

В основі книги – дипломна робота співавтора-магістра, який паралельно з навчальним процесом в НТУ "ХПІ" протягом двох років до дипломного проектування працював з обладнанням бетонних заводів FAST BET та отримав інженерну практику. Він же і став ініціатором вибору теми дипломного проекту. Цей підхід можна вважати найкращою схемою організації вузівської підготовки інженера у сенсі успішного та тривалого поєднання теоретичної підготовки з практичною орієнтацією актуальних знань. Актуальною для України є і тематика побудови бетонних заводів, у тому числі пересувних установок невеликої потужності. В роботі представлені описи технологічного процесу, конструкції установки та розрахунки силових схем двох електроприводів: нерегульованого асинхронного приводу змішувача та вагової конвеєрної стрічки з регульованим асинхронним приводом на базі частотного перетворювача Frecon з подальшим комп'ютерним моделюванням динамічних процесів в тестових та технологічних режимах. Також розглянуто процес автоматизованого дозування цементу на базі тензометричної системи. У ході розробок був протестований та оцінений інструмент штучного інтелекту Microsoft Copilot для його використання у навчальному процесі.



Олександр Осичев  
Вадим Овечкін  
Андрій Ткаченко

**Осичев Олександр Васильович** – к.т.н., доц., проф. кафедри "Автоматизовані електромеханічні системи" НТУ "ХПІ".

**Овечкін Вадим Романович** – студент-магістр.

**Ткаченко Андрій Олександрович** – к.т.н., доц. тієї ж кафедри. Області наукових інтересів: деталізоване моделювання та синтез електроприводів зі складними кінематичними ланцюгами та ін.

# Електроприводи та автоматизація бетонних заводів FAST BET

Особливості використання штучного інтелекту в завданнях дипломного проектування та організації навчального процесу



LAP  
**LAMBERT**  
Academic Publishing

**Олександр Осичев  
Вадим Овсчкін  
Андрій Ткаченко**

**Електроприводи та автоматизація бетонних заводів FAST BET**

FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY

**Олександр Осичев  
Вадим Овечкін  
Андрій Ткаченко**

# **Електроприводи та автоматизація бетонних заводів FAST BET**

**Особливості використання штучного інтелекту  
в завданнях дипломного проектування та  
організації навчального процесу**

**LAP LAMBERT Academic Publishing**

**Imprint**

Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this work is in no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: [www.ingimage.com](http://www.ingimage.com)

Publisher:

LAP LAMBERT Academic Publishing

is a trademark of

Dodo Books Indian Ocean Ltd. and OmniScriptum S.R.L publishing group

120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, United Kingdom

Str. Armeneasca 28/1, office 1, Chisinau MD-2012, Republic of Moldova,  
Europe

Managing Directors: Ieva Konstantinova, Victoria Ursu

[info@omniscryptum.com](mailto:info@omniscryptum.com)

Printed at: see last page

**ISBN: 978-620-8-42074-1**

Copyright © Олександр Осичев, Вадим Овечкін, Андрій Ткаченко

Copyright © 2025 Dodo Books Indian Ocean Ltd. and OmniScriptum S.R.L  
publishing group

FOR AUTHOR USE ONLY

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Технологічний процес виготовлення бетону із заданими властивостями на бетонному заводі FAST BET. Конструкція установки.....	4
1.1 Опис установки.....	4
1.2 Опис технологічного процесу.....	9
2 Нерегульований асинхронний електропривод змішувача.....	12
2.1 Опис конструкції змішувача і вимоги до приводу.....	12
2.2 Огляд рішень з керування приводами змішувачів.....	14
2.3 Розрахунок параметрів для Т-подібної схеми заміщення та механічних характеристик електропривода.....	16
2.4 Моделювання роботи приводу в MATLAB/Simulink/SimPower.....	26
3 Електропривод вагової конвеєрної стрічки з перетворювачем частоти.....	30
3.1 Опис конструкції конвеєра і вимоги до приводу.....	30
3.2 Огляд частотних перетворювачів і аналіз відповідності перетворювача Freson конвеєра поставленому завданню.....	31
3.3 Розрахунок параметрів для Т-подібної схеми заміщення та механічних характеристик електропривода.....	34
3.4 Моделювання роботи приводу в MATLAB/Simulink/SimPower.....	43
4 Процес автоматизованого дозування цементу.....	46
4.1 Опис системи дозування цементу.....	46
4.2 Огляд систем дозування з тензодатчиками.....	49
4.3 Моделювання автоматизованої тензометричної системи.....	52
5 Визначення області активного застосування програмних засобів штучного інтелекту у студентській, інженерній і науковій діяльності.....	59
5.1 Огляд програм, які забезпечують діалог користувача з ШІ.....	60
5.2 Перший інформаційний зріз областей застосування чату Copilot та комфортності роботи в його середовищі.....	61

5.3 Приклади результатів дослідження можливостей програми Copilot із прив'язкою до завдань студентів кафедри АЕМС та теми дипломної роботи..... 66

Висновок..... 71

Список джерел інформації..... 72

Додаток А..... 76

Додаток Б..... 83

FOR AUTHOR USE ONLY

## ВСТУП

У сучасному промисловому середовищі технології виробництва бетону стають дедалі складнішими, оскільки зростає потреба в бетоні зі специфічними характеристиками для різних будівельних проектів. Зокрема, важливе значення мають автоматизовані бетонні заводи серії FAST BET, що забезпечують високу продуктивність і якість продукції завдяки сучасному електрообладнанню та системам автоматизації. Одним з найважливіших компонентів цих заводів є електропривод різних систем: змішувачів, конвеєрів і систем дозування матеріалів. Поєднання нерегульованого та регульованого асинхронного електроприводу і перетворювача частоти не тільки забезпечує стабільну роботу обладнання, але й знижує енергоспоживання та підвищує ефективність виробничих процесів.

Актуальність даної роботи обумовлена необхідністю дослідження роботи електроприводу бетонного заводу та використання сучасного програмного забезпечення для вирішення задач автоматизації та керування технологічними процесами.

Метою дипломної роботи є вирішення завдань, пов'язаних з дослідженням та моделюванням електричних двигунів та автоматизованих систем на прикладі обладнання бетонного заводу серії FAST BET.

# 1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИГОТОВЛЕННЯ БЕТОНУ ІЗ ЗАДАНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ НА БЕТОННОМУ ЗАВОДІ FAST BET. КОНСТРУКЦІЯ УСТАНОВКИ

## 1.1 Опис установки

Заводи серії FAST BET (рис. 1.1) призначені для автоматизованого виробництва бетонних сумішей, які відповідають заданим технічним вимогам. Установка забезпечує повний цикл виробництва бетону – від приймання сировини до готової суміші, завантаженої в транспортні засоби. Основна перевага заводу полягає в його здатності точно дозувати компоненти і виконувати автоматизоване управління процесами, що значно підвищує ефективність виробництва.

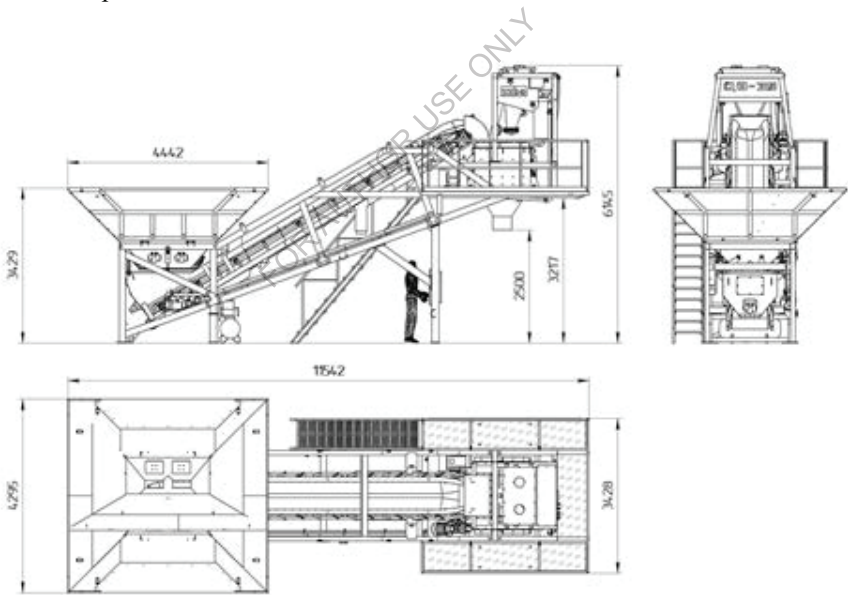


Рисунок 1.1 – Схема бетонного заводу FAST BET-35

## Бункери для інертних матеріалів

Для зберігання та подачі інертних матеріалів (піску і щебеню) використовуються бункери (рис. 1.2), які розташовані над конвеєрною стрічкою. Кожен бункер обладнаний системою подачі з пневмоциліндром і шибером, що дозволяє регулювати кількість поданого матеріалу. Шибер виконує функцію заслінки, яка відкриває або закриває потік інертного матеріалу, забезпечуючи контрольований процес дозування.

