

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ ТА МЕХАТРОНІКИ



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи бакалавра на тему:

**«Модернізація електроприводу транспортера тунельної
хлібопекарської печі»**

Здобувач: Попазов М.І.

IV курсу, групи АЕМ-40

Керівник: доцент Бабіч В.Ф.

Кваліфікаційна робота бакалавра допускається до захисту.

Рішення кафедри від 17.06.2024 р., протокол № 12.

Завідувач кафедри ЕтаМ _____ Петро ОСАДЧУК

ОДЕСА 2024

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Автоматизації та робототехніки

Кафедра: Електромеханіки та мехатроніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Галузь знань: 14 – Електрична інженерія

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма: Електромеханічні системи з інтелектуальним керуванням

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри ЕтаМ

д.т.н., доц. Осадчук П.І.

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

здобувачу вищої освіти

Попазову Михайлу Івановичу

Тема роботи: «Модернізація електроприводу транспортера тунельної хлібопекарської печі»

Керівник роботи: Бабіч Владислав Федорович, к.т.н., доцент.

2 Затверджено наказом ОНТУ № 797-03 від 19.12.2023 р.

Строк подання студентом роботи: 07.06.2024 р.

3 Вихідні дані до роботи: Хлібопекарська піч типу БН-25, продуктивність – 300-550 кг хліба/год, потужність двигуна – до 1,5 кВт.

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

Вступ. 1. Загальна характеристика роботи. Актуальність теми. Об'єкт і мета роботи.

2 Розрахунково-конструкторська частина. Опис технологічної схеми випікання хлібопекарських виробів. Загальна характеристика хлібопекарської печі, як об'єкта управління. Опис принципу дії, конструкції та кінематичної схеми привода хлібопекарської печі. Параметрична схема та методи регулювання швидкості обертання електроприводу конвеєра хлібопекарської печі. Формулювання вимог до електроприводу конвеєра хлібопекарської печі, обґрунтування типу двигуна, розрахунок його потужності. Розрахунок статичних характеристик двигуна.

3 Дослідження роботи електроприводу конвеєра хлібопекарської печі на моделі. Обґрунтування вибору, розробка структурних і функціональних схем та розрахунок параметрів окремих елементів системи електроприводу конвеєра хлібопекарської печі. Опис системи ПЧ-АД. Моделювання динамічних режимів електромеханічної системи електроприводу хлібопекарської печі до і після модернізації.

4. Організація та технологія монтажу, ремонту і обслуговування та техніка безпеки праці при обслуговуванні електроприводу конвеєра хлібопекарської печі.

5 Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу.

6. Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями.

Список використаних джерел. Додатки.

5 Перелік демонстраційного матеріалу: слайди презентації (12 шт.): 1 Титульний. 2 Мета, задачі, методи. 3 Технологічна схема хлібопекарської печі. 4 Розрахунок потужності двигуна, технічні характеристики. 5 Статичні характеристики електроприводу. 6 Структурна схема перетворювача частоти. 7 Принципова електрична схема силової частини. 8 Модель електроприводу конвеєра хлібопекарської печі з прямим пуском. 9 Результати моделювання

приводу з прямим пуском. 10. Модель модернізованого електроприводу конвеєра хлібопекарської печі. 11 Результати моделювання приводу після модернізації. 12 Висновки.

6 Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7 Дата видачі завдання: 05.02.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів	Прим.
1	Вступ. Загальна характеристика роботи. Актуальність теми. Об'єкт і мета роботи.	05.04.2024	
2	Розрахунково-конструкторська частина. Опис технологічної схеми випікання хлібопекарських виробів. Загальна характеристика хлібопекарської печі, як об'єкта управління. Опис принципу дії, конструкції та кінематичної схеми приводу хлібопекарської печі. Параметрична схема та методи регулювання швидкості обертання електроприводу конвеєра хлібопекарської печі. Формулювання вимог до електроприводу конвеєра хлібопекарської печі, обґрунтування типу двигуна, розрахунок його потужності. Розрахунок статичних характеристик двигуна.	30.04.2024	
3	Дослідження роботи електроприводу конвеєра хлібопекарської печі на моделі. Обґрунтування вибору, розробка структурних і функціональних схем та розрахунок параметрів окремих елементів системи електроприводу конвеєра хлібопекарської печі. Опис системи ПЧ-АД. Моделювання динамічних режимів електромеханічної системи електроприводу хлібопекарської печі до і після модернізації.	25.05.2024	
4	Організація та технологія монтажу, ремонту і обслуговування та техніка безпеки праці при обслуговуванні електроприводу конвеєра хлібопекарської печі.	03.06.2024	
5	Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу.	10.06.2024	
6	Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями.		
7	Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра	17.06.2024	
8	Перевірка роботи на добросовісність. Рецензування роботи	18.06.2024	
9	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	25.06.2024	

Здобувач-дипломник _____ Попазов М.І.

Керівник _____ Бабіч В.Ф.

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної добросовісності.

Здобувач-дипломник _____ Попазов М.І.

РЕФЕРАТ

Попазов М.І. «Модернізація електроприводу транспортера тунельної хлібопекарської печі». Кваліфікаційна робота бакалавра. Одеса: ОНТУ, 2024. – 69 с. Іл.: 24. Табл.: 7.

У кваліфікаційній роботі описано автоматизований електропривод конвеєра тунельної хлібопекарської печі, області його застосування та конструктивні особливості. Сформульовано вимоги до електроприводу, розраховано навантаження та обрано двигун для приводу конвеєра тунельної хлібопекарської печі.

Вибрано систему електроприводу «перетворювач частоти - асинхронний двигун», обрано та досліджено закон керування за допомогою перетворювача частоти.

Розраховано електричні параметри схеми вмикання двигуна. Змодельовано перехідні процеси двигуна при прямому пуску та в комбінації з перетворювачем частоти, побудовано механічні та електромеханічні статичні характеристики.

Розраховано економічний ефект від модернізації електроприводу конвеєра випалювальної печі та наведено заходи з охорони праці та техніки безпеки.

Ключові слова: хлібопекарська піч, конвеєр тунельної печі, автоматизований електропривод, перетворювач частоти, математична модель, частотне регулювання обертів, механічна характеристика.

ABSTRACT

Popazov M.I. "Modernization of the electric drive of the transporter of the tunnel bakery oven". Bachelor's thesis. Odesa: ONTU, 2024. - 69 p. Fig .: 24. Table: 7.

The qualification work describes the automated electric drive of the conveyor of the tunnel bakery oven, its areas of application and design features. The requirements for the electric drive were formulated, the load was calculated, and the motor for driving the tunnel furnace conveyor was selected.

The electric drive system "frequency converter - asynchronous motor" was selected, the control law using the frequency converter was selected and investigated.

The electrical parameters of the engine start-up circuit are calculated. Transient processes of the engine during direct start and in combination with a frequency converter were simulated, mechanical and electromechanical static characteristics were constructed.

The economic effect of the modernization of the electric drive of the conveyor of the firing furnace is calculated, and measures for occupational health and safety are given.

Key words: bakery oven, tunnel oven conveyor, automated electric drive, frequency converter, mathematical model, frequency control of revolutions, mechanical characteristics.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА.....	10
1.1 Типи та класифікація хлібопекарських агрегатів	10
1.2 Принципи роботи і конструкції промислових хлібопекарських печей тунельного типу	13
2 РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	22
2.1 Вимоги до автоматизованих електроприводів конвеєрів хлібопекарських печей	22
2.2 Розрахунок кінематичної схеми станції приводу конвеєра печі	23
2.3 Розрахунок потужності приводної станції конвеєра	27
2.4 Вибір перетворювача частоти.....	29
2.5 Визначення інтервалу частот інвертора.....	31
2.6 Розрахункове визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна.....	32
2.5 Побудова механічної характеристики електропривода	38
2.6 Побудова природної механічної характеристики двигуна	39
2.7 Побудова сімейства механічних характеристик.....	41
2.8 Побудова природної електромеханічної характеристики двигуна.....	42
2.9 Схема релейно-контакторного управління електроприводом конвеєра хлібопекарської печі	44
2.10 Вибір перетворювача частоти.....	Ошибка! Закладка не определена.
3.1 Дослідження динамічних характеристик асинхронного двигуна при прямому пуску.....	46
3.2 Дослідження динамічних характеристик асинхронного електропривода з широотно-імпульсним перетворювачем частоти (АД-ПЧ)	49

					КРБ.ЕтаМ.141.797-03.1.4		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Попазов М.І.			Літ.	Аркуш	Аркушів
Керівник		Бабіч В.Ф.				6	
					ОНТУ, АЕМ-40		
Зав.кафедри		Осадчук П.І.					

4 ОРГАНІЗАЦІЙНА ТА ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	51
4.1 Організація і технологія монтажу електроприводів конвеєрів хлібопекарських печей.....	51
4.2 Організація і технологія ремонту електроприводів конвеєрів хлібопекарських печей.....	55
4.3 Організація і технологія технічного обслуговування електроприводів конвеєрів хлібопекарських печей.....	57
4.4 Організація охорони праці та безпеки під час обслуговування хлібопекарських печей і конвеєрів.....	59
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	62
5.1 Розрахунок витрат електроенергії існуючим електроприводом конвеєру печі	62
5.2 Розрахунок витрат в проектному варіанті (з ПЧ-АД)	63
6 РЕЗУЛЬТАТИВНА ЧАСТИНА.....	67
Висновки та рекомендації, зроблені в кваліфікаційній роботі.....	67
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68

ВСТУП

У хлібопекарській галузі великі хлібозаводи виробляють близько 71 % від загального обсягу готової продукції, пекарні супермаркетів – 14...20 %, а малі пекарні – 12...16 %.

Асортимент хлібобулочних виробів охоплює близько 1 000 найменувань. Це хліб з пшеничного борошна, житнього борошна, суміші житнього та пшеничного борошна, хліб з різними видами випічки, баранки, крекери та харчові добавки.

Особлива увага в хлібопекарській промисловості зараз приділяється розробці та впровадженню нових інноваційних технологій для підвищення якості хлібобулочних виробів та розширення асортименту продукції, що випускається.

