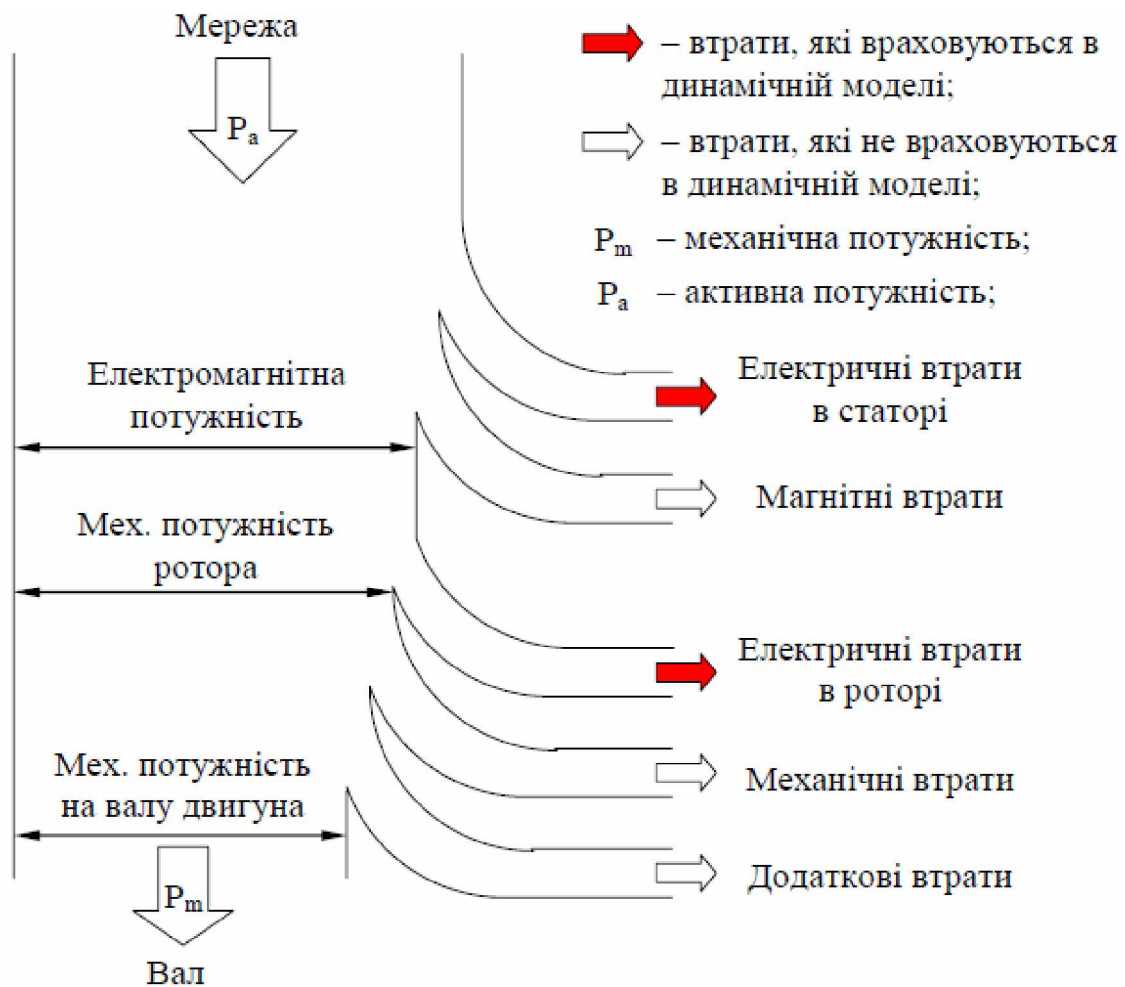


Рисунок 3.9 – Енергетична діаграма асинхронного двигуна

Енергетична діаграма дає уявлення про склад втрат потужності:

де P_{c1} – електричні втрати у статорі; P_{m1} – електричні втрати у статорі; P_{m2} – електричні втрати у роторі; $P_{магн}$ – магнітні втрати у роторі; $P_{мех}$ – втрати від тертя.

Як відомо [1, 6], всі втрати, що впливають на роботу електромеханічної системи діляться на три групи: P_m – втрати в міді, P_{mex} – механічні втрати, $P_{ст}$ – втрати в сталі.