Крім того, бункери мають спеціальну конструкцію, яка запобігає злежуванню і закупорюванню матеріалів. Вони оснащені вібраційними пристроями, що забезпечують безперебійну подачу навіть при роботі з дрібнозернистими матеріалами.



Рисунок 1.2 – 3Д модель бункера інертних матеріалів

## **Конвеєрна стрічка з тензодатчиками**

Конвеєрна стрічка виконує функцію транспортування інертних матеріалів від бункерів до змішувача. Під бункерами стрічка оснащена тензодатчиками для вимірювання маси матеріалів. Спочатку відбувається зважування щебеню, потім стрічка тарується, і здійснюється зважування піску. Такий підхід дозволяє точно визначити масу кожного з компонентів, необхідних для приготування бетону відповідно до рецептури.

Конвеєрна стрічка виготовлена з матеріалів, стійких до стирання і високих температур, що забезпечує її тривалий термін служби навіть у важких умовах експлуатації. Система приводу конвеєра включає частотний перетворювач, який дозволяє плавно регулювати швидкість стрічки для оптимізації процесу дозування.

## **Дозуючий комплекс (ДЗК)**

Дозуючий комплекс розташований над змішувачем і включає кілька резервуарів для зберігання та подачі компонентів, зокрема: три окремі резервуари для хімічних добавок, кожен з яких має тензодатчики для контролю маси. Резервуар для води з інтегрованою системою дозування, яка забезпечує точну подачу води в змішувач. Резервуар для цементу, що забезпечує можливість точного зважування і подачі цементу до змішувача.

Кожен з резервуарів ДЗК обладнаний спеціальними клапанами і шиберами, що дозволяють точно регулювати потоки компонентів. Всі резервуари підключені до центральної системи управління, яка автоматично контролює процес дозування відповідно до вибраної рецептури.

## **Змішувач**

Змішувач (рис. 1.3) виконує функцію змішування всіх компонентів бетону (піску, щебеню, цементу, води і хімічних добавок) до отримання однорідної бетонної суміші. Змішувач обладнаний потужним приводом, який забезпечує необхідну швидкість обертання лопатей для ефективного перемішування

матеріалів. Двигун змішувача запускається на початку технологічного процесу, щоб забезпечити готовність до приймання дозованих компонентів.

Для підвищення ефективності процесу змішувач може бути оснащений системою автоматичного очищення, яка дозволяє зменшити час на технічне обслуговування і підвищити продуктивність.

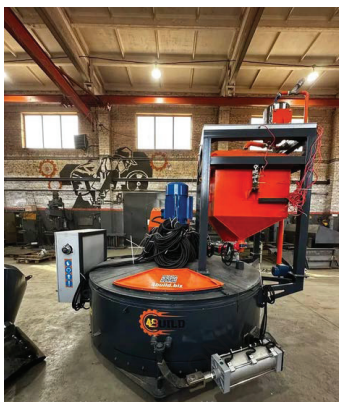


Рисунок 1.3 – Фото змішувача з встановленим над ним ДЗК

### **Шнековий конвеєр для цементу**

Шнековий конвеєр (рис. 1.4) забезпечує подачу цементу від силосу до дозуючого комплексу. Він являє собою механізм з обертовим гвинтом, який транспортує цемент через трубу до місця призначення. Шнек забезпечує рівномірне подавання цементу і дозволяє точно дозувати його масу.



Рисунок 1.4 – Фото шнекового конвеєра

### Силос для цементу

Силос (рис. 1.5) призначений для зберігання цементу і захищений від впливу зовнішніх факторів, таких як волога і пил. Він обладнаний системою аерації, яка запобігає злежуванню цементу, і фільтрами, що забезпечують очищення повітря, яке виходить при завантаженні або розвантаженні цементу.

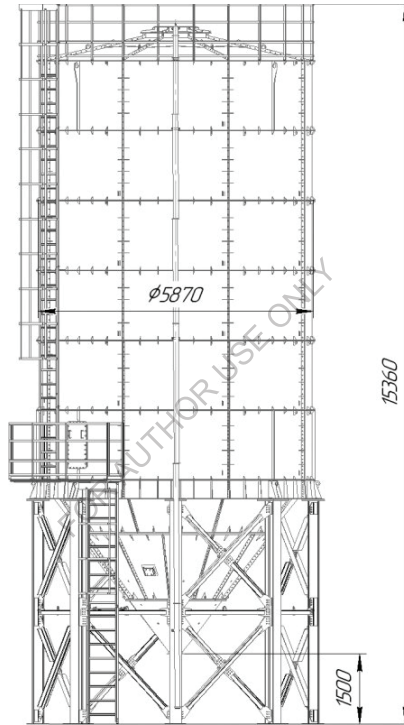


Рисунок 1.5 – Схема силоса для цементу

### Система управління

Завод обладнаний сучасною системою управління (рис. 1.6), яка включає програмне забезпечення для автоматичного керування усіма етапами виробництва. Система дозволяє вибирати рецептури, контролювати роботу

змішувача, конвеєрів, шнеків і дозуючого комплексу, а також здійснювати моніторинг всіх параметрів процесу.

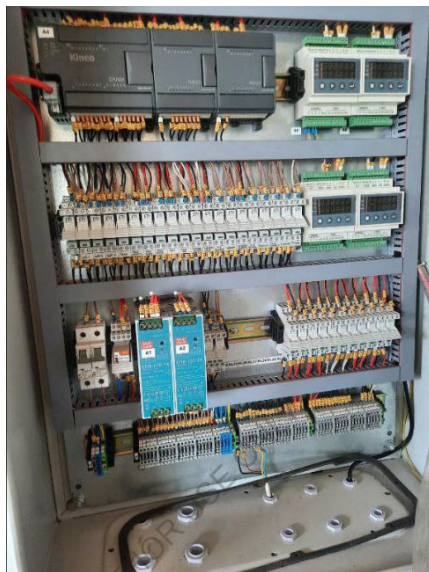


Рисунок 1.6 – Шафа автоматики

## 1.2 Опис технологічного процесу

Технологічний процес виробництва бетонних сумішей на заводах серії FAST BET являє собою послідовність етапів, спрямованих на забезпечення точного дозування компонентів і однорідного перемішування для отримання бетону з потрібними властивостями. Основні етапи процесу детально описані нижче.

### Вибір рецептури

На початку процесу здійснюється вибір рецептури, яка визначає кількісне співвідношення компонентів для отримання бетону потрібної марки. У рецептурі враховуються маси основних інгредієнтів: піску, щебеню, цементу, води, а також трьох видів хімічних добавок, які поліпшують властивості бетону (наприклад,

підвищують міцність, знижують час схоплювання, покращують рухливість суміші). Залежно від обраної рецептури встановлюються параметри для кожного етапу дозування і змішування.

### **Підготовка змішувача**

Перед початком завантаження компонентів змішувач запускається в холосту, щоб підготувати його до роботи. Це забезпечує рівномірний розподіл компонентів на початкових етапах завантаження і мінімізує час змішування. Змішувач обладнаний потужним приводом, який дозволяє підтримувати задану швидкість обертання, необхідну для досягнення однорідної консистенції бетонної суміші.

### **Дозування інертних матеріалів**

Дозування інертних матеріалів, таких як пісок і щебінь, виконується на конвеєрній стрічці, яка розташована під бункерами. Стрічка оснащена тензодатчиками, що дозволяють точно зважувати матеріали під час їх подачі. Процес починається з дозування щебеню, який завантажується першим. Після завантаження щебеню система виконує тарування, щоб виключити вплив залишкової маси, і починається зважування піску. Подача матеріалу з бункерів здійснюється за допомогою пневматичних циліндрів, що рухають шиберами (заслінками), які регулюють відкриття або закриття потоку інертних матеріалів. Таке управління дозволяє забезпечити точне дозування компонентів відповідно до вибраної рецептури.

### **Дозування цементу**

Після завершення дозування інертних матеріалів на конвеєрній стрічці настає етап подачі цементу. Цемент зберігається в силосі, який забезпечує захист матеріалу від вологи і пилу. Подача цементу здійснюється за допомогою шнекового конвеєра, який транспортує цемент до дозуючого комплексу (ДЗК). Шнековий конвеєр забезпечує рівномірний потік цементу, що дозволяє точно дозувати його масу відповідно до заданих параметрів.

### **Дозування води і хімічних добавок**

Наступним етапом є дозування води та хімічних добавок. У ДЗК розташовані резервуари для води і трьох видів хімії, кожен з яких оснащений тензодатчиками для контролю маси. Вода подається за допомогою дозуючого насоса, що забезпечує точне дотримання встановленої кількості. Хімічні добавки додаються окремо, щоб досягти потрібних характеристик бетонної суміші. Кожен з резервуарів для хімічних компонентів має власний клапан, який дозволяє точно регулювати їх кількість.