Оскільки якість продукції має значний вплив на споживчі переваги, то вирішенню проблем, пов'язаних з якістю хлібобулочних виробів, приділяється значна увага. У сучасній хлібопекарській промисловості процес випікання в різних хлібопекарських печах великої потужності відіграє важливу роль у виробництві високоякісних хлібобулочних виробів.

Хлібопекарські печі є основною одиницею обладнання в лініях виробництва хлібобулочних і кондитерських виробів. Тепло і волога в камері печі перетворюють тісто на кінцевий продукт. Таким чином, всі теплофізичні, мікробіологічні, біохімічні та колоїдні процеси, пов'язані з виробництвом хлібобулочних виробів, завершуються в хлібопекарському обладнанні.

Найбільш продуктивними є тунельні хлібопекарські печі, де процес випікання відбувається на рухомій деці – металевому сітчастому конвеєрі, який переміщує тістові заготовки через камеру з контрольованою температурою і вологістю. Ці конвеєри мають електричний привод, і час випікання може варіюватися від кількох хвилин до години.

Сучасні частотно-керовані електроприводи для конвеєрів хлібопекарських печей складаються з електродвигуна змінного струму, керованого електричного перетворювача і програмованого мікроконтролера. Структура таких приводів, що широко використовуються, виглядає наступним чином: мережеве джерело живлення - некерований випрямляч - шина постійного струму з конденсатором -

інвертор напруги на транзисторному модулі з широтно-імпульсною модуляцією, керований процесором - асинхронний двигун з короткозамкненим ротором.

Завдяки малій вазі перетворювача, повному захисту, можливості повної діагностики стану приводу, управлінню від цифрових і аналогових сигналів, простому і зручному програмуванню, можливості синхронізації спільної роботи взаємодіючих електроприводів в технічних процесах і багатьом іншим споживчим якостям, частотно-регульовані асинхронні електроприводи є перевагою в класі електроприводів з масовим керуванням.

Поєднання різних апаратних засобів і вбудованого програмного забезпечення в перетворювачі дозволяє створювати різноманітні конфігурації приводів, від найпростіших розімкнених систем до складних замкнених систем, які керують швидкістю, положенням і технологічними параметрами.

Системи частотно-скалярного керування без зворотного зв'язку за швидкістю використовуються, коли до приводу не пред'являються жорсткі вимоги до діапазону регулювання швидкості і точності. Для великих діапазонів регулювання швидкості та високих вимог до динаміки використовується частотно-векторне керування без датчиків та з датчиками зворотного зв'язку.

Метою даної кваліфікаційної роботи є модернізація існуючого некерованого електроприводу конвеєра тунельної хлібопекарської печі, що знаходиться в експлуатації, на сучасний електропривод з частотним керуванням, який забезпечить: збільшення діапазону регулювання швидкості; плавність розгону та гальмування; економію електроенергії.

Задачами роботи є: визначення параметри печі і діапазон зміни швидкості транспортера; розрахунок потужність та вибір двигуна; обґрунтування вибор типу електропривода; вибір перетворювач частоти; вибір системи керування двигуном; розробка імітаційних моделей і дослідження динамічних режимів роботи електроприводу.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Типи та класифікація хлібопекарських агрегатів

Хлібопекарські агрегати (далі «хлібопекарські агрегати», «печі») є основною одиницею обладнання на хлібопекарських виробничих лініях. Під впливом тепла і вологи в камері печі тісто перетворюється на кінцевий продукт. Таким чином, в хлібопекарському агрегаті завершується весь комплекс теплофізичних, мікробіологічних, біохімічних і колоїдних процесів, пов'язаних з виробництвом хлібобулочних виробів.

Складність хлібопекарського агрегату в порівнянні з іншими типами обладнання пояснюється специфікою численних процесів, що відбуваються в ньому. До них відносяться тепломасообмін в тісті під час випікання, горіння палива і теплообмін в печі, теплообмін в нагрівальних каналах і робочій камері, вологотеплові процеси в зоні зволоження і аеродинамічні процеси в зоні випікання.

Хлібопекарські печі класифікуються за низкою критеріїв [3]:

- Технологія (універсальна або обмежена), яка визначає асортимент продукції, що випікається.
- Спосіб отримання тепла: індивідуальні та централізовані (газові, електричні та ін.) з однією або декількома топковими камерами в одній печі.
- Спосіб обігріву пекарної камери. Виходячи з цього, печі можна розділити на наступні категорії:
 - жарові печі: паливо спалюється в камері випалу;
 - каналні печі;
 - парові/водяно-парові печі, де тепло передається через нагрівальні трубки (трубки Перкінса);
 - зі змішаним нагрівом (з використанням парових трубок, водяних трубок і водяних каналів);
 - конвекційним нагрівом (нагріте повітря циркулює в камері випалу);
 - з електричним нагрівом;

- з інфрачервоним нагрівом;
 - з мікрохвильовим нагрівом тощо.
 - Ступінь механізації: типи лотків і конвеєрів – нерухомі і рухомі лотки; ланцюгові, пластинчасті і люлькові конвеєри; стрічкові або сітчасті (сталева стрічка, сітчаста стрічка) тощо.
 - Ступінь автоматизації виробничої лінії: складається з печей з конвеєрною підлогою, конвеєрних шаф, пристроїв для нарізки і завантаження виробів в піч і з печі, пристроїв автоматичного регулювання швидкості конвеєра, параметрів пароповітряного середовища в пекарній камері тощо.
 - Конструкція хлібопекарської камери: тупикова, наскрізна (тунельна).
- Класифікація хлібопекарських печей за площею подів наведена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Класифікація хлібопекарських печей за площею поду

Група	Розмір поду		Асортимент продукції, що випускається
	Площа, м ²	Ширина, м	
I	4	0,8	Подовий і формовий
II	8	1,4-1,5	Подовий, формовий та баранкові вироби
III	16	1,5; 1,92 і 2,1	Те ж
IV	25	2,1; 2,65 і 3,0	Подовий і формовий
V	40, 50, 80 100, 125	1,9; 2,1; 2,65; 3,0	Те ж

Таким чином, в промисловості застосовуються найрізноманітніші хлібопекарські печі, але окрема піч має загальні елементи: каркас і футерування печі, пекарна камера, теплогенератор, теплообмінник, конвеєри, допоміжні пристрої та обладнання (вентилятори і тягодувки, зволожувачі пароповітряного середовища в агрегаті, водяні та повітряні підігрівачі, завантажувально-розвантажувальні механізми, розстійні шафи, інтегровані з піччю, тощо).

Каркас печі – металева конструкція, що складається зі стійок і балок, до яких кріпляться інші елементи пічного агрегату, в тому числі пічний конвеєр і футерування.

Футерування печі – це стіни печі та димохід, викладені з цегли та теплоізоляції. Залежно від місця використання, до футерування висуваються вимоги щодо вогнестійкості, герметичності, ізоляційних характеристик, механічної міцності та ефективності. Зовнішні стіни печі покриваються глазурованою плиткою.

Основною частиною печі є пекарська камера. Завантаження і вивантаження виробів здійснюється з одного боку в тупикових печах і з протилежного боку в наскрізних (тунельних) печах. Пекарні камери містять механізми і пристрої, такі як конвеєри, теплообмінні пристрої, такі як паро- і водопровідні труби, водяні канали, електронагрівачі, пальники і зволожуючі пристрої. Пекарні камери герметичні і сконфігуровані таким чином, щоб обмежити вентиляцію газового середовища.

Теплогенеруючі пристрої різняться і залежать від джерела енергії. Більшість випалювальних печей, що використовують тверде, рідке або газоподібне паливо, мають топку (ону або кілька топок на пекарну піч). Обпалювальні топки печей мають невеликі розміри і споживають менше традиційного палива (10-75 кг/год).

Печі можна розділити на дві групи:

- шарові – для спалювання твердого палива;
- камерні – для спалювання газоподібного та рідкого палива.

Існує велика різноманітність теплообмінних пристроїв у хлібопекарських печах, найпоширенішими з яких є печі з проточними теплообмінними пристроями.

Для переміщення випечених виробів через пекарну камеру використовуються конвеєри, які бувають різних конструкцій: двострічкові, тристрічкові, чотирістрічкові та п'ятистрічкові. Поди у двострічкових конвеєрів включають пластинчасті конвеєри, стрічкові конвеєри (сталеві, сітчасті та стрічкові) та подово-люлечні. Три-п'ятистрічкові конвеєри мають лише подово-люлечні.

1.2 Принципи роботи і конструкції промислових хлібопекарських печей тунельного типу

1.2.1 Принцип роботи та конструкції тунельних печей

Наскрізні тунельні печі мають велику продуктивність з автоматичним регулюванням теплового режиму і використовуються головним чином на великих хлібокомбінатах.

На сучасних хлібо заводах використовуються тунельні печі з рециркуляцією продуктів згоряння як іноземних виробників BN, Termoelectro, PPC, PPP, Gostol, Minel, Maxoflex тощо, а також ті печі, що раніше випускалися ПХС-25М і ПХС-40, БН-25 і БН-50, РЗ-ХПУ- 25 і РЗ-ХПУ- 50, Г4-ПХЗС-25 та ін. [3].