Відповідно до методики [1], визначено рівняння для енергетичних характеристик електромеханічної системи.

Потужності P та P_1 пов'язані між собою через ККД η :

$$P_1 = 3 \cdot I_1 \cdot U_1 \cdot \cos \varphi = \frac{P}{\eta},$$

де U_1 – напруга статора; I_1 – струм статора двигуна.

Електричні втрати (втрати у міді) обумовлені нагріванням обмоток статора та ротора струмами. Їх величини залежать від навантаження двигуна та визначаються залежністю:

$$P_m = P_{m.n} \cdot M_c^* K_f^2 / K_u^2,$$

де $P_{m.n}$ – втрати у міді в номінальному режимі; M_c^* – коефіцієнт завантаженості; K_f – коефіцієнт регулювання частоти; K_u – коефіцієнт регулювання напруги.

Механічними втратами називають втрати на тертя у підшипниках і вентиляцію. Величина цих втрат наближено пропорційна квадрату частоти обертання ротора, і визначається як:

$$P_{mex} = P_{mex.n} K_f (1-s) / (1-s_n),$$

де $P_{mex.n}$ – номінальні механічні втрати; s – ковзання ротора двигуна; s_n – номінальне ковзання.

Втрати у сталі (магнітні втрати) зумовлені ефектом гістерезису та вихровими струмами у сталі статора та ротора. Їх величина залежить від магнітної індукції та частоти перемагнічування. Формула для визначення:

$$P_{ст} = P_{ст.н} (a + b \cdot K_f) K_u^2 / K_f,$$

де $P_{ст.н}$ – магнітні втрати в номінальному режимі; a – коефіцієнт, який враховує від втрат на гістерезис; b – коефіцієнт, який враховує втрати на вихрові струми.

Таким чином, сумарні втрати у асинхронному двигуні визначаються: за виразом

$$P_{\Sigma} = P_{ст} + P_{м} + P_{мех} = \frac{P_{ст.н} \cdot K_u^2 \cdot (a + b \cdot K_f)}{K_f} + \frac{P_{м.н} \cdot M_c^* K_f^2}{K_u^2} + \frac{P_{мех} \cdot K_f (1 - s)}{1 - s_n}.$$

Зробивши підстановку $P_{ст}, P_{м}, P_{мех}$ у попереднє рівняння і прийнявши ковзання $s = s_n M_c^* \cdot \frac{K_f}{K_u^2}$, виразимо ККД.

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{P_{\Sigma}}{P_1}} = \frac{1}{1 + \frac{1 - s_n}{P_n \cdot M_c^*} \cdot \left(\frac{\frac{P_{мех.н} \cdot K_f}{1 - s_n} \cdot (K_u^2 - s_n M_c K_f) + P_{ст.н} (a + b \cdot K_f) \frac{K_u^4}{K_f} + P_{м.н} \cdot M_c^{*2} \cdot K_f^2}{K_f \cdot (K_u^2 - s_n \cdot M_c^* \cdot K_f)} \right)},$$

де P_n – номінальна потужність двигуна,

$$M_c^* = \frac{M_c}{M_n} - \text{коефіцієнт залежності},$$

$$k_u = \frac{U}{U_n} - \text{коефіцієнт регулювання напруги},$$

$$k_f = \frac{f}{f_n} - \text{коефіцієнт регулювання частоти}.$$

Також необхідно враховувати вплив різноманітних параметрів системи, а саме: коефіцієнт потужності навантаження, опір навантаження, струм і напруга навантаження та опір системи. Проведений аналіз повинен охоплювати різні стратегії керування, що використовуються для регулювання напруги. Оптимальний регулятор повинен бути здатний мінімізувати втрати енергії, одночасно забезпечуючи стабільний рівень напруги.

Такий регулятор повинен також мати можливість оптимізувати коефіцієнт напруги системи та зменшувати загальні витрати на систему. Крім того, оптимальний регулятор має здатність знижувати ризик виникнення несправностей у лінії та підвищувати надійність системи.

Для оптимізації одного з енергетичних показників асинхронного двигуна необхідно визначити закони керування напругою. Вони мають тримати такі коефіцієнти: коефіцієнт регулювання напруги K_u , частоти живлення статора K_f , завантаженості M_c на оптимальних рівнях при зміні навантаження та частоти живлення.

Максимальне значення ККД досягається прирівнюючи до нуля першу похідну виразу для ККД по K_u .