### **Перемішування компонентів**

Після дозування всіх компонентів (інертних матеріалів, цементу, води і хімічних добавок) вони завантажуються у змішувач для перемішування. Змішування відбувається при постійній швидкості, щоб забезпечити однорідність суміші. Тривалість процесу перемішування регулюється залежно від обраної рецептури, що дозволяє досягти оптимальної якості суміші. Для підвищення ефективності змішування можуть використовуватися додаткові лопати або системи зрошення водою всередині змішувача.

### **Вивантаження готової суміші**

Після завершення процесу змішування шибер, розташований під змішувачем, відкривається, і готова бетонна суміш вивантажується в автомобільний міксер або іншу транспортну ємність. Шибер працює за принципом заслінки, що дозволяє плавно регулювати швидкість вивантаження.

### **Автоматизована система управління**

Усі етапи виробництва контролюються автоматизованою системою управління, яка виконує програмне керування всіма процесами, починаючи від вибору рецептури і закінчуючи контролем якості готової суміші. Система забезпечує відображення всіх параметрів технологічного процесу, дозволяє здійснювати моніторинг роботи окремих механізмів і автоматично регулює роботу обладнання для забезпечення необхідної продуктивності.

## 2 НЕРЕГУЛЬОВАНИЙ АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ЗМІШУВАЧА

### 2.1 Опис конструкції змішувача і вимоги до приводу

Змішувач є одним із ключових елементів бетонного заводу, оскільки саме в ньому відбувається процес отримання однорідної бетонної суміші з необхідними властивостями. Конструкція змішувача (рис. 2.1) включає такі основні компоненти: змішувальний барабан, лопаті, електропривод та систему управління.

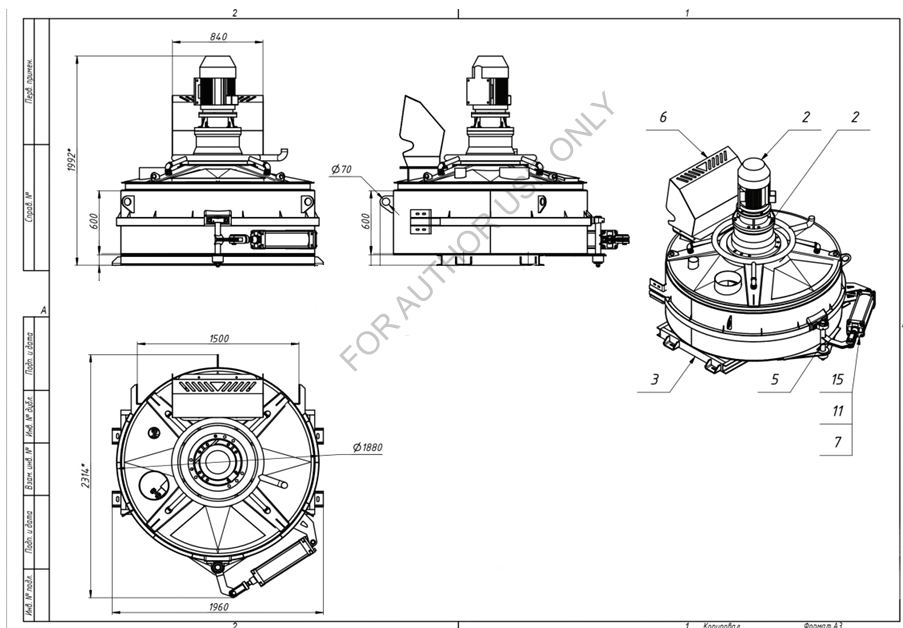


Рисунок 2.1 – Схема змішувача

### Конструкція змішувального барабана

Змішувальний барабан – це циліндрична ємність, в якій відбувається перемішування компонентів бетонної суміші. Всередині барабана встановлені

спеціальні лопаті, які забезпечують ефективне перемішування всіх компонентів. Лопаті можуть бути розташовані під різними кутами для створення оптимального руху матеріалу під час змішування, що сприяє досягненню однорідності суміші. Барабан виготовляється з міцних матеріалів, таких як сталь, що забезпечує його довговічність і стійкість до зносу.

### **Електропривод змішувача**

Електропривод змішувача відповідає за обертання барабана з лопатями. Як правило, використовується нерегульований асинхронний двигун, який характеризується високою надійністю, невибагливістю в обслуговуванні та відносно низькою вартістю. Двигун через редуктор з'єднаний зі змішувальним барабаном, забезпечуючи його обертання із заданою частотою.

### **Вимоги до електроприводу**

Електропривод змішувача повинен відповідати ряду вимог для забезпечення ефективної роботи установки:

- 1) **Моментна характеристика.** Привод повинен мати достатній крутний момент для подолання сил тертя та інерції матеріалів всередині змішувача, особливо на початкових етапах змішування.
- 2) **Стійкість до перевантажень.** Змішувач може працювати з різними типами сумішей, що мають різну в'язкість, тому електропривод повинен витримувати короточасні перевантаження без зниження продуктивності.
- 3) **Надійність і довговічність.** Привод має витримувати довготривалу роботу в умовах запиленості та підвищеної вологості, характерних для бетонних заводів.
- 4) **Можливість роботи в холостому режимі.** Перед початком завантаження матеріалів змішувач працює в холостому режимі, і електропривод повинен забезпечувати стабільну роботу в таких умовах.

## 2.2 Огляд рішень з керування приводами змішувачів

Ефективне керування електроприводом змішувача є важливим фактором, що впливає на якість бетонної суміші та загальну продуктивність бетонного заводу. Існує кілька підходів до керування приводами змішувачів, кожен із яких має свої переваги та недоліки залежно від умов експлуатації, вимог до змішування та доступних технічних рішень.

Нерегульовані системи використовують асинхронні двигуни, які працюють при постійній частоті обертання. Такі рішення є простими та недорогими у виконанні, оскільки не потребують складної системи керування. Проте вони мають обмеження в можливості адаптації до змінних умов роботи, наприклад, при зміні типу суміші або її в'язкості.

Основні переваги нерегульованих систем:

- Простота конструкції та низькі витрати на обслуговування.
- Надійність роботи в стандартних умовах.
- Мінімальні витрати на впровадження та налаштування.

Недоліки:

- Обмежена можливість регулювання параметрів змішування.
- Низька енергоефективність при змінних навантаженнях.

Системи з частотним перетворювачем дозволяють змінювати швидкість обертання змішувача шляхом регулювання частоти живлення електродвигуна. Це дає можливість точно налаштувати режим змішування для різних типів бетонних сумішей, забезпечуючи більш високу якість продукції.

Переваги частотного регулювання:

- Гнучке налаштування режимів роботи в залежності від властивостей суміші.
- Підвищена енергоефективність завдяки адаптації швидкості обертання до реальних умов роботи.
- Зменшення зносу механічних компонентів, оскільки привод працює у менш навантажених режимах.

Недоліки:

- Складність налаштування та обслуговування частотних перетворювачів.
- Вища вартість системи порівняно з нерегульованими приводами.

Іншим популярним рішенням для керування приводами змішувачів є застосування пристроїв плавного пуску. Ці пристрої обмежують струм пуску та зменшують механічні навантаження на привод і редуктор під час запуску змішувача, що продовжує термін служби обладнання.

Переваги плавного пуску:

- Зниження ударних навантажень на електродвигун та редуктор.
- Підвищення надійності та довговічності системи.
- Зменшення витрат на обслуговування.

Недоліки:

- Плавний пуск не дозволяє регулювати швидкість обертання під час роботи, тому не забезпечує такої ж гнучкості, як частотне регулювання.
- Додаткові витрати на встановлення пристрою плавного пуску.

Сучасні рішення також включають впровадження інтелектуальних систем керування на основі штучного інтелекту або спеціальних алгоритмів оптимізації. Такі системи можуть автоматично підлаштовувати режим роботи змішувача під поточні умови, аналізуючи параметри суміші, в'язкість, температуру та інші фактори.

Переваги інтелектуальних систем:

- Максимальна адаптивність до змінних умов.
- Підвищення якості змішування завдяки автоматичному налаштуванню параметрів.
- Можливість прогнозування технічного обслуговування на основі аналізу роботи.

Недоліки:

- Висока вартість впровадження, необхідність високої кваліфікації персоналу для обслуговування та налаштування.

### 2.3 Розрахунок параметрів для Т-подібної схеми заміщення та механічних характеристик електропривода

В таблиці 2.1 показано дані асинхронного двигуна змішувача.