Переваги тунельних печей:

- каркасний металевий корпус замість цегляного;
- легка та ефективна мінераловатна ізоляція;
- запобігання накопиченню золи на стінках нагрівальних каналів завдяки використанню газоподібного та рідкого палива;
- час нагрівання (1...1,5 годин) в кілька разів коротший, ніж у цегляних печей;
- низька теплова інерційність печі;
- можливість використання відносно простих автоматичних систем регулювання температури в печі;
- можливість роботи в одну або дві зміни;
- економічність;
- може бути встановлена на будь-якому поверсі будівлі (а не тільки на першому, як у цегляній кладці);
- рециркуляційні системи опалення можуть використовувати вузькі металеві канали з низьким термічним опором;
- паралельний розподіл продуктів згоряння по каналах (і зонах) дозволяє регулювати тепловий режим (в тому числі нижній і верхній) кожного каналу (зони) індивідуально;

- кондиціювання для оптимізації теплового режиму випікання;
- компактність пічної системи;
- посилений конвективний теплообмін в каналах при рециркуляції відхідних газів;
- можливість випікання широкого асортименту продукції;
- можливість організації складних механізованих потокових ліній з механізованим завантаженням і вивантаженням продукції;
- висока технологічність заводської збірки печі завдяки секційному (блочному) виконанню;
- короткий час введення в експлуатацію та налагодження;
- можливість побудови печей різних розмірів завдяки нарощуванню секцій;
- значне покращення умов праці та обслуговування печі при використанні сітчастих конвеєрів замість громіздких ланцюгових або люлькових конвеєрів в тунельних пекарних камерах;
- покращення санітарно-гігієнічні умови в робочій зоні тощо.

Однак, крім відмінних якостей цих печей, є і суттєві *недоліки*:

- висока металоємність печі;
- висока ціна;
- відсутність твердого палива;
- висока витрата повітря в димових газах через нещільності в системі опалення та повітрозабору;
- вищі вимоги до виробничих площ порівняно з багаторядними цегляними печами (у 2...4 рази).

Вимоги до хлібопекарських печей:

- печі повинні відповідати розмірам і параметричним рядам за ДСТ 8032-56 «Кращі числа і ряди кращих чисел» з відхиленнями не більш $\pm 15\%$.
- печі повинні виготовлятися в каркасному виконанні, що забезпечує транспортабельність і герметичне з'єднання.
- печі повинні мати надійне заземлення.

- в якості пода печі можуть бути використані: листовая сталь; металева сітка; сітчасті, пластинчасті і колискові конвеєри.
- температура зовнішньої поверхні облицювання печі не повинна перевищувати 45 °С, температура підшипникових вузлів – не більш 60 °С.
- у системі приводу конвеєра печі повинний бути передбачений ручний (аварійний) привод із зусиллям не більше 15 кг.

1.2.2 Хлібопекарська тунельна піч БН-25

Тунельні печі БН (рисунок 1.2) з сітчастими конвеєрами з площею поду 25, 40 і 50 м² встановлювалися з 1960-х років [3]. Вони були виготовлені компанією Spezial (Німеччина).

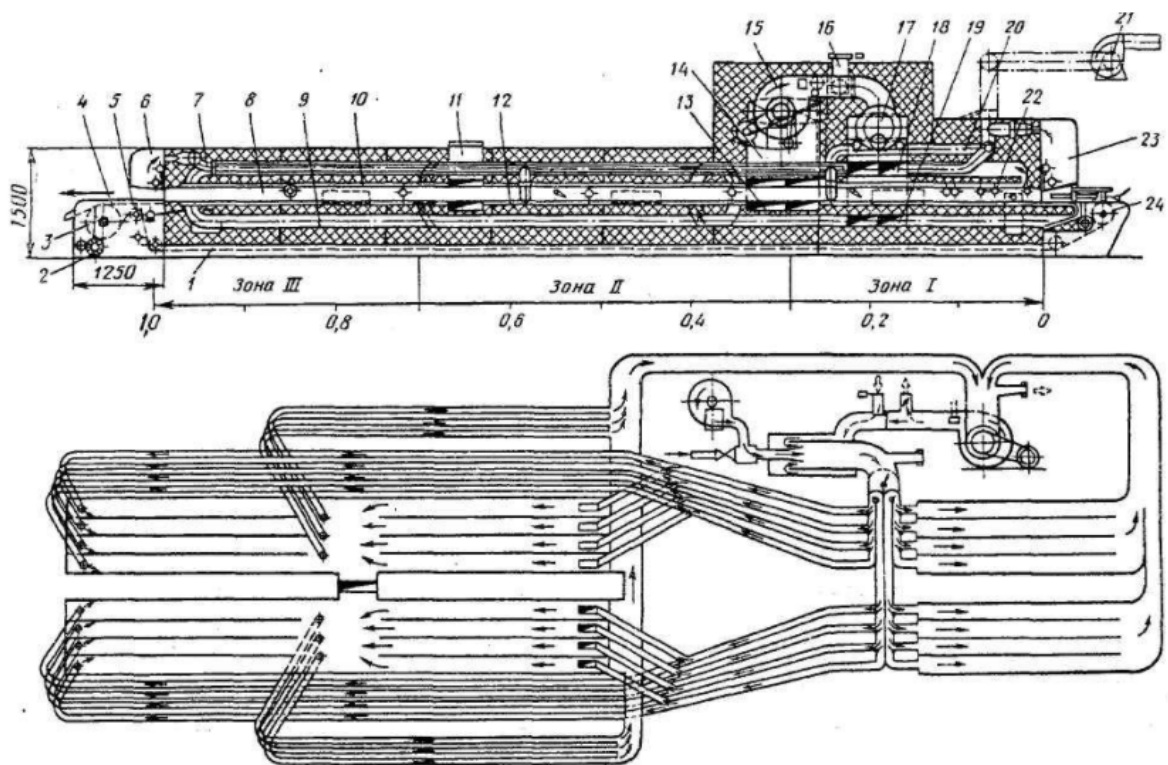


Рисунок 1.2 – Схема хлібопекарської печі БН-25 та її системи опалення

Система опалення – циклотермічна (рециркуляція відпрацьованих газів у металевому каналі), з одним пальником у циркуляційному контурі, розташованим над випалювальною камерою; у моделях БН-25 одна топкова камера обслуговувала три зони нагріву, а в моделях БН-40 і БН-50 – дві топкові камери

обслуговували п'ять умовних зон нагріву, перша топка обслуговувала одну зону, друга – чотири зони. Паливо – природний газ, генераторний газ або рідке паливо.

Піч БН-25 має вісім секцій, кожна з яких має довжину 1,5 м, а тунельна пекарна камера 8 має висоту 200 мм, довжину 12 м і ширину 2,2 м. Металева стінка в нижній частині камери має товщину 3 мм і передає тепло від нижнього нагрівального каналу 12, по якому рухається металева конвеєрна сітка 4 шириною 2,1 м, що слугує робочим подом печі. Верхня і бічні стінки камери виготовлені з металевих листів товщиною 1,5 мм. Над верхньою стінкою пекарної камери розташований верхній нагрівальний канал 10.

Під приводним барабаном 3 з боку вивантаження розташована циліндрична щітка 2 для очищення конвеєра і автоматичний важільний натягувач вантажу 5. Неробоча гілка конвеєра 1 проходить під піччю. Натяжний барабан конвеєра 24 розташований в завантажувальній частині печі, а для усунення перекосу сітки використовується спеціальний механізм, завдяки якому натяг може здійснюватися з обох боків натяжного барабана.

З циліндричної камери згоряння 17 відпрацьовані газы потрапляють в камеру змішування, де змішуються з відпрацьованими газами, що подаються рециркуляційним вентилятором 15. Камера змішування з'єднана з бічними каналами і розподільчими коробками 18 і 19, де газы за допомогою шиберів розподіляються по паралельних каналах і трубах 9 по ширині обпалювальної камери. Розрідження в печі регулюється шиберами в каналах, що з'єднують систему з витяжною трубою 16. Димові газы, що відводяться каналами, збираються в збірнику 13, з'єднаному з бічним збірним каналом 14, який з'єднаний з всмоктувальним патрубком рециркуляційного вентилятора (система димовидалення). Таким чином, частина димових газів повертається в камеру змішування для рециркуляції відповідно до коефіцієнта рециркуляції [5], а частина відводиться в димохід. Система повітропроводів має спеціальні дуттьові сопла 11 з клапанами, які покриті шаром азбестового листа для запобігання руйнуванню конструкції печі.

Система парозволоження 22 має шість перфорованих горизонтальних труб, накритих ковпаками. Надлишок пари і пара видаляються системою вентиляторів

21 і вентиляційних труб 7 і 20, які з'єднані з витяжними парасольками 6 і 23 і пекарною камерою печі трубами з поворотними шиберами.

З боку завантаження і вивантаження пекарної камери є металеві шторки, які регулюють висоту отвору камери відповідно до висоти продукту, а також пекарна камера обладнана поворотними заслінками для зменшення вентиляційних втрат в пекарній камері.

Пекарна камера має три оглядові люки з термостійким склом і освітленням, дилатометричні термометри і хромель-алюмелеві термопари для індикації температури середовища пекарної камери в кожній зоні.

Привод конвеєра печі складається з редуктора, варіатора швидкості і тришвидкісного електродвигуна потужністю 1,0, 0,8 і 0,6 кВт.

Температура печі автоматично регулюється двопозиційним регулятором температури нагрітих газів, що виходять з камери змішування. Піч обладнана запобіжником для захисту системи від перегріву. Температура нагрітих газів в печі може підтримуватися на заданому рівні, а необхідні межі регулювання встановлюються за допомогою панелі управління.

Рама пекарної камери обшита металевим листом товщиною 1,25 мм. Простір між зовнішньою товщиною і пекарною камерою заповнений ізоляцією з мінерального скла і шлаковою ватою (біля топки).

Кінематична схема механізму приводу печі показана на рисунку 1.3.