Провівши деякі математичні перетворення отримують наступний вираз:

$$P_{ст.н} \cdot (a + b \cdot K_f) \cdot K_u^4 - 2 \cdot P_{ст.н} (a + b \cdot K_f) \cdot s_n \cdot M_c^* \cdot K_f \cdot K_u^2 - P_{м.н} \cdot M_c^{*2} \cdot K_f^3 = 0$$

Регулятор напруги забезпечує стабільний рівень напруги, незалежно від струму, який споживає пристрій. Його функціонування полягає у тому, щоб контролювати величину напруги, яка подається на статор, для утримання відповідного навантаження. Регулятор напруги враховує значення моменту відносно оптимальної точки, величину частотного коефіцієнта та втрати потужності з метою досягнення оптимальної ККД. Це дозволяє пристрою регулювати напругу відповідно до закону, щоб максимізувати ефективність, утримуючи напругу на необхідному рівні.

3.10 Математичний опис оптимального по енергоефективності регулятора системи керування за частотою

Використовуючи метод екстремуму, отримуємо рівняння математичної моделі для оптимального регулятора частоти, який максимізує енергетичну ефективність.

$$K_f = \sqrt[3]{(-q + \sqrt{D})} + \sqrt[3]{(-q - \sqrt{D})} - \frac{b}{3a},$$

де

$$D = q^3 + p^3,$$

$$q = \frac{2b^3 - 9abc + 27a^2b}{54a^3},$$

$$p = \frac{3ac - b^2}{9a},$$

$$a = 2 \cdot P_m M_c^2 K_u^4,$$

$$b = 2P_{cm} 3a s_n M_c K_u^2,$$

$$c = 2P_{cm} (3a s_n M_c K_u^2 - b K_u^4),$$

Розроблені математичні моделі компонентів електромеханічної системи; визначені закони та регулятори напруги та частоти для досягнення енергоефективності у системі керування конвеєром.

Складена модель в середовищі Matlab Simulink для вивчення статичних і динамічних режимів роботи транспортної системи.

Отримані результати надають можливість провести комплексний аналіз енергетичних характеристик конвеєра.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КОНВЕЄРА

4.1 Дослідження системи без врахування оптимального регулювання

Для подальшого вивчення рівня енергетичної ефективності системи керування проводиться аналіз ефективності та дослідження можливостей оптимізації електроенергетичних характеристик через розгляд класичної системи частотного керування. Результати зображено на рисунку 4.1 – 4.2.