Таблиця 2.1 – Дані асинхронного двигуна змішувача

Типорозмір двигуна	4A160M4У3	
$U_n$ , В	380	
$n_{\text{син}}$ , об/хв	1500	
$P_n$ , кВт	18,5	
$\eta$ , %	85,5	
$2p$	4	
$\cos\varphi$	0,895	
$X_\mu$	4,3	
В номінальному режимі	$R_1'$	0,012
	$X_1'$	0,055
	$R_2''$	0,024
	$X_2''$	0,13
При короткому замиканні	$R''_{2\text{п}}$	0,037
	$R_{\text{к.п}}$	0,079
	$X_{\text{к.п}}$	0,14
$m_{\text{п}}$	1,4	
$m_{\text{м}}$	1,0	
$m_{\text{к}}$	2,3	
$s_{\text{ном}}$ , %	2,2	
$s_{\text{к}}$ , %	16,0	
$J$ , кг · м <sup>2</sup>	0,13	
$t_{\text{п}}$ , с	0,13	

$U_n$  – номінальна напруга двигуна;

$n_{\text{син}}$  – синхронна частота обертання двигуна, об/хв;

$P_n$  – номінальна потужність двигуна, кВт;

$\eta$  – ККД двигуна, %;  
 $2p$  – кількість полюсів;  
 $\cos\varphi$  – коефіцієнт потужності;  
 $X_{\mu}$  – індуктивний опір від головного магнітного потоку двигуна, в.о.;  
 $R_1$  – активний опір обмотки статора, в.о.;  
 $X_1$  – індуктивний опір розсіювання обмотки статора, в.о.;  
 $R_2$  – приведений активний опір обмотки ротора до обмотки статора, в.о.;  
 $X_2$  – приведений індуктивний опір розсіювання обмотки ротора до обмотки статора, в.о.;  
 $R'_{2\pi}$  – приведений активний опір обмотки ротора до обмотки статора з урахуванням витіснення струму у стрижнях білячої клітини, в.о.;  
 $R_{к.п}$  – активний опір короткого замикання, в.о.;  
 $X_{к.п}$  – індуктивний опір короткого замикання, в.о.;  
 $m_{п}, m_{м}, m_{к}$  – коефіцієнти відношення пускового, мінімального та максимального моментів до номінального відповідно, в.о.;  
 $S_{ном}$  – номінальне ковзання асинхронного двигуна, %;  
 $S_{к}$  – критичне ковзання асинхронного двигуна, %;  
 $J$  – момент інерції ротора,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  
 $t_{п}$  – час пуску двигуна, с;

Проведемо розрахунки абсолютних параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна, шляхом переходу з Г-подібної схеми до Т-подібної, та відносних до абсолютних.

Для цього розраховуємо номінальний фазний струм для АД за формулою.

$$I_{н.ф.} = \frac{P_{н}}{3 \cdot U_{н.ф.} \cdot \cos\varphi \cdot \eta}, \quad (2.1)$$

де  $I_{н.ф.}$  – середньоквадратичний струм, А;

$U_{н.ф.}$  – середньоквадратична фазна напруга на статорі, В;

$$I_{н.ф.} = \frac{18500}{3 \cdot 220 \cdot 0,895 \cdot 0,855} = 36,63 \text{ А.}$$

Розрахуємо поправочний коефіцієнт для перерахунку параметрів із Г-подібної до Т-подібної схеми, формула (2.2):

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{X_1'}{X_\mu}}, \quad (2.2)$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{0,055}{4,3}} = 1,0126.$$

Приводимо значення активних і індуктивних опорів ротора та статора до значень Т-подібної схеми:

$$r_1' = \frac{R_1'}{\sigma_1}, \quad (2.3)$$

$$x_1' = \frac{X_1'}{\sigma_1}, \quad (2.4)$$

$$r_2'' = \frac{R_2''}{\sigma_1^2}, \quad (2.5)$$

$$x_2'' = \frac{X_2''}{\sigma_1^2}, \quad (2.6)$$

Підставимо значення та отримаємо:

$$r_1' = \frac{0,012}{1,0126} = 0,0119$$

$$x_1' = \frac{0,055}{1,0126} = 0,0543$$

$$r_2'' = \frac{0,024}{1,0126^2} = 0,0234$$

$$x_2'' = \frac{0,13}{1,0126^2} = 0,127$$

Перераховуємо відносні величини в абсолютні  $r_1, x_1, r_2, x_2$ , за допомогою наступних формул:

$$r_1 = \frac{r_1' \cdot U_{\text{н.ф.}}}{I_{\text{н.ф.}}}, \quad (2.7)$$

$$x_1 = \frac{x_1' \cdot U_{\text{н.ф.}}}{I_{\text{н.ф.}}}, \quad (2.8)$$

$$r_2 = \frac{r_2'' \cdot U_{\text{н.ф.}}}{I_{\text{н.ф.}}}, \quad (2.9)$$

$$x_2 = \frac{x_2'' \cdot U_{\text{н.ф.}}}{I_{\text{н.ф.}}}, \quad (2.10)$$

В результаті розрахунків отримаємо:

$$r_1 = \frac{0,0119 \cdot 220}{36,63} = 0,0714 \text{ Ом}$$

$$x_1 = \frac{0,0543 \cdot 220}{36,63} = 0,326 \text{ Ом}$$

$$r_2 = \frac{0,0234 \cdot 220}{36,63} = 0,141 \text{ Ом}$$

$$x_2 = \frac{0,127 \cdot 220}{36,63} = 0,762 \text{ Ом}$$

Використовуючи пакет MATLAB будуюмо механічні характеристики обраного двигуна (рис. 2.2 – 2.7).

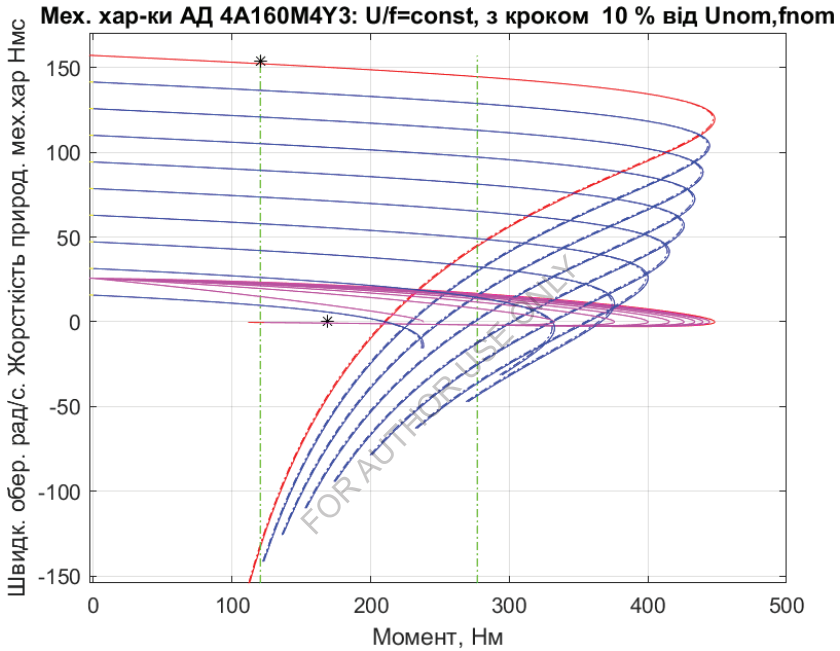


Рисунок 2.2 – Механічні характеристики двигуна при  $U/f = \text{const}$

Мех. хар-ки АД 4А160М4УЗ: 4А160М4УЗ :  $f < f_{ном}$  з кроком + i - 5 % від  $f_{ном}$