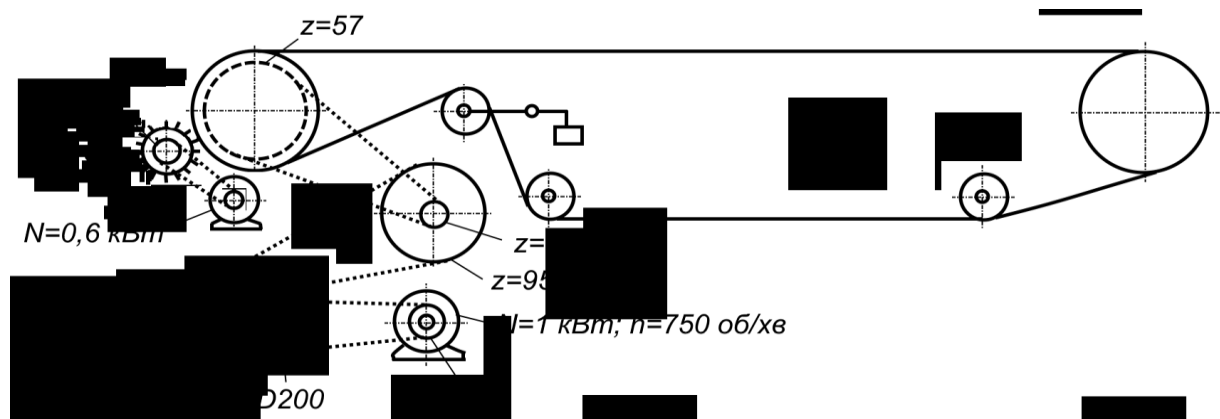


Рисунок 1.3 – Кінематична схема механізму приводу печі БН-25

Привод конвеєра печі здійснюється від електродвигуна через дві клинопасові передачі, ланцюговий варіатор, комбінований редуктор і зубчасту передачу. Конструкція приводного механізму також передбачає ручний привод. Наявність варіатора дозволяє регулювати час випікання в діапазоні 12...72 хв.

1.2.3 Хлібопекарська тунельна піч «Макіз-Мінел»

Тунельна циклотермічна піч «Макіз-Мінел» (Сербія) – це сучасна універсальна піч, призначена для безперервного випікання всіх видів хліба та хлібобулочних виробів з температурою випікання до 320 °С і тривалістю випікання 10...60 хвилин. Вироби транспортуються через пекарню камеру за допомогою металевого сітчастого конвеєра шириною 2,5 м.

Система опалення – циклотермічна (тобто відпрацьовані газы рециркулюють у металевих каналах), з одним пальником у циркуляційному контурі над пекарною камерою.

Технологічна схема хлібопекарської печі «Макіз-Мінел 15» аналогічна схемі печі БН-25. Паливо – природний газ або рідке паливо; одна топкова камера обслуговує три зони нагріву пекарної камери (рисунок 1.4).

Нижня металева стінка камери має товщину 3,5 мм і передає тепло від нижнього нагрівального каналу, по якому рухається металева сітка-конвеєр шириною 2,5 м, утворюючи робочу підлогу печі. Верхній нагрівальний канал проходить над верхньою стінкою пекарної камери.

Під приводним барабаном з боку вивантаження встановлена циліндрична щітка для очищення конвеєра і автоматичний натягувач. Неробоча частина конвеєра проходить під піччю. Натяжний барабан конвеєра розташований на завантажувальному (посадковому) майданчику печі і може бути натягнутий з обох боків спеціальним механізмом для усунення перекосів сітки.

З циліндричної камери згоряння відпрацьовані газы потрапляють в камеру змішування, де змішуються з відпрацьованими газами, що подаються рециркуляційним вентилятором.

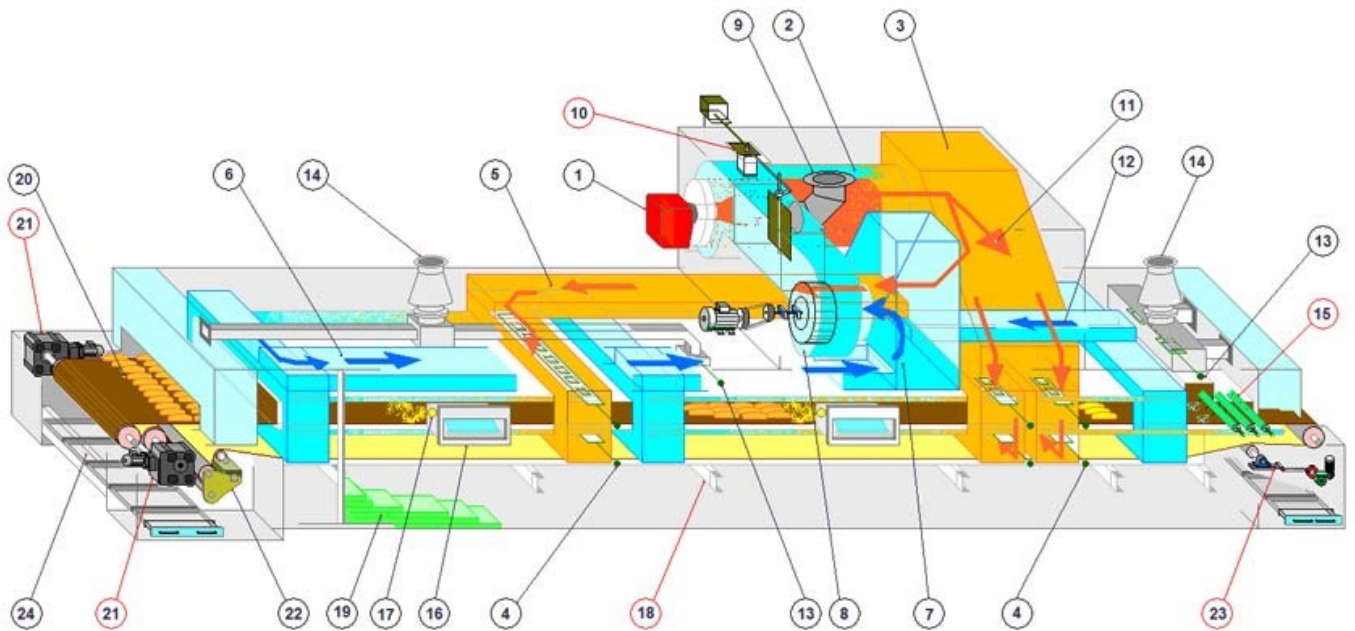


Рисунок 1.4 – Аксонометричний розріз циклотермічної однобаштової тунельної печі:
 1 – пальник; 2 – топкова камера; 3 – змішувальна камера; 4 – регулювання температури у верхньому та нижньому радіаторах; 5 – розподільний канал гарячих продуктів; 6 – зворотний канал охолоджених продуктів згоряння; 7 – збірна камера охолоджених продуктів згоряння; 8 – циклотермічний вентилятор опалювальної системи з керованими оборотами; 9 – газовідвідний канал продуктів згоряння із опалювальної системи; 10 – запобіжна віддушина; 11 – гарячі продукти згоряння; 12 – охолоджені продукти згоряння; 13 – заслінка регулювання відведення зайвої пари з пічної камери; 14 – газовідвідний канал відведення пари з пічної камери; 15 – подвійні нержавіючі парові трубки, що забезпечують 100% відділення конденсату; 16 – оглядове віконце; 17 – освітлення пічної камери; 18 – балка з ізоляційною прокладкою; 19 – термоізоляція; 20 – транспортна сітчаста стрічка; 21 – насувна коробка передач приводу стрічки; 22 – механічний натяжний пристрій для натягування стрічки за допомогою гирі; 23 – бічне регулювання стрічки; 24 – висувні уловлювачі бруду

Камера змішування з'єднана з бічними каналами і розподільними коробками, а газу розподіляються шиберами по паралельних каналах і трубах по ширині пекарної камери. Вакуум в печі регулюється заслінками в каналах, що з'єднують систему з витяжною трубою. Відпрацьовані газу, що виводяться каналами, збираються в збірнику, з'єданому з всмоктувальними патрубками рециркуляційного вентилятора (система димовидалення). Таким чином, частина відпрацьованих газів повертається в камеру змішування для рециркуляції відповідно до коефіцієнта рециркуляції, а частина відводиться в димохід. Система повітропроводів має спеціальні сопла з

клапанами і покрита азбестовими пластинами для запобігання руйнуванню конструкції печі.

Паровий зволожувач має горизонтальні труби з отворами. Надлишок пари і пара відводяться за допомогою вентилятора і системи витяжних труб, яка з'єднана з витяжною парасолькою і пекарною камерою печі трубами з розсувними шиберами.

З боку завантаження і вивантаження пекарної камери є металева завіса, яка регулює висоту отвору в камері відповідно до висоти продукту, і поворотна заслінка, яка зменшує вентиляційні втрати в пекарній камері.

Хлібопекарна камера має три оглядові люки з термостійким склом і освітленням, а дилатометричні термометри і хромель-алюмелеві термопари показують температуру середовища хлібопекарної камери в кожній зоні.

Привод конвеєра печі складається з редуктора та асинхронних електродвигунів.

Температура в печі регулюється автоматичним регулятором температури нагрітих газів, що виходять з камери змішування. В печі підтримується температура нагрітого газу на заданому рівні, а необхідні межі регулювання встановлюються пристроєм на пульті управління.

Зовнішній вигляд конвеєра печі з батонами хліба вагою 0,5 кг показана на рисунку 1.4.

Технічні характеристики печі «Макіз-Мінел 15» продуктивністю 18000 кг/добу наведені в таблиці 1.2.



Рисунок 1.4 – Розташування батонів на конвеєрі печі

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики однокупольної тунельної печі типу «Макіз-Мінел 15»

Параметри	Значення
Ширина конвеєра печі, м	2,5
Довжина поду печі, м	15
Площа поду, м ²	37,5
Встановлена потужність, кВт	8,6
Номінальна теплова потужність, кВт	463,3
Габарити корпусу печі, мм	
– загальна довжина	17830
– загальна ширина	3530
– загальна висота	3215

2 РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1 Вимоги до автоматизованих електроприводів конвеєрів хлібопекарських печей

Електропривод конвеєра хлібопекарської печі повинен відповідати наступним технічним вимогам та умовам експлуатації:

1. Конвеєр повинен мати регулювання швидкості конвеєра в межах зони регулювання швидкості конвеєра для забезпечення безперервного випікання всіх видів хліба та хлібобулочних виробів з температурою випікання до 320 °С і тривалістю випікання 10...70 хвилин.

2. Режим роботи – безперервний.

3. Частотний перетворювач встановлюється в закритому приміщенні з температурою навколишнього середовища 5...45 °С і відносною вологістю до 80 %.

4. Мережа живлення: трифазна з напругою 380 ± 10% В, частотою 50 ± 1 Гц.