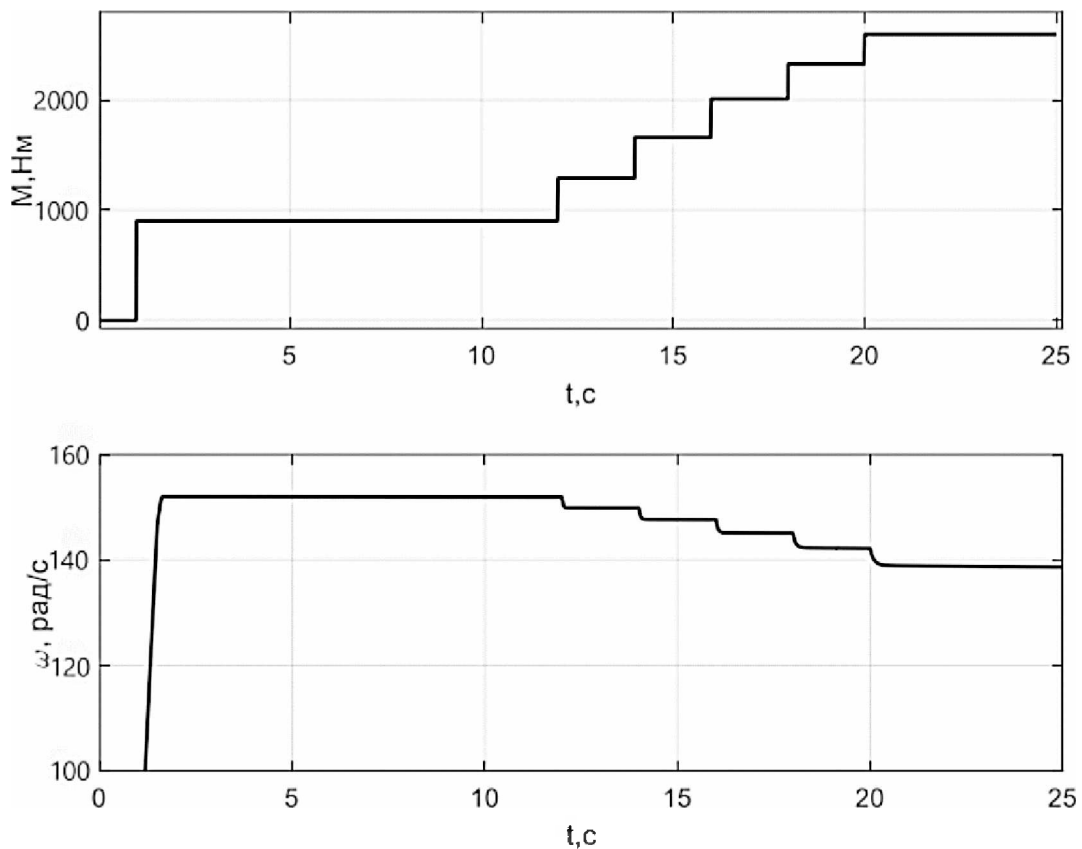


Рисунок 4.1 – Графіки механічних параметрів електромеханічної системи конвеєру при керуванні за законом U/f

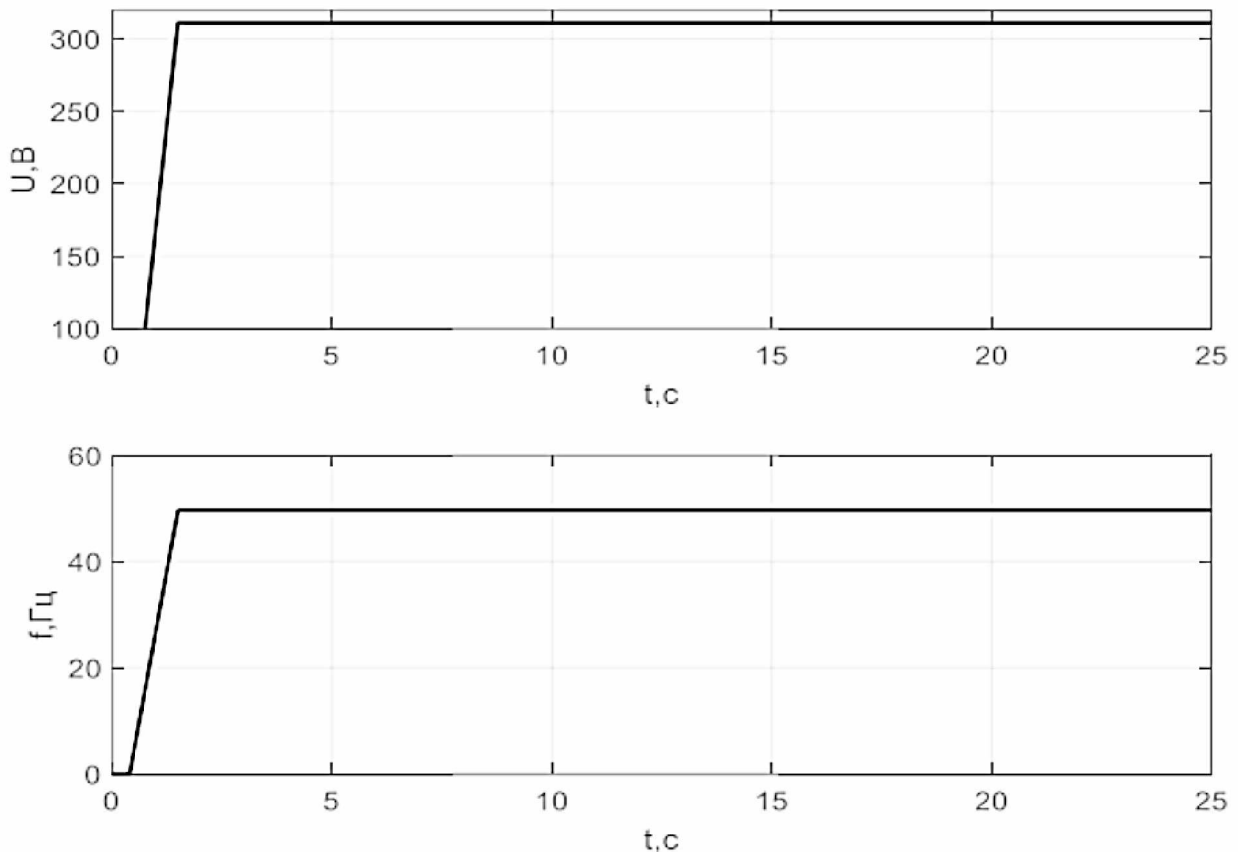


Рисунок 4.2 – Графіки електричних параметрів електромеханічної системи конвеєру при керуванні за законом U/f