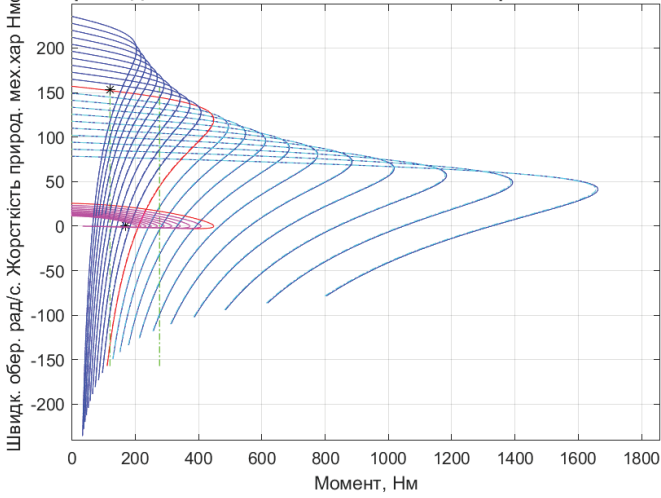


Рисунок 2.3 – Механічні характеристики двигуна при  $f < f_{ном}$

Мех. хар-ки АД 4А160М4УЗ:  $X_1 > X_{1ест}$  з кроком +50 % від  $X_{1ест}$

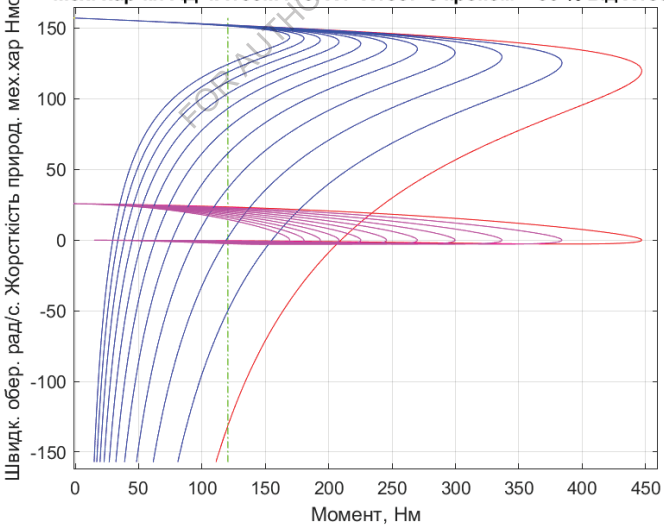


Рисунок 2.4 – Механічні характеристики двигуна при  $X_1 > X_{1ест}$

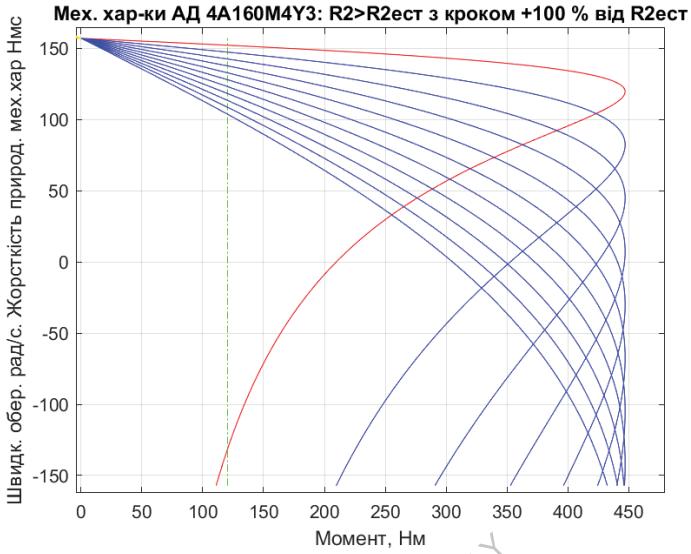


Рисунок 2.5 – Механічні характеристики двигуна при  $R_2 > R_{2\text{ест}}$

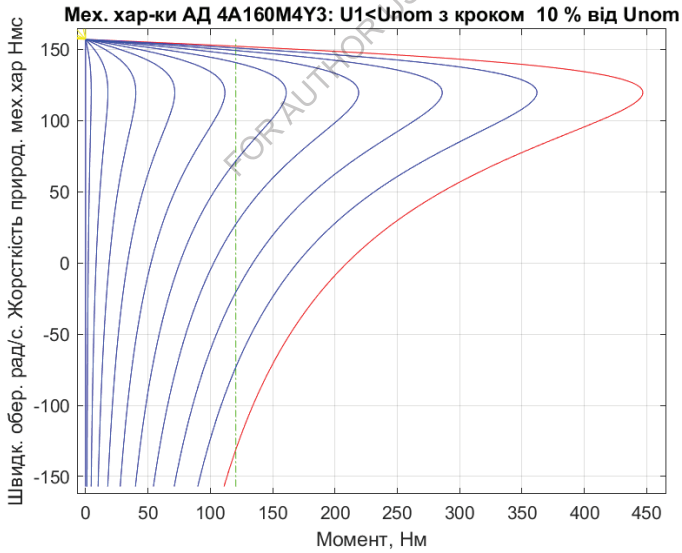


Рисунок 2.6 – Механічні характеристики двигуна при  $U_1 < U_{\text{ном}}$

Мех. хар-ки торм. пост. струмом АД 4А160М4УЗ: I<sub>пост</sub> < I<sub>пост.ном</sub> з кроком -10 % від I<sub>пост</sub>= 15 В

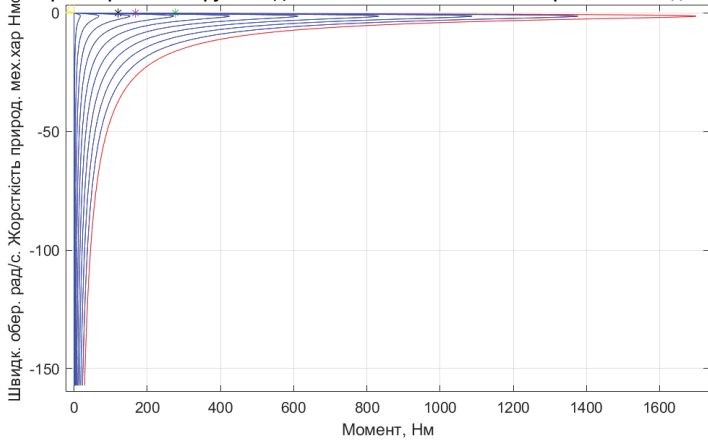


Рисунок 2.7 – Механічні характеристики двигуна при I<sub>пост</sub> < I<sub>пост.ном</sub>

Розрахуємо жорсткість за формулою:

$$\beta = \frac{2 \cdot M_{кр}}{\omega_{син} \cdot S_{кр}}, \quad (2.11)$$

Визначимо кутову частоту обертання холостого ходу по формулі:

$$\omega_{син} = \frac{\pi \cdot n_{син}}{30}, \quad (2.12)$$

$$\omega_{син} = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 157 \text{ с}^{-1}.$$

Далі визначимо критичний момент за формулою:

$$M_{\text{кр}} = m_{\text{кр}} \cdot M_{\text{ном}}, \quad (2.13)$$

Номінальний момент розраховується за формулою:

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}}, \quad (2.14)$$

Номінальна кутова швидкість обертання розраховується за формулою:

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30}, \quad (2.15)$$

Номінальна частота обертання визначається по формулі:

$$n_{\text{ном}} = n_{\text{син}}(1 - s_{\text{ном}}), \quad (2.16)$$

Підставимо всі відомі значення та розрахуємо дані величини.

$$n_{\text{ном}} = 1500(1 - 0,055) = 1467 \frac{\text{об}}{\text{хв}},$$

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot 1467}{30} = 154 \text{ с}^{-1},$$

$$M_{\text{ном}} = \frac{18500}{154} = 120,13 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{\text{кр}} = 2,3 \cdot 120,13 = 276,3 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$\beta = \frac{2 \cdot 276,3}{157 \cdot 0,16} = 22 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}.$$

Розрахуємо механічну постійну часу за формулою:

$$T_M = \frac{J}{\beta}, \quad (2.17)$$

$$T_M = \frac{0,13}{22} = 0,0059 \text{ с}$$

Розрахуємо електромеханічну постійну часу за формулою:

$$T_e = \frac{1}{\omega_{\text{ел.ном}} \cdot S_{\text{кр}}}, \quad (2.18)$$

$$T_e = \frac{1}{157 \cdot 0,16} = 0,0398 \text{ с}$$

Розрахуємо частоту демпфированого резонансу за формулою:

$$f_{\text{демф}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{T_e \cdot T_M}}, \quad (2.19)$$

$$f_{\text{демф}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{0,0059 \cdot 0,0398}} = 10,386 \text{ Гц}$$

## 2.4 Моделювання роботи приводу в MATLAB/Simulink/SimPower

Для вирішення поставлених задач у дипломній роботі було створено математичну модель (рис. 2.8) роботи двигуна змішувача бетонозмішувача у середовищі MATLAB/Simulink, з використанням бібліотеки Simscape. Модель дозволяє провести детальний аналіз роботи електропривода змішувача, враховуючи характерні навантаження та зміну умов під час технологічного процесу. Нижче наведено пояснення до зображень, що ілюструють етапи роботи двигуна.

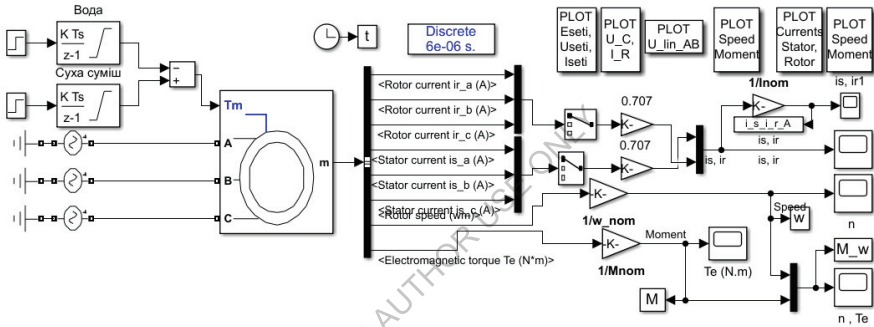


Рисунок 2.8 – Модель двигуна змішувача у MATLAB/Simulink

На рисунку представлена структурна схема моделі двигуна. У ній відображено підключення асинхронного двигуна, системи керування, джерела навантаження, що моделює опір змішування, та допоміжних елементів. Ця модель слугує основою для подальшого аналізу роботи електропривода.

Графік (рис. 2.9) демонструє процес пуску двигуна. Видно, що електропривод досягає номінальної швидкості за **0,13 секунди**, що відповідає розрахованим значенням. Такий швидкий пуск забезпечується за рахунок високої стартової потужності двигуна, необхідної для забезпечення стабільної роботи під навантаженням.