5. Технічні характеристики конвеєра тунельної печі БН-25:

- тип конвеєра – горизонтальний;
- довжина горизонтальної ділянки 15 м;
- матеріал, що транспортується – 0,4 кг нарізаного хліба;
- щільність тіста $\rho = 1080 \text{ кг/м}^3$;
- продуктивність $Q = 750 \text{ кг/год}$;
- допустиме прискорення $a_{\text{доп}} = 0,2 \text{ м/с}^2$;
- швидкість конвеєра:
 - мінімальна $V_{\text{мін}} = 0,00625 \text{ м/с}$, якщо час випікання 40 хв;
 - максимальна $V_{\text{макс}} = 0,025 \text{ м/с}$, якщо час випікання 10 хв;
- кут нахилу конвеєра $\alpha = 0^\circ$;
- маса 1 погонного м сітчастої стрічки шириною 2,5 м $m_0^* = 19,5 \text{ кг/пог. м}$;
- кут охоплення приводного барабана $\alpha_{\text{п}} = 225^\circ (4,24 \text{ рад})$;
- кут охоплення натяжного барабана $\alpha_{\text{н}} = 180^\circ (\pi \text{ рад})$;
- довжини секцій конвеєра та кути їх нахилу (рисунок 2.1): $l_{12} = 0,5 \text{ м}$;
 $l_{34} = 0,6 \text{ м}$; $l_{56} = 14 \text{ м}$; $l_{78} = 15 \text{ м}$; $\beta_{12} = +45^\circ$; $\beta_{34} = -45^\circ$; $\beta_{56} = \beta_{78} = 0^\circ$.

2.2 Розрахунок кінематичної схеми станції приводу конвеєра печі

Діюча кінематична схема приводу конвеєра печі БН-25 наведена вище на рисунку 1.3 [3]. Основним її недоліком є використання варіатора, який має недостатню надійність при тривалій експлуатації, а зміна швидкості конвеєра виконується приблизно ручним налаштуванням передатного числа варіатора.

Модернізація приводу конвеєра печі БН-25 виконується заміною варіатора та ланцюгових передач на мотор-редуктор з асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором, оберти якого можливо плавно змінювати за допомогою перетворювача частоти.

Розрахунок потужності модернізованої приводної станції складається з наступних етапів [4, 5,7]:

- розрахунок кінетичних сил опору на окремих ділянках конвеєра;
- визначення результуючої сили опору руху конвеєра;
- визначення натягу тягового елемента в точках набігання та вибігання приводного барабана;
- визначення потужності приводної станції.

Схема руху конвеєра наведена на рисунку 2.1, де умовно позначені:

$T_{нб}$, $T_{зб}$ – натяг стрічки в точках обкатки і вибігу,

μ , $C_{п}$ – коефіцієнт тертя,

$K_{ві}$ – коефіцієнт кінетичного опору,

$G_{нп}$ – вага натягувача,

β , l – кут нахилу і довжина кожної секції конвеєра.

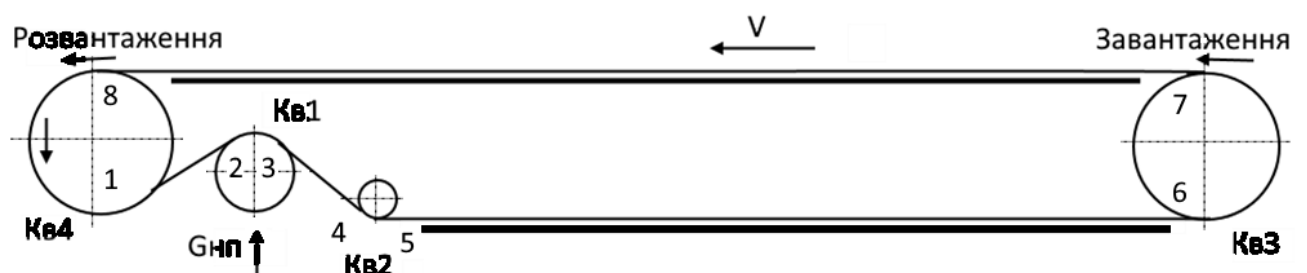


Рисунок 2.1 – Кінематична схема стрічкового конвеєра печі

Визначимо масу виробів на погонному метрі стрічкового конвеєра [7]. Ширина конвеєра $L_k = 2,5$ м, розмір нарізаного високоякісного батона масою $m_b = 0,4$ кг, довжиною $a = 29...30$ см, шириною $b = 9...10$ см, зазор між хлібинами на конвеєрі $c = 1,5...3$ см. При розташуванні виробів впоперек конвеєра, ряд виробів, які займають всю ширину конвеєра, містить $n_1 = 2,5/0,3 = 8$ шт. батонів і $n_1 - 1 = 7$ проміжків між ними (рисунок 1.4)

$$L_{\text{вир}} = a \cdot n_1 + c \cdot (n_1 - 1) = 0,3 \cdot 8 + 0,015 \cdot 7 = 2,5 \text{ м}$$

На кожний погонний метр стрічки конвеєра припадає $n_2 = 1/(b + c) = 1/0,1 = 10$ рядів продукції. Отже, маса одного батону у вигляді тіста на вході одного погонного метра стрічки конвеєра в момент подачі становить $m_t = 1,1 - m_b = 1,1 - 0,4 = 0,44$ кг (з урахуванням 10% упікання хліба)

$$m_{\text{п}}^* = m_t \cdot n_1 \cdot n_2 = 0,44 \cdot 8 \cdot 10 = 35,2 \text{ кг/м.}$$

Маса випеченого хліба на виході з печі на погонний метр стрічки конвеєра

$$m_{\text{п}}^{**} = 0,9 \cdot m_{\text{п}}^* = 0,9 \cdot 35,2 = 31,68 \text{ кг/м.}$$

Середня маса хліба в печі на погонному метрі стрічки конвеєра

$$m_{\text{п}} = (m_{\text{п}}^* + m_{\text{п}}^{**})/2 = (35,2 + 31,68)/2 = 33,44 \text{ кг/м.}$$

Знайдемо загальну масу продукту на стрічці конвеєра

$$M_{\text{п}} = l_{12} \cdot m_{\text{п}} = 15 \cdot 33,44 = 501,6 \text{ кг} \approx 500 \text{ кг.}$$

Це означає, що в середньому (без урахування часу на початкове завантаження і повне розвантаження) конвеєр робить $n_{\text{конв}} = 60/t_{\text{вип}} = 60/40 = 1,5$

обертів за годину, переміщуючи $M_p = 500$ кг виробів за один оберт. Тоді годинна і добова продуктивність хлібопекарської печі становить

$$P = n_{\text{конв}} \cdot M_{\text{п}} = 1,5 \cdot 500 = 750 \text{ кг/год} = 18000 \text{ кг/добу.}$$

Значення коефіцієнта тертя та опору руху стрічки конвеєра приймаємо за довідником [4] у таблицях П-7...П-9: $\mu = 0,1$; $C_{\text{п1}} = 0,025$; $K_{\text{в1}} = 1 + C_{\text{в1}} = 1,03$; $K_{\text{в2}} = 1 + C_{\text{в2}} = 1,02$; $K_{\text{в3}} = 1 + C_{\text{в3}} = 1,05$; $K_{\text{в4}} = 1 + C_{\text{в4}} = 1,06$. Коефіцієнт тертя сталюї сітки і сталюого настилу $C_{\text{п2}} = 0,35$ [2].

Знайдемо масу кожної із секцій конвеєра

$$m_{78} = (m_0^* + m_n) \cdot l_{12} = (19,5 + 33,44) \cdot 15 = 794,1 \text{ кг};$$

$$m_{12} = m_0^* \cdot l_{12} = 19,5 \cdot 0,5 = 9,75 \text{ кг};$$

$$m_{34} = m_0^* \cdot l_{56} = 19,5 \cdot 0,6 = 11,7 \text{ кг};$$

$$m_{56} = m_0^* \cdot l_{78} = 19,5 \cdot 14 = 273,0 \text{ кг}.$$

Вагове навантаження кожної секції конвеєра

$$g_{12}^* = g_{34}^* = g_{56}^* = m_0^* \cdot g = 19,5 \cdot 9,81 = 191,30 \text{ Н/м};$$

$$g_{78}^* = (m_0^* + m_n) \cdot g = (19,5 + 33,44) \cdot 9,81 = 518,34 \text{ Н/м}.$$

Розрахункова загальна маса конвеєра

$$\begin{aligned} m'_{\Sigma} &= m_{78} + m_{56} \cdot K_{\epsilon 3} + m_{34} \cdot K_{\epsilon 3} \cdot K_{\epsilon 2} + m_{12} \cdot K_{\epsilon 3} \cdot K_{\epsilon 2} \cdot K_{\epsilon 1} = \\ &= 794,1 + 273,0 \cdot 1,05 + 11,7 \cdot 1,05 \cdot 1,02 + 9,75 \cdot 1,05 \cdot 1,02 \cdot 1,03 = 1104,0 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Розраховуємо опір руху прямолінійної ділянки.