Значення енергетичних показників при статичних режимах на стрічці зведені до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Енергетичні показники при керуванні за законом U/f

М, Нм	720	880	1040	1200	1360	1520
U, В	311	311	311	311	311	311
f, Гц	50	50	50	50	50	50
η	0.74	0.75	0.77	0.77	0.76	0.75

Результати приведені на рисунку 4.1– 4.2 відповідають класичній системі з перетворювачем частоти при керування по закону $U/f = \text{const}$. Коли навантаження на валу двигуна перевищує номінальне значення ККД двигуна, загальна ефективність під час циклу тримається на рівні 77%.

4.2 Дослідження системи при одночасному використанні оптимальних регуляторів частоти та напруги

Цей алгоритм враховує взаємозв'язок між напругою та частотою, враховуючи втрати, які виникають від рівня як напруги, так і частоти, на відміну від попереднього дослідження. Алгоритм має два режими: у першому режимі основним каналом є регулятор напруги в залежності від навантаження, а у другому варіанті основним виступає канал регулювання частоти в залежності від навантаження. Алгоритмом передбачено можливість налаштування для фіксованого та гнучкого навантаження.

Використання налаштування для фіксованого навантаження означає, що величина навантаження залишається незмінною протягом циклу.

Результати дослідження представлені на рисунку 4.3 – 4.4.

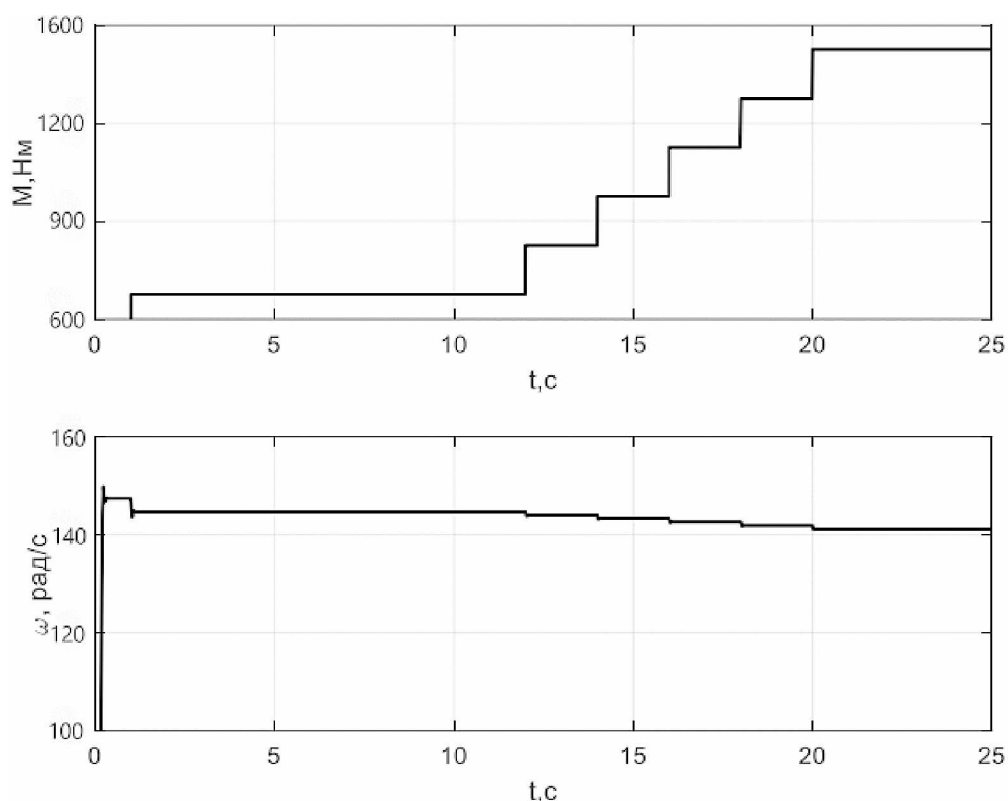


Рисунок 4.3 – Графік механічних параметрів електромеханічної системи конвеєра при налаштуванні регулятора на фіксоване навантаження