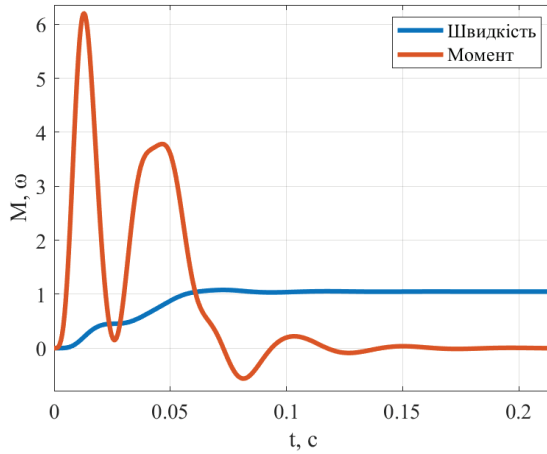


Рисунок 2.9 – Момент і швидкість при пуску двигуна

На цьому графіку (рис. 2.10) показано момент початку подачі сухої суміші в змішувач. Додавання інертних матеріалів викликає збільшення навантаження на двигун, що видно за підвищенням моменту. Система керування забезпечує плавну зміну параметрів, щоб уникнути перевантаження двигуна.

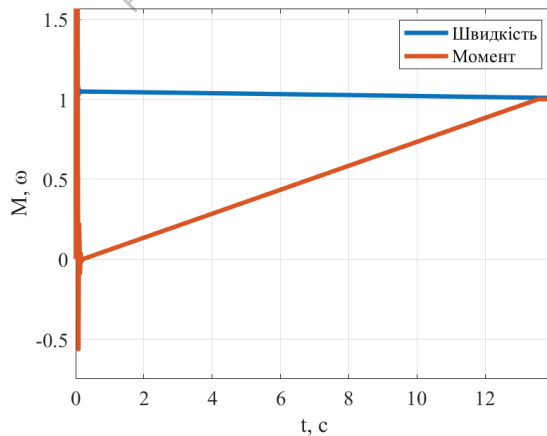


Рисунок 2.10 – Плавна подача сухої суміші

Даний графік (рис. 2.11) ілюструє момент, коли до сухої суміші починає додаватися вода. Подача води знижує опір змішування, що призводить до зменшення моменту двигуна. Це пояснюється покращенням текучості суміші, через що двигуну стає легше виконувати свою роботу.

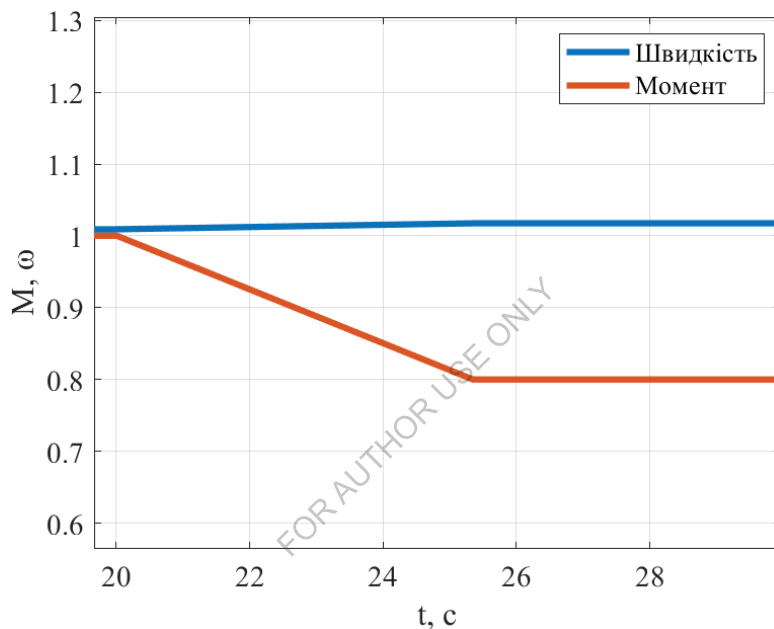


Рисунок 2.11 – Подача води та зменшення моменту двигуна

На узагальненому графіку (рис. 2.12) представлено всі етапи роботи двигуна: пуск, подача сухої суміші, додавання води та зміна моменту. Цей графік дає змогу побачити повну картину роботи електропривода змішувача під час одного циклу змішування.

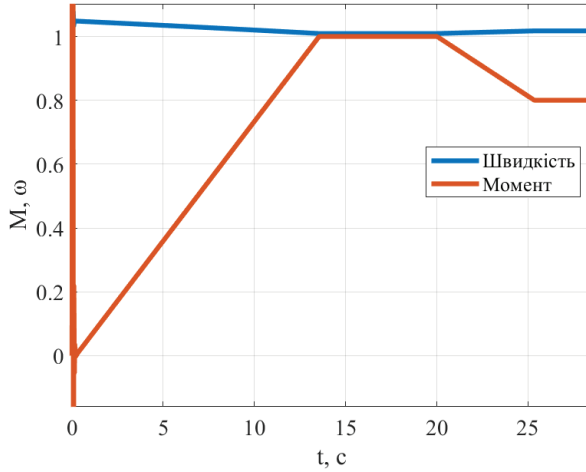


Рисунок 2.12 – Узагальнений графік роботи двигуна

У результаті проведеного моделювання роботи електропривода змішувача у середовищі MATLAB/Simulink були отримані детальні дані про його динамічні характеристики на різних етапах роботи.

Результати моделювання показали ефективність роботи створеної моделі двигуна, яка враховує зміну навантажень на різних етапах технологічного процесу. Це дозволяє використовувати її як інструмент для подальшої оптимізації електропривода.

## **3 ЕЛЕКТРОПРИВОД ВАГОВОЇ КОНВЕЄРНОЇ СТРІЧКИ З ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ЧАСТОТИ**

### **3.1 Опис конструкції конвеєра і вимоги до приводу**

Конвеєр є невід'ємною частиною технологічного процесу виробництва бетону на заводах серії FAST BET. Його основне завдання – транспортування та дозування інертних матеріалів (піску і щебеню) безпосередньо на стрічці, після чого ці матеріали подаються до змішувача для подальшого змішування з іншими компонентами.

#### **Конструкція конвеєра**

Конвеєр складається з таких основних елементів:

- 1) **Конвеєрна стрічка.** Це основний елемент, на який завантажуються матеріали. Стрічка виготовлена з міцних зносостійких матеріалів, що витримують великі навантаження та абразивний знос. На бетонному заводі вона також має спеціальне покриття для зменшення зносу при контакті з піском і щебенем.
- 2) **Приводний барабан.** Приводить стрічку в рух завдяки обертанню, переданому від електродвигуна через редуктор.
- 3) **Натяжний барабан.** Забезпечує правильне натягнення стрічки, що важливо для запобігання її прослизанню.
- 4) **Система роликів.** Ролики підтримують конвеєрну стрічку знизу, зменшуючи тертя під час руху. Вони розташовані вздовж усієї довжини конвеєра.

#### **Вимоги до приводу конвеєра**

Привод конвеєра на бетонному заводі повинен відповідати певним технічним вимогам для забезпечення ефективної та безперебійної роботи:

- Регулювання швидкості руху стрічки. Конвеєр повинен мати можливість змінювати швидкість руху.

- Плавний пуск і зупинка. Щоб уникнути ударних навантажень і зношування механічних частин, привод повинен забезпечувати плавний запуск та зупинку стрічки. Це особливо важливо, коли конвеєр працює з важкими матеріалами, такими як щебінь.
- Висока надійність і зносостійкість. Оскільки конвеєр працює у важких умовах із постійним контактом із абразивними матеріалами (пісок, щебінь), його привод повинен бути стійким до зносу і мати високу надійність.
- Можливість роботи у запиленних умовах. Умови на бетонному заводі характеризуються підвищеною запиленістю, тому привод повинен бути захищений від проникнення пилу і вологи.
- Енергоефективність. Привод повинен забезпечувати мінімальні витрати електроенергії без зниження продуктивності.

### **3.2 Огляд частотних перетворювачів і аналіз відповідності перетворювача Frescon конвеєра поставленому завданню**

Частотні перетворювачі використовуються для регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів шляхом зміни частоти напруги живлення. Це дозволяє гнучко налаштовувати режим роботи електропривода, забезпечуючи економію електроенергії та підвищення якості технологічного процесу.

#### **Огляд частотних перетворювачів**

Частотні перетворювачі широко застосовуються для приводу конвеєрів, тому що дозволяють досягати таких переваг:

- Регулювання швидкості двигуна. Завдяки зміні частоти живлення, можна плавно змінювати швидкість руху конвеєрної стрічки, що особливо важливо для точного дозування матеріалів.
- Плавний пуск і гальмування. Частотні перетворювачі забезпечують зменшення ударних навантажень на механічні компоненти за рахунок плавного запуску двигуна і зниження частоти до нуля при зупинці.

- Енергоефективність. Завдяки можливості працювати на змінних швидкостях, частотні перетворювачі дозволяють зменшити споживання електроенергії.
- Захист від перевантажень. Частотні перетворювачі можуть моніторити стан двигуна та автоматично знижувати навантаження або відключати привід у разі перевищення допустимих параметрів.