$$\Delta F_{12} = g_{12}^* \cdot l_{12} \cdot (C_{\text{п1}} \cdot \cos \beta_{12} + \sin \beta_{12}) =$$

$$= 191,3 \cdot 0,5 \cdot (0,025 \cdot 0,707 + 0,707) = 69,3 \text{ Н};$$

$$\Delta F_{34} = g_{34}^* \cdot l_{34} \cdot (C_{\text{п1}} \cdot \cos \beta_{34} + \sin \beta_{34}) =$$

$$= 191,3 \cdot 0,6 \cdot (0,025 \cdot 0,707 - 0,707) = -65,93 \text{ Н};$$

$$\Delta F_{56} = g_{56}^* \cdot l_{56} \cdot (C_{\text{п2}} \cdot \cos \beta_{56} + \sin \beta_{56}) =$$

$$= 191,3 \cdot 14 \cdot (0,35 \cdot 1 + 0) = 937,36 \text{ Н};$$

$$\Delta F_{78} = g_{78}^* \cdot l_{78} \cdot (C_{п2} \cdot \cos \beta_{56} + \sin \beta_{56}) =$$

$$= 518,34 \cdot 15 \cdot (0,35 \cdot 1 + 0) = 2721,28 \text{ Н}.$$

В результаті сила на прямолинійній ділянці конвеєра дорівнює

$$F'_n = \Delta F_{78} + \Delta F_{78} \cdot K_{в3} + \Delta F_{78} \cdot K_{в3} \cdot K_{в2} + \Delta F_{78} \cdot K_{в3} \cdot K_{в2} \cdot K_{в1} =$$

$$= 2721,28 + 937,36 \cdot 1,05 - 65,93 \cdot 1,05 \cdot 1,02 + 69,3 \cdot 1,05 \cdot 1,02 \cdot 1,03 =$$

$$= 3711,35 \text{ Н}.$$

Визначаємо допустимий натяг в точці збігання стрічки конвеєра з приводним барабаном

$$T_{зб.маx} = \frac{F'_n + m'_\Sigma \cdot a_{доп}}{e\mu\alpha - K_{в1} \cdot K_{в2} \cdot K_{в3}} = \frac{3711,35 + 1104,0 \cdot 0,2}{e^{0,1 \cdot 4,24} - 1,03 \cdot 1,02 \cdot 1,05} = 9255,0 \text{ Н}.$$

Оскільки маса барабана і ролика не враховується при розрахунку m'_Σ , то береться запас на $T_{зб}$.

$$T_{зб} \approx 1,2 \cdot T_{зб.мін} = 1,2 \cdot 9255 = 11106 \text{ Н}.$$

Для визначення попереднього натягу стрічки конвеєра знайдемо мінімальний натяг в точці 6.

$$T_6 = T_0 = (T_{зб} + \Delta F_{12}) \cdot K_{в1} \cdot K_{в2} + \Delta F_{34} \cdot K_{е2} + \Delta F_{56} =$$

$$= (11106 + 69,3) \cdot 1,03 \cdot 1,02 - 65,93 \cdot 1,02 + 937,36 = 12610,88 \text{ Н}.$$

Максимальний натяг стрічки конвеєра в точці 8 обкатки приводного барабана

$$T_{н8} = K_6 \cdot T_{зб} + F'_n + m'_\Sigma \cdot a_{доп} =$$

$$= 1,1 \cdot 11106,0 + 3711,35 + 1104,0 \cdot 0,2 = 16148,75 \text{ Н}.$$

2.3 Розрахунок потужності електроприводу конвеєра

Найбільш сучасним складом приводної станції конвеєра печі є агрегат з мотор-редуктора та ланцюгового редуктора (рисунок 2.2).

Визначаємо потужність приводної станції

$$P_{ст} = K_3 \cdot \frac{(T_{нб} - T_{зб}) \cdot v}{\eta_p} = 1,2 \cdot \frac{(16148,75 - 11106,0) \cdot 0,025}{0,9 \cdot 0,9} = 867,68 \text{ Вт.} \quad (2.1)$$

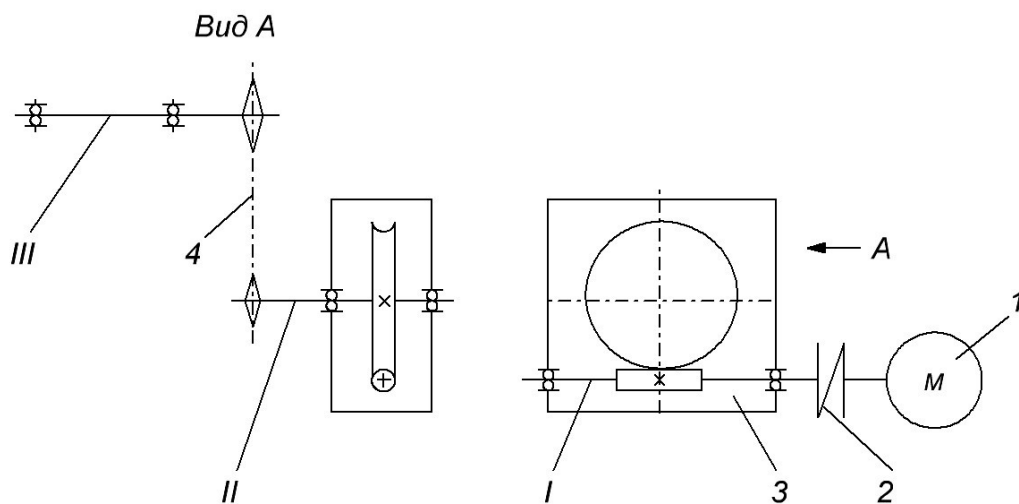


Рисунок 2.2 – Схема модернізованого приводу конвеєра печі

1 – електродвигун; 2 – еластична муфта; 3 – черв'ячний редуктор; 4 – ланцюгова передача; I – провідний вал редуктора; II – ведений вал редуктора;
III – вал приводного барабана

Частота обертання приводного барабана $n_{пб}$ при швидкості руху конвеєрної стрічки $v_k = 0,025 \text{ м/с} = 1,5 \text{ м/хв}$

$$n_{пб} = \frac{v_k \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot r_{пб}} = \frac{0,025 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,125} = 1,91 \text{ об/хв.}$$

де $r_{пб}$ – радіус барабана приводу конвеєра, $r_{пб} = 0,125 \text{ м}$.

Вибираємо компоненти приводної станції з каталогів []:

Перший ступінь редуктора – черв'ячний мотор-редуктор типу МЧ-125 (рисунок 2.3) [8], параметри якого наведені в таблиці 2.1.



Рисунок 2.3 – Мотор-редуктор МЧ-125 з двигуном АИР90LB8

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики мотор-редуктора МЧ-125

Частота обертання, об/хв	9
Потужність двигуна, кВт	1,1
Тип двигуна	АИР90LB8
Крутний момент, Н·м	650
Передавальне число i_1 , об/об	76

У таблиці 2.2 наведені технічні характеристики обраного асинхронного двигуна АИР90LB8.

Передавальне число другого ступеня редуктора i_2 (ланцюгова передача) визначається за наступною формулою

$$n_{\text{ДВ}} = n_{\sigma} \cdot i_1 \cdot i_2,$$

$$i_2 = \frac{n_{\text{ДВ}}}{n_{\sigma} \cdot i_1} = \frac{680}{1,91 \cdot 76} = 4,7.$$

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики двигуна АІР90LB8

Тип двигуна	Асинхронний
Кількість фаз	3
Потужність, кВт	1,1
Частота обертання синхронна n_s /фактична $n_{дв}$, об/хв	750/710
Число полюсів	8
ККД, не менше, %	72
$\cos\phi$	0,7
Номинальний струм I_H , А	3,36
Відношення струмів, I_{II}/I_H	5
Відношення моментів, M_{II}/M_H	1,8
Відношення моментів, M_{max}/M_H	2,0
Відношення моментів, M_{min}/M_H	1,5
Момент інерції J , кг·м ²	0,009

2.4 Вибір перетворювача частоти

Більшість сучасних перетворювачів частоти (ПЧ) включають енергозберігаючі функції управління, які дозволяють гнучко регулювати напругу двигуна при зміні навантаження. За допомогою цього управління можливо заощадити до 30% споживаної потужності в деяких режимах. Економія досягається за рахунок зниження втрат двигуна. Режим енергозбереження дуже важливий для механізмів, які працюють зі скороченим за часом навантаженням.

Конвеєри, насоси та вентилятори є прикладами таких механізмів. У багатьох випадках асинхронні двигуни вибираються зі значним запасом потужності і часто працюють з неповним навантаженням, тому можна очікувати високих показників ефективності від широкого застосування енергозберігаючих перетворювачів частоти.

При використанні одного перетворювача частоти з одним двигуном перетворювач може бути обраний відповідно до наступних параметрів:

1) Паспортна потужність ПЧ в кВт повинна бути більшою або дорівнювати номінальній потужності двигуна;

2) Номінальний постійний струм ПЧ повинен бути більшим (або рівним) фактичному постійному струму, що споживається двигуном.

$$I_{\text{вих.пч}} \geq I_{1\text{н}} = 3,37 \text{ А.} \quad (2.2)$$

Відповідно до технічних вимог до електроприводу та рекомендацій, наведених у розділі 2.3, обираю перетворювач частоти VLT2815 [9], параметри якого наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Параметри перетворювача частоти серії VLT2815

Модель	Число фаз на вході	$U_{\text{н}}, \text{ В}$	$I_{\text{ин}}, \text{ А}$	$I_{\text{имакс}}, \text{ А}$	Рекомендована потужність двигуна, кВт
2815	3	380 ÷ 480	4,1	5,4	1,5

Технічні дані перетворювача частоти серії VLT2800:

- несуча частота – 3000...14000 Гц;
- діапазон вихідної частоти – 0,2...132 Гц;
- роздільна здатність по вихідній частоті – 0,013 Гц;
- мережа живлення: 380...480±10% В, 48...62 Гц, 3 фази;
- коефіцієнт потужності при номінальному навантаженні – 0,91;
- перевантаження за струмом: 160 % протягом 1 хвилини і 180 % протягом 0,5 с;
- діапазон регулювання у розімкнутій системі – 1:10.

Захисти:

- електронний тепловий захист двигуна від тривалого навантаження;
- температурний контроль радіатора;
- захист перетворювача від короткого замикання на клеммах двигуна;
- захист від втрати фази відключенням перетворювача;
- постійний контроль напруги проміжного ланцюга постійного струму;
- захист від несправності заземлення на клеммах двигуна.

Параметри зовнішнього середовища на висоті до 1000 м над рівнем моря:

- максимальна відносна вологість – 5...93 %;
- максимальна температура – 45 °С,
- максимальна середня температура протягом 24 годин – 40 °С;
- мінімальна температура при роботі з максимальною продуктивністю – 0 °С.

Ступінь захисту корпусу перетворювача – IP 20.

Зовнішній вигляд і схема підключення перетворювача частоти наведені на рисунках 2.13 і 2.14.