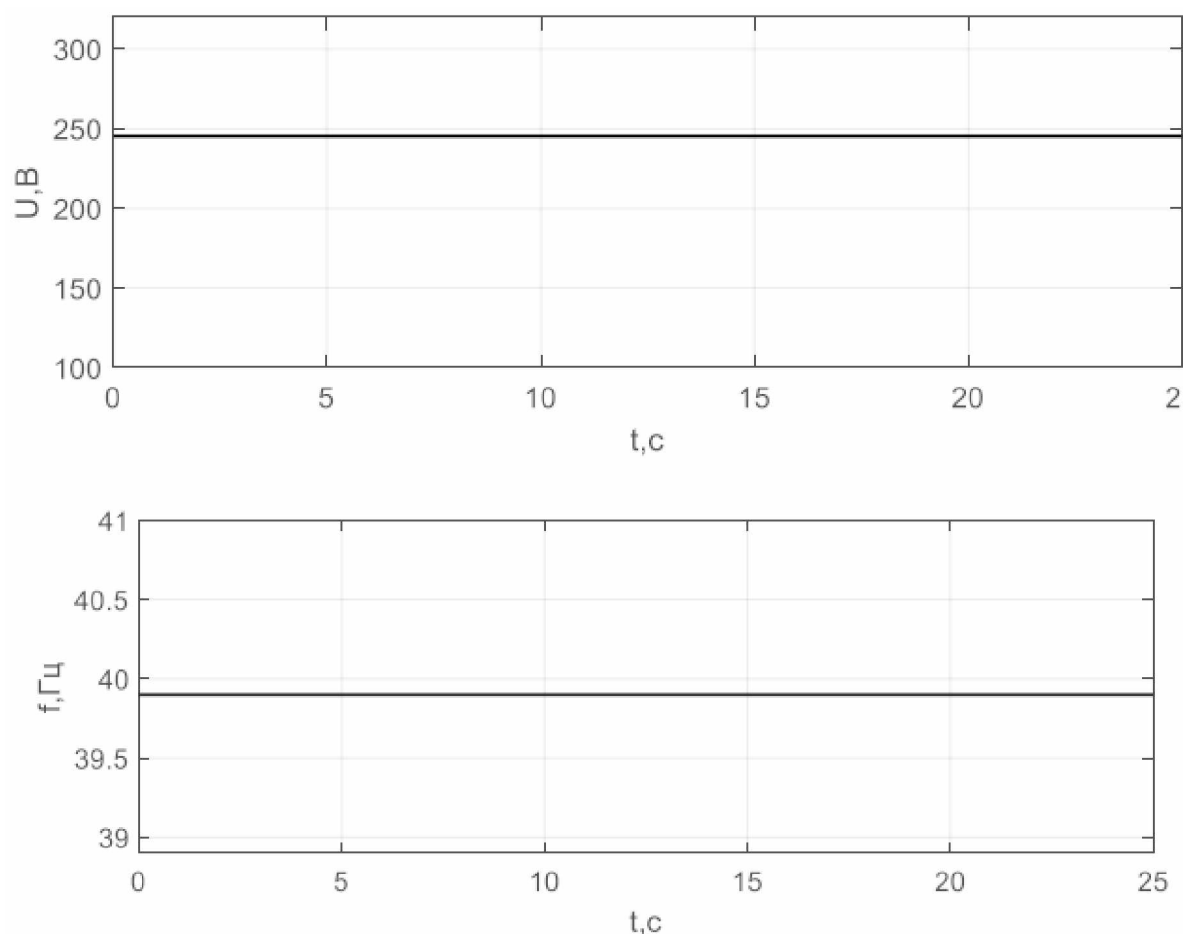


Рисунок 4.4 – Графік електричних параметрів електромеханічної системи конвеєра при налаштуванні регулятора на фіксоване навантаження

Результати дослідження алгоритму роботи зведені до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Показники системи при налаштуванні регулятора на фіксоване навантаження

М, Нм	720	880	1040	1200	1360	1520
U, В	249	249	249	249	249	249
f, Гц	40	40	40	40	40	40
η	0.8	0.84	0.85	0.85	0.8	0.74

З отриманих даних можемо побачити, що алгоритм налаштований на конкретне навантаження, яке встановлюється в залежності від структури навантажень протягом циклу. У цьому випадку систему керування

налаштовано на постійне навантаження в 1200 Нм, при цьому коефіцієнт корисної дії досягає максимального значення на рівні 85%. В результаті цього система протягом робочого циклу не витрачає енергію на перемагнічування, і, крім того, різниця між встановленим і реальним значеннями навантаження зменшує коефіцієнт корисної дії.