На ринку існує багато виробників частотних перетворювачів, серед яких ABB, Siemens, Danfoss, Mitsubishi та інші. У цьому проекті розглядається частотний перетворювач Frecon, який використовується для приводу конвеєра на бетонному заводі серії FAST BET.

Був обраний частотний перетворювач Frecon FR500A-4T-011G/015PB – 11/15 кВт, 380В, IP21, з EMC-фільтром C2/C3 (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Перетворювач частоти Frecon FR500A-4T-011G/015PB

Частотний перетворювач Frecon FR500A-4T-011G/015PB призначений для живлення 3-фазних синхронних та асинхронних двигунів. Він підходить для

двигунів з номінальною потужністю до 11 кВт у нормальному режимі роботи (з невеликим перевантаженням до 120%) і до 15 кВт при використанні в режимі високого перевантаження (до 150%). Він працює при номінальній напрузі живлення 380 В змінного струму.

Цей перетворювач розроблений для промислових процесів, забезпечуючи високу продуктивність двигуна і повний контроль для будь-якого типу підключення. Він підтримує різні протоколи зв'язку, такі як EtherNet/IP та Modbus TCP, що дозволяє інтегрувати його в архітектуру автоматизації. Призначений для встановлення у вертикальному положенні на стіні з допуском  $\pm 10^\circ$ .

Характеристики перетворювача:

- Напруга живлення: 380 В з допуском від -15% до +10%;
- Потужність:
  - 11 кВт у нормальному режимі роботи;
  - 15 кВт у режимі важкого навантаження;
- Максимальний струм у сталому режимі:
  - 24 А для нормального режиму роботи;
  - 31 А для важкого режиму роботи;
  - Перевантажувальна здатність: до 150%

### 3.3 Розрахунок параметрів для Т-подібної схеми заміщення та механічних характеристик електропривода

В таблиці 3.1 показано дані асинхронного двигуна конвеєра.

Таблиця 3.1 – Дані асинхронного двигуна 4A132S4Y3

Типорозмір двигуна		4A132S4Y3
$U_n$ , В		380
$n_{син}$ , об/хв		1500
$P_n$ , кВт		7,5
$\eta$ , %		87,5
$2p$		4
$\cos\phi$		0,86
$X_\mu$		3,0
В номінальному режимі	$R_1'$	0,048
	$X_1'$	0,085
	$R_2''$	0,033
	$X_2''$	0,13
При короткому замиканні	$R''_{2П}$	0,040
	$R_{к.п}$	0,088
	$X_{к.п}$	0,15
$m_n$		2,2
$m_m$		1,7
$m_k$		3,0
$s_{ном}$ , %		2,9
$s_k$ , %		19,5
$J$ , кг · м <sup>2</sup>		0,028
$t_n$ , с		0,05

$U_n$  – номінальна напруга двигуна,

$n_{син}$  – синхронна частота обертання двигуна, об/хв;

$P_n$  – номінальна потужність двигуна, кВт;  
 $\eta$  – ККД двигуна, %;  
 $2p$  – кількість полюсів;  
 $\cos\varphi$  – коефіцієнт потужності;  
 $X_\mu$  – індуктивний опір від головного магнітного потоку двигуна, в.о.;  
 $R_1'$  – активний опір обмотки статора, в.о.;  
 $X_1'$  – індуктивний опір розсіювання обмотки статора, в.о.;  
 $R_2''$  – приведений активний опір обмотки ротора до обмотки статора, в.о.;  
 $X_2''$  – приведений індуктивний опір розсіювання обмотки ротора до обмотки статора, в.о.;  
 $R''_{2\pi}$  – приведений активний опір обмотки ротора до обмотки статора з урахуванням витіснення струму у стрижнях білячої клітини, в.о.;  
 $R_{к.п}$  – активний опір короткого замикання, в.о.;  
 $X_{к.п}$  – індуктивний опір короткого замикання, в.о.;  
 $m_n, m_m, m_k$  – коефіцієнти відношення пускового, мінімального та максимального моментів до номінального відповідно, в.о.;  
 $S_{ном}$  – номінальне ковзання асинхронного двигуна, %;  
 $S_k$  – критичне ковзання асинхронного двигуна, %;  
 $J$  – момент інерції ротора, кг · м<sup>2</sup>;  
 $t_n$  – час пуску двигуна, с;

Проведемо розрахунки абсолютних параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна, шляхом переходу з Г-подібної схеми до Т-подібної, та відносних до абсолютних.

Для цього розраховуємо номінальний фазний струм  $I_{н.ф.}$  для АД за формулою:

$$I_{н.ф.} = \frac{P_n}{3 \cdot U_{н.ф.} \cdot \cos\varphi \cdot \eta}, \quad (3.1)$$

де  $I_{н.ф.}$  – середньоквадратичний струм, А;

$U_{н.ф.}$  – середньоквадратична фазна напруга на статорі, В;

$$I_{н.ф.} = \frac{7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,86 \cdot 0,875} = 15,101 \text{ А}$$

Розрахуємо поправочний коефіцієнт для перерахунку параметрів із Г-подібної до Т-подібної схеми, формула (3.2):

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{X'_1}{X_\mu}}, \quad (3.2)$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{0,085}{3,0}} = 1,0276$$

Приводимо значення активних і індуктивних опорів ротора та статора до значень Т-подібної схеми:

$$r'_1 = \frac{R'_1}{\sigma_1}, \quad (3.3)$$

$$x'_1 = \frac{X'_1}{\sigma_1}, \quad (3.4)$$

$$r''_2 = \frac{R''_2}{\sigma_1}, \quad (3.5)$$

$$x''_2 = \frac{X''_2}{\sigma_1}, \quad (3.6)$$

Підставимо значення та отримаємо:

$$r'_1 = \frac{0,048}{1,0276} = 0,0467$$

$$x'_1 = \frac{0,085}{1,0276} = 0,0827$$

$$r_2'' = \frac{0,033}{1,0276^2} = 0,0313$$

$$x_2'' = \frac{0,15}{1,0276^2} = 0,142$$

Перераховуємо відносні величини в абсолютні, за допомогою наступних формул:

$$r_1 = \frac{r_1' \cdot U_{\text{н.ф.}}}{I_{\text{н.ф.}}}, \quad (3.7)$$

$$x_1 = \frac{x_1' \cdot U_{\text{н.ф.}}}{I_{\text{н.ф.}}}, \quad (3.8)$$

$$r_2 = \frac{r_2'' \cdot U_{\text{н.ф.}}}{I_{\text{н.ф.}}}, \quad (3.9)$$

$$x_2 = \frac{x_2'' \cdot U_{\text{н.ф.}}}{I_{\text{н.ф.}}}, \quad (3.10)$$

В результаті розрахунків отримаємо:

$$r_1 = \frac{0,0467 \cdot 220}{15,101} = 0,6804 \text{ Ом}$$

$$x_1 = \frac{0,0827 \cdot 220}{15,101} = 1,205 \text{ Ом}$$

$$r_2 = \frac{0,0313 \cdot 220}{15,101} = 0,456 \text{ Ом}$$

$$x_2 = \frac{0,142 \cdot 220}{15,101} = 2,0687 \text{ Ом}$$

Використовуючи пакет MATLAB побудуємо механічні характеристики обраних двигунів (рис. 3.2 – 3.7).