Рисунок 2.13 – Зовнішній вигляд
ПЧ VLT 2815

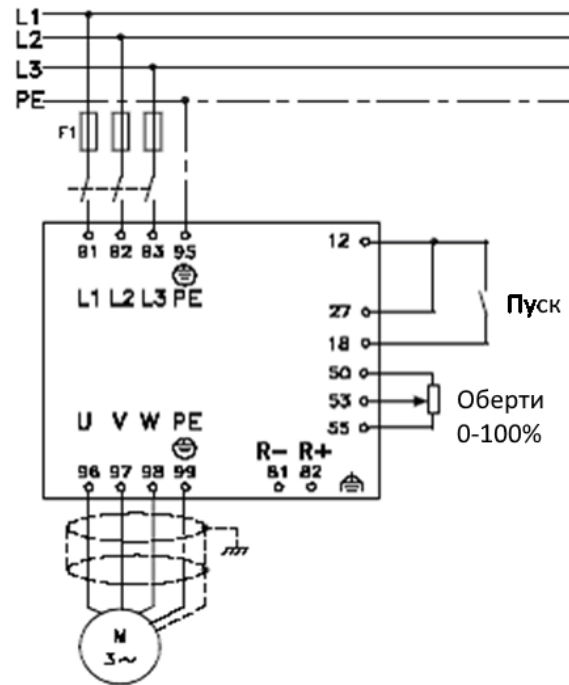


Рисунок 2.14 – Схема підключення
ПЧ VLT 2815

2.5 Визначення інтервалу частот інвертора

Максимальна частота інвертора визначається спільним розв'язанням рівнянь для механічних характеристик двигуна з фазною напругою обмотки двигуна $U_1(f_1) = U_{1\text{фн}} = 220 \text{ В}$ і значенням навантаження для частоти f_1 , з умови забезпечення максимальної робочої швидкості $\omega = \omega_{\text{р.макс}} = 172,7 \text{ рад/с}$.

Значення максимальної частоти інвертора визначаємо шляхом спільного розв'язання рівнянь для механічних характеристик двигуна

$$\frac{3 \cdot U_{1\phi}^2 (f_1) \cdot R'_2}{\left(\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} - \omega \right) \cdot \left[\left(X_{кн} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} - \omega} \cdot \omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 \right]} = M_c. \quad (2.1)$$

Розрахункове значення максимальної частоти перетворювача $f_{i \text{ макс}} = 64,66$ Гц.

Мінімальну робочу частоту інвертора визначаємо, вирішуючи рівняння (2.1) при $\omega = \omega_{p. \text{ мін}} = 52,36 \frac{\text{рад}}{c}$ і $U_1(f_1) = U_{1\phi H} \cdot \frac{f_1}{f_H} = 220 \cdot \frac{f_1}{50}$.

Розрахована мінімальна частота інвертора в робочому діапазоні регулювання швидкості двигуна $f_{p. \text{ мін}} = 16,75$ Гц.

Для забезпечення пускових характеристик мінімальна частота інвертора повинна бути рівною $f_{i \text{ мін}} = 5$ Гц.

2.6 Розрахункове визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

Математичне моделювання асинхронних двигунів (АД) вимагає визначення параметрів їх схем заміщення. Поряд з різними експериментальними методами можна розрахувати параметри АД опосередковано на основі довідкових даних. Т-подібна схема заміщення для однофазного асинхронного двигуна показана на рисунку 2.6 [10].

Основні рівняння АД, що відповідають прийнятій схемі заміщення:

$$\overline{U_{1\phi}} - \overline{E_m} - j \cdot X_1 \cdot \overline{I_1} + R_1 \cdot \overline{I_1} = 0,$$

$$\overline{E_m} + j \cdot X'_2 \cdot \overline{I'_2} + R'_2 \cdot \frac{\overline{I'_2}}{s} = 0,$$

$$\overline{I_1} + \overline{I'_2} - \overline{I_2} = 0.$$

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 710}{30} = 74,35 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Номинальне ковзання

$$s_H = 1 - \frac{f_H}{f_0} = 1 - \frac{710}{750} = 0,053.$$

Номинальний момент двигуна

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_H} = \frac{1100}{74,35} = 14,79 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальна фазна напруга і номинальний фазний та лінійний струми статора

$$U_{1\text{фн}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}.$$

$$I_{1\text{фн}} = I_{1\text{лн}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{1100}{3 \cdot 220 \cdot 0,72 \cdot 0,72} = 3,22 \text{ А}.$$

Струм фази статора при частковому навантаженні

$$I_{1p'} = \frac{p' \cdot P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos\varphi_{p'} \cdot \eta_{p'}} = \frac{0,75 \cdot 1100}{3 \cdot 220 \cdot 0,7 \cdot 0,7} = 2,56 \text{ А}.$$

де $\eta_{p'} = 0,7$ – коефіцієнт корисної дії при частковому навантаженні;

$\cos\varphi_{p'} = 0,7$ – коефіцієнт потужності при частковому навантаженні;

$p' = P/P_H = 0,75$ – коефіцієнт навантаження двигуна.

Коефіцієнт потужності $p' = 0,75$ при частковому навантаженні значно відрізняється від коефіцієнта потужності при номинальному навантаженні, і ця різниця сильно залежить від потужності двигуна і відповідає залежностям, показаним на рисунку 2.8 для відомих серій асинхронних двигунів з достатньою для практичного використання точністю.

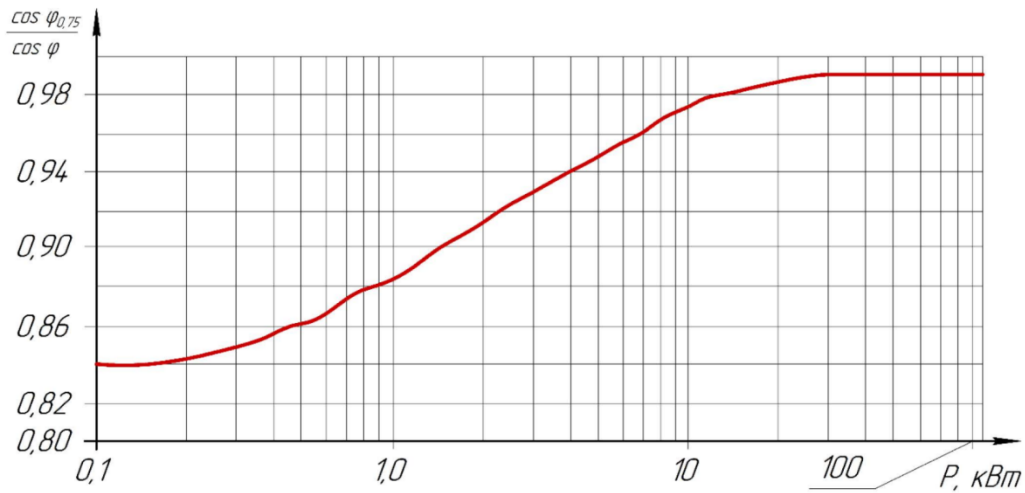


Рисунок 2.8 – Залежність $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi$ від потужності асинхронного двигуна

Критичне ковзання

$$s_k = s_H \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - (1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_k - 1))}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_k - 1)} =$$

$$= 0,053 \cdot \frac{2,0 + \sqrt{2,0^2 - (1 - 2 \cdot 0,053 \cdot 1,5 \cdot (2,0 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,053 \cdot 1,5 \cdot (2,0 - 1)} = 0,24.$$

Струм холостого ходу асинхронного двигуна

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p'}^2 - (I_{1\phi_H} \cdot p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}{1 - (p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{2,56^2 - (0,75 \cdot 3,224 \cdot (1 - 0,053) / (1 - 0,75 \cdot 0,053))^2}{1 - (0,75 \cdot 3,224 \cdot (1 - 0,053) / (1 - 0,75 \cdot 0,053))^2}} = 1,377 \text{ A.}$$

Визначимо активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора.
Значення деяких проміжних коефіцієнтів

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\phi_H}} = 1 + \frac{1,377}{2 \cdot 5,0 \cdot 3,224} = 1,0427,$$

$$R'_2 = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot k_{\max} \cdot P_H \cdot C_1^2 \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_K}\right)} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,053)}{2 \cdot 2,0 \cdot 1100 \cdot 1,0427^2 \cdot (1,5 + 1/0,239)} = 5,040 \text{ Ом.}$$

Активний опір статора в номінальному режимі

$$R_1 = R'_2 \cdot \beta \cdot C_1 = 5,040 \cdot 1,5 \cdot 1,043 = 7,883 \text{ Ом.}$$

Параметр γ , який дозволяє знайти індуктивний опір короткого замикання в номінальному режимі

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_K^2} - \beta^2} = \sqrt{1/0,239 - 1,5^2} = 3,890.$$

Опір короткого замикання

$$X_{KH} = R'_2 \cdot \gamma \cdot C_1 = 5,040 \cdot 3,891 \cdot 1,0427 = 20,445 \text{ Ом.}$$

Індуктивний опір розсіювання статорної обмотки

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{KH} = 0,42 \cdot 20,445 = 8,587 \text{ Ом.}$$

Індуктивність розсіювання обмотки статора

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{8,587}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0273 \text{ Гн.}$$

Індуктивний опір розсіювання обмотки ротора в номінальному режимі, приведений до обмотки статора

$$X'_{2\sigma} = 0,58 \cdot \frac{X_{KH}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{20,445}{1,0427} = 11,372 \text{ Ом.}$$

Індуктивність розсіювання роторної обмотки, приведена до статорної

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{11,372}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0362 \text{ Гн.}$$

ЕРС гілки намагнічування при номінальному режимі, наведена потоком повітряного зазору в обмотці статора

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\phi H} \cdot \cos\varphi - R_1 \cdot I_{1\phi H})^2 + (U_{1\phi H} \cdot \sin\varphi - X_{1\sigma} \cdot I_{1\phi H})^2} = \\ = \sqrt{(220 \cdot 0,72 - 3,224 \cdot 7,883)^2 + (220 \cdot 0,694 - 3,224 \cdot 8,587)^2} = 181,90 \text{ В.}$$

Індуктивний опір намагнічування

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{181,90}{1,377} = 132,127 \text{ Ом.}$$

Результуюча індуктивність гілки намагнічування

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{132,127}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,4206 \text{ Гн.}$$

Значення номінального потокозчеплення

$$\Psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot I_M = \sqrt{2} \cdot 1,377 \cdot 0,421 = 0,8188.$$

Еквівалентна індуктивність обмотки статора

$$L_1 = L_{\sigma 1} + L_\mu = 0,0273 + 0,421 = 0,4479 \text{ Гн.}$$

Еквівалентна індуктивність обмотки ротора

$$L'_2 = L_{\sigma 2} + L_\mu = 0,0362 + 0,421 = 0,457 \text{ Гн.}$$

Коефіцієнт розсіювання

$$\sigma = 1 - \frac{L_{\mu}^2}{L_1 + L_2'} = 1 - \frac{0,421^2}{0,448 + 0,457} = 0,805.$$

Параметри схеми заміщення зведені в таблицю 2.4.