4.3 Дослідження та аналіз енергетичних показників при різних налаштуваннях системи керування

На основі проведеного дослідження виконується порівняльний аналіз систем керування, які використовують запропоновані оптимальні регулятори напруги.

Результати дослідження представлено на рисунку 4.5. таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Показники енергоефективності системи при фіксованому та гнучкому налаштуваннях оптимального регулятора

$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	Частотне керування	Оптимальний регулятор	
	$U / f = \text{const}$	$M_{\text{onm}} = \text{const}$	$M_{\text{onm}} = \text{var}$
720	0,8	0,78	0,8
880	0,74	0,82	0,84
1040	0,76	0,83	0,85
1200	0,76	0,85	0,85
1360	0,77	0,82	0,83
1520	0,76	0,75	0,76

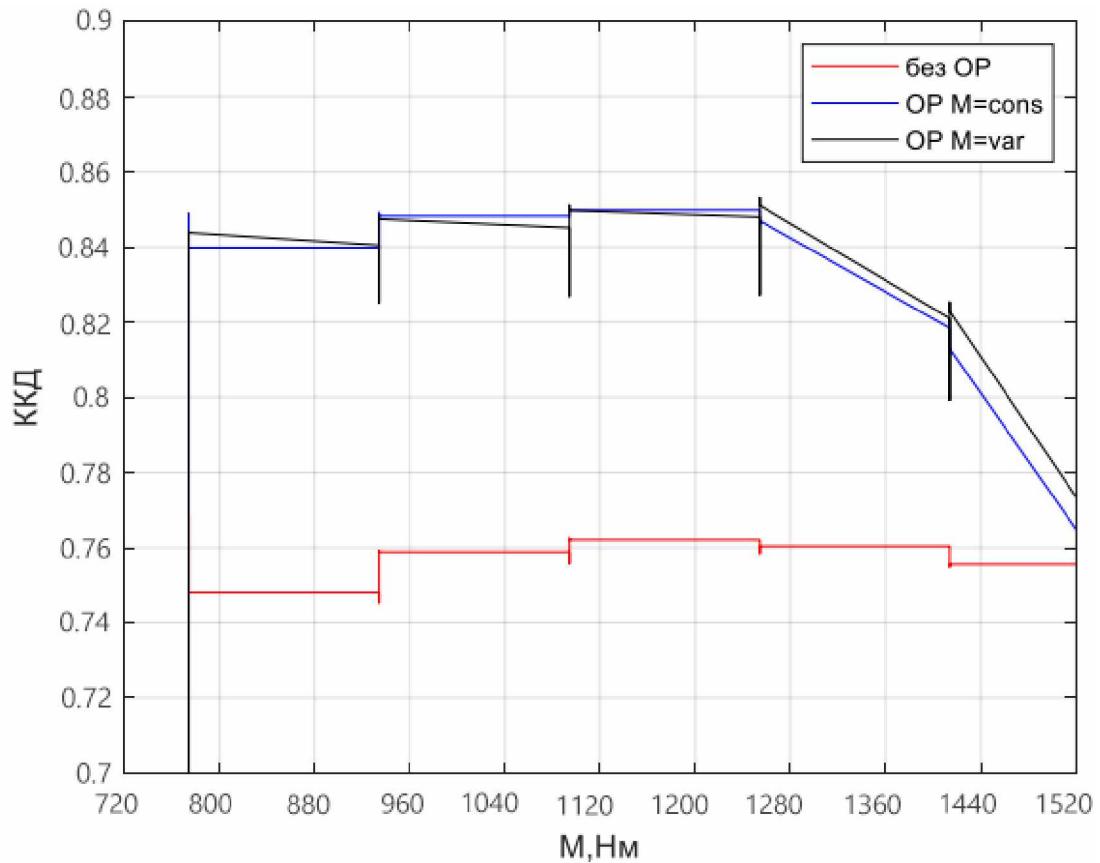


Рисунок 4.5 – Результати досліджень при керуванні регулятором напруги

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що в статичних режимах роботи при навантаженнях від 880 до 1360 Нм, ККД системи з гнучким налаштуванням становить від 84% до 85%, тоді як система з фіксованим значенням має ККД в діапазоні від 82% до 85%.