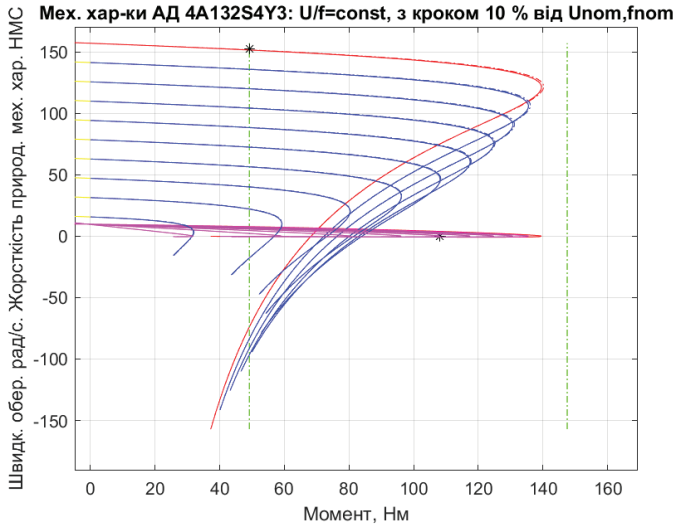


Рисунок 3.2 – Механічні характеристики двигуна при  $U/f = \text{const}$

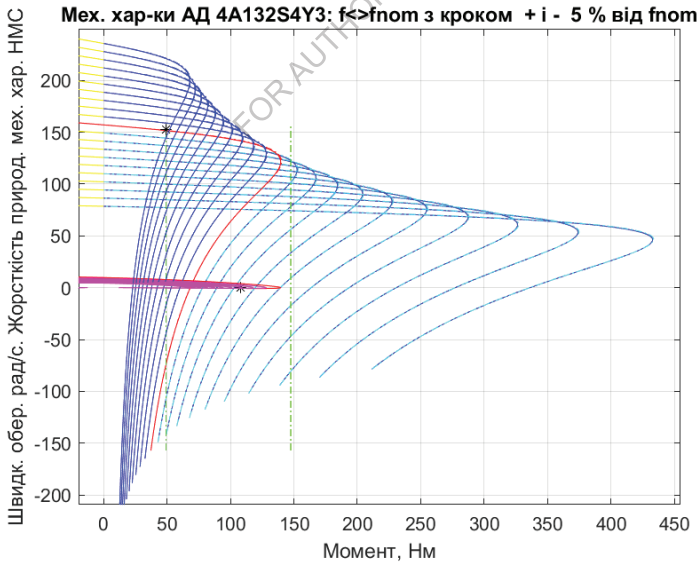


Рисунок 3.3 – Механічні характеристики двигуна при  $f < f_{ном}$

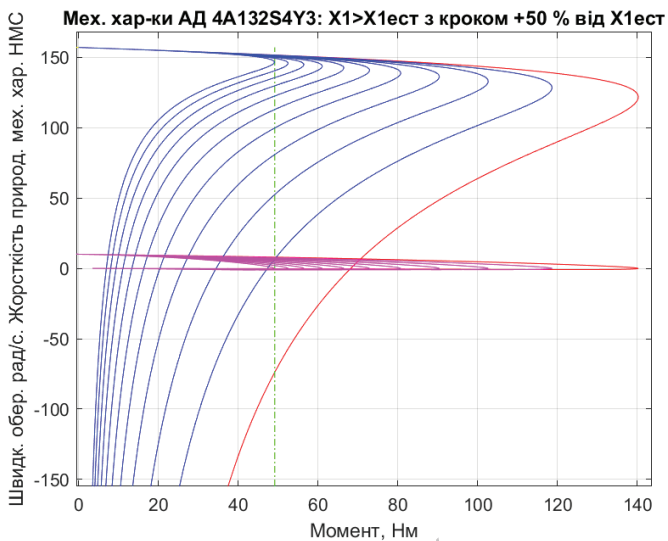


Рисунок 3.4 – Механічні характеристики двигуна при  $X_1 > X_{1\text{ест}}$

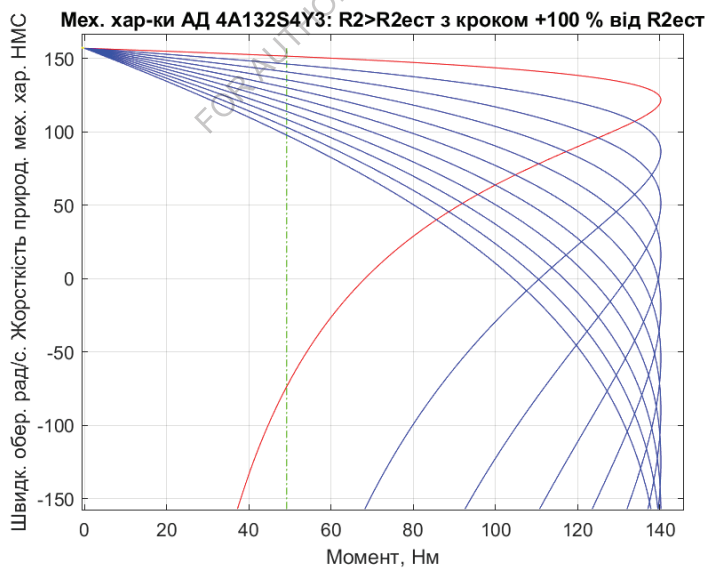


Рисунок 3.5 – Механічні характеристики двигуна при  $R_2 > R_{2\text{ест}}$

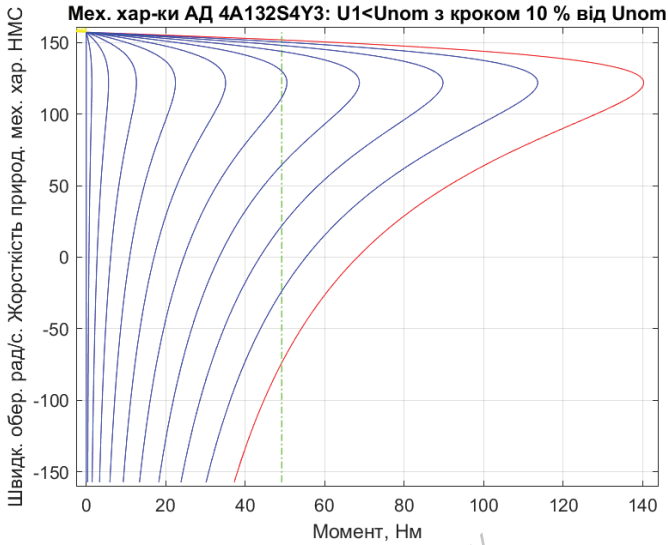


Рисунок 3.6 – Механічні характеристики двигуна при  $U_1 < U_{ном}$

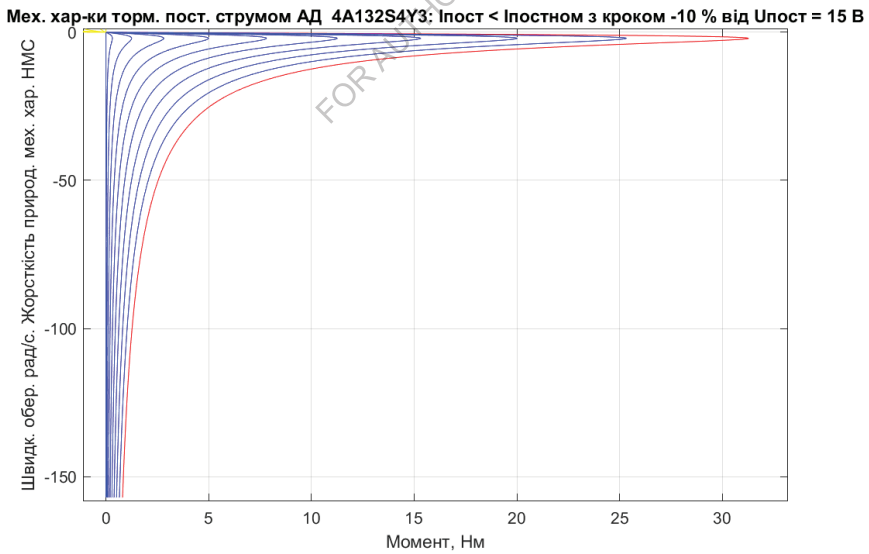


Рисунок 3.7 – Механічні характеристики двигуна при  $I_{пост} < I_{пост.ном}$

Розрахуємо жорсткість за формулою:

$$\beta = \frac{2 \cdot M_{\text{кр}}}{\omega_{\text{син}} \cdot S_{\text{кр}}}, \quad (3.11)$$

Визначимо кутову частоту обертання холостого ходу по формулі:

$$\omega_{\text{син}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{син}}}{30}, \quad (3.12)$$
$$\omega_{\text{син}} = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 157 \text{ c}^{-1}$$

Далі визначимо критичний момент за формулою:

$$M_{\text{кр}} = m_{\text{кр}} \cdot M_{\text{ном}}, \quad (3.13)$$

Номінальний момент розраховується за формулою:

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}}, \quad (3.14)$$

Номінальна кутова швидкість обертання розраховується за формулою (3.15):

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30}, \quad (3.15)$$

Номінальна частота обертання визначається по формулі:

$$n_{\text{ном}} = n_{\text{син}}(1 - s_{\text{ном}}), \quad (3.16)$$

Підставимо всі відомі значення та розрахуємо дані величини.

$$n_{\text{ном}} = 1500(1 - 0,029) = 1456 \frac{\text{об}}{\text{хв}},$$

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot 1456}{30} = 152 \text{ с}^{-1},$$

$$M_{\text{ном}} = \frac{7500}{152} = 49,342 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{\text{кр}} = 3,0 \cdot 49,342 = 148,026 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$\beta = \frac{2 \cdot 148,026}{157 \cdot 0,195} = 9,67 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}.$$

Розрахуємо механічну постійну часу за формулою:

$$T_M = \frac{J}{\beta}, \quad (3.17)$$

$$T_M = \frac{0,028}{9,67} = 0,0029 \text{ с}.$$

Розрахуємо електромеханічну постійну часу за формулою:

$$T_e = \frac{1}{\omega_{\text{ел.ном}} \cdot S_{\text{кр}}}, \quad (3.18)$$

$$T_e = \frac{1}{157 \cdot 0,195} = 0,0327 \text{ с}$$

Розрахуємо частоту демпфированого резонансу за формулою:

$$f_{\text{демпф}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{T_e \cdot T_M}}, \quad (3.19)$$

$$f_{\text{демпф}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{0,0029 \cdot 0,0327}} = 16,344 \text{ Гц}$$