При величині навантаження 1200 Нм ККД ідентична, оскільки система налаштована на конкретне значення навантаження, але гнучкий алгоритм має точніше налаштування на значення навантаження, що призводить до зменшення втрат.

При перевищенні налаштованого значення навантаження коефіцієнт корисної дії обох варіантів налаштування знижується до 75-76%.

4.4 Висновки за розділом

Було проведено аналіз втрат на один робочий цикл для оцінки як статичних, так і динамічних режимів.

Для дослідження ефективності розроблених алгоритмів використовувався в якості точки відліку аналіз скалярного алгоритму частотного перетворювача. Далі був проаналізований алгоритм перетворювача частоти з двома незалежними каналами, який продемонстрував значне підвищення ефективності порівняно зі звичайним частотним керуванням завдяки використанню оптимального регулятора.

Під час дослідження загального промислового перетворювача з оптимальним регулятором був врахований зв'язок між напругою та частотою, а також розглянуті алгоритми використання як фіксованих, так і змінних значень для оптимізації моменту. Порівняльний аналіз підтвердив високу ефективність використання оптимальних регуляторів у зниженні споживання енергії та підвищенні ефективності.

Дослідження показало, що використання змінного значення оптимізаційного моменту є ефективним для довготривалих циклів, тоді як фіксоване значення оптимізаційного моменту виявилось вигідним для систем з високою динамікою.

Отримані результати досліджень слугують основою для рекомендацій з використання розроблених систем. Ці рекомендації можуть бути використані в подальших дослідженнях, розробці нових систем або модернізації існуючих.

ВИСНОВКИ

У роботі проведений аналіз транспортних технологій та огляд літератури у сфері підвищення енергоефективності надав можливість визначити основні напрямки розвитку та встановити основні вимоги до електромеханічної системи та обраного електродвигуна. Обрана перспективна система електропривода - "перетворювач частоти – електродвигун".

Розроблена функціональна схема електромеханічної системи, що послугувала основою для розрахунків всіх компонентів стрічкового конвеєра, включаючи вибір приводу, перетворювача та синтез регуляторів. Створено модель електромеханічної системи стрічкового конвеєра в середовищі "Matlab Simulink", що дозволяє аналізувати енергоефективність системи за різних алгоритмів та умов експлуатації.

Проведено дослідження енергетичних режимів роботи електроприводу при різних алгоритмах керування регуляторами напруги та частоти.

В результаті дослідження визначено, що використання оптимального регулятора зі змінним значенням оптимізаційного моменту забезпечує ефективність на рівні 85% для довготривалих технологічних циклів, в той час як фіксоване значення оптимізаційного моменту є більш ефективним (83%) для високодинамічних систем, уникаючи втрат на перемагнічення під час динамічних процесів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Теорія електропривода : підручник / [М. Г. Попович, М. Г. Борисюк, В. А. Гаврилюк та ін.]; за ред. М. Г. Поповича. – Київ : Вища шк., 1993. – 494 с.
2. Розрахунок стрічкового конвеєра : метод. вказ. до курсового проекту "Машини безперервного транспорту" : для студ. спец. 7.090214 "Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні машини та обладнання" / уклад. О. В. Григоров [та ін.]. – Харків : НТУ "ХПІ", 2010. – 28 с.
3. Чорний О. П., Луговой А. В., Родькін Д. Й., Сисюк Г. Ю., Садовой О. В. Моделирование электромеханических сист: Підручник. – Кременчук, 2001. – 410 с
4. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с
5. Конвейеры: Справочник / Р. А. Волков, А. Н, Гнутов, В. К. Дьячков и др, Под общ. ред. Ю. А. Пертена. Л.; Машиностроение, Ленингр, отд-ние, 1984. 367 с
6. Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов.– Л.: Энергоиздат. Ленингр. отдние, 1982.
7. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Энергоиздат 1982г.
8. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / В.Б. Терехин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 320 с