Таблиця 2.4 – Параметри схеми заміщення електродвигуна АИР100S2

R_1 , Ом	$X_{1\sigma}$, Ом	$L_{1\sigma}$, Гн	X_{μ} , Ом	L_{μ} , Гн	R_2' , Ом	$X_{2\sigma}'$, Ом	$L_{2\sigma}'$, Гн	$X_{кн}$, Ом
7,8834	8,5868	0,0273	132,127	0,4206	5,0404	11,3724	0,0362	20,4448

2.5 Побудова механічної характеристики електропривода

Номинальний режим роботи конвеєра відповідає максимальному значенню повного ККД і характеризується наступними параметрами:

- номінальний ККД $\eta_n = 72 \%$;
- номінальна частота обертання $n_n = 740$ об/хв, $\omega_n = 77,45$ рад/с.

Електропривод конвеєра хлібопекарської печі працює в режимі *S1*, тобто безперервної роботи при постійному навантаженні. Тому двигун пічного конвеєра вибирається за потужністю з умов роботи механізму для забезпечення максимальної продуктивності і не потребує перевірки на перегрів.

Максимальна статична потужність приводу конвеєра визначена в розділі 2. Відповідно до рівняння (2.1)

$$P_{ст} = K_3 \cdot \frac{(T_{нб} - T_{зб}) \cdot v}{\eta_p} = 1,2 \cdot \frac{(16148,75 - 11106,0) \cdot 0,025}{0,9 \cdot 0,9} = 867,68 \text{ Вт.}$$

де $T_{нб}$ – максимальний натяг у точці набігання приводного барабану, Н;

$T_{зб}$ – максимальний натяг у точці збігання приводного барабану, Н;

v – максимальна швидкість конвеєра, м/с;

K_3 – коефіцієнт запасу;

η_p – ККД двоступінчатого редуктора.

Максимальна продуктивність конвеєра досягається при максимальній швидкості обертання. В цьому випадку, з урахуванням втрат в механізмі і редукторі, максимальний момент опору навантаження на валу двигуна буде наступним

$$M_{\text{смакс}} = \frac{P_{\text{смакс}}}{\omega_{\text{рмакс}}} = \frac{868}{77,45} = 13,21 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

де $\omega_{\text{рмакс}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{рмакс}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 740}{30} = 77,45 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

Механічна характеристика конвеєра показана на рисунку 2.10 червоною лінією.

2.6 Побудова природної механічної характеристики двигуна

Якщо діапазон ковзання s становить від 1 до 0,00001 з кроком 0,01, то природна механічна характеристика асинхронного двигуна на частоті мережі живлення 50 Гц описується наступним рівнянням

$$M_{\text{ем}}(s) = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]}$$

Природна механічна характеристика $M_{\text{ем}}(n)$ електродвигуна АИР100S2 наведена на рисунку 2.7 для $n(s) = n_0 \cdot (1 - s)$.

На основі побудованої механічної характеристики проаналізуємо основні параметри двигуна і порівняємо їх з паспортними даними.

Номінальна частота обертання двигуна

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 7100}{30} = 74,35 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

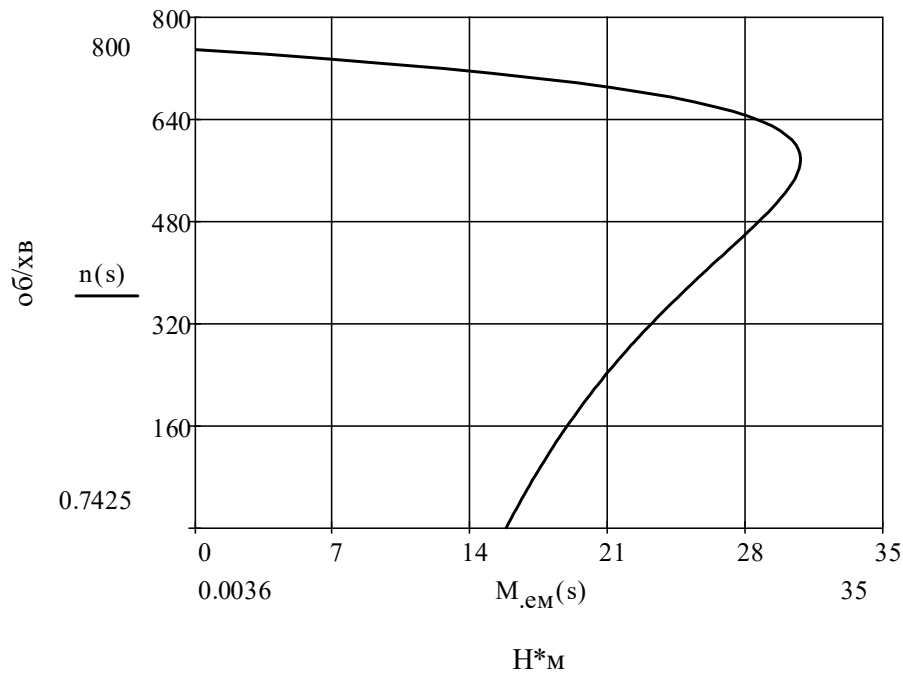


Рисунок 2.9 – Природна механічна характеристика $M_{ем}(n)$ електродвигуна АИР100S2

Номинальний момент за паспортними даними

$$M_{н(паспорт)} = \frac{P_{н}}{\omega_{н}} = \frac{1100}{74,35} = 14,79 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критичний момент за паспортними даними

$$M_{к(паспорт)} = m_k \cdot M_{н(паспорт)} = 2,0 \cdot 14,79 = 29,59 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковий момент за паспортними даними

$$M_{п(паспорт)} = m_{п} \cdot M_{н(паспорт)} = 1,8 \cdot 14,79 = 26,63 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критичний момент за формулою Клосса

$$M_k = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{кН}^2})} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 78,54 \cdot 1,0427 \cdot (7,883 + \sqrt{7,883^2 + 20,445^2})} = 29,59 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номінальний момент за формулою Клосса

$$M_H = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + a \cdot s_K)}{\frac{s_K}{s_H} + \frac{s_H}{s_K} + 2 \cdot a \cdot s_K} =$$
$$= \frac{2 \cdot 29,59 \cdot (1 + 1,564 \cdot 0,239)}{\frac{0,239}{0,053} + \frac{0,053}{0,239} + 2 \cdot 1,564 \cdot 0,239} = 14,88 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

де $a = \frac{R_1}{R'_2} = \frac{7,883}{5,040} = 1,564.$

Пусковий момент за формулою Клосса

$$M_{\Pi} = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + a \cdot s_K)}{\frac{s_K}{s_{\Pi}} + \frac{s_{\Pi}}{s_K} + 2 \cdot a \cdot s_K} =$$
$$= \frac{2 \cdot 29,59 \cdot (1 + 1,564 \cdot 0,239)}{\frac{0,239}{1} + \frac{1}{0,239} + 2 \cdot 1,565 \cdot 0,239} = 14,88 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Отримані дані показують, що побудована механічна характеристика справедлива лише на робочій (верхній) ділянці. Це пояснюється тим, що значення критичного та номінального крутного моменту практично збігаються зі значеннями, розрахованими за паспортними даними. Однак значення пускового моменту, розраховані за паспортними даними, значно перевищують розраховані значення пускового моменту. Це пояснюється тим, що в розрахунках не враховується вплив витіснення струму в обмотці ротора.

2.7 Побудова сімейства механічних характеристик

Побудова сімейства механічних характеристик здійснюється в робочому діапазоні частот обертання вентилятора від 1000 до 3000 об/хв за рівнянням

$$M_{\text{ем}}(s, f_1) = \frac{3 \cdot (U_{1\text{фн}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}})^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \cdot s \cdot \left[(X_{\text{кн}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}})^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_\mu} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^2 \right]}$$

Для побудови графіків механічних характеристик у пакеті *Mathcad* нижче прийнята залежність швидкості двигуна від частоти та ковзання у вигляді

$$n_1(s, f_1) = n_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \cdot (1 - s).$$

Сімейство штучних механічних характеристик електродвигуна АІР100S2 наведено на рисунку 2.10.

2.8 Побудова природної електромеханічної характеристики двигуна

Природну електромеханічну характеристику $\omega(I_1)$ розрахуємо у пакеті *Mathcad* за виразом

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin\varphi_2(s)},$$

де

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\text{фн}}}{\sqrt{X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2}},$$

$$\sin\varphi_2(s) = \frac{X_{\text{кн}}}{\sqrt{X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2}}.$$

Побудуємо електромеханічну характеристику асинхронного двигуна У діапазоні ковзання $s = 0 \dots 1$ за формулами для струмів обмоток статора і ротора.

Електромеханічна характеристика асинхронного двигуна АІР100S2, що розрахована в програмі *MathCAD*, подана на рисунку 2.11.

Розрахуємо номінальний струм статора асинхронного двигуна $I_{1н}$ при номінальній швидкості обертання $\omega_n = 74,35$ рад/с ($n = 710$ об/хв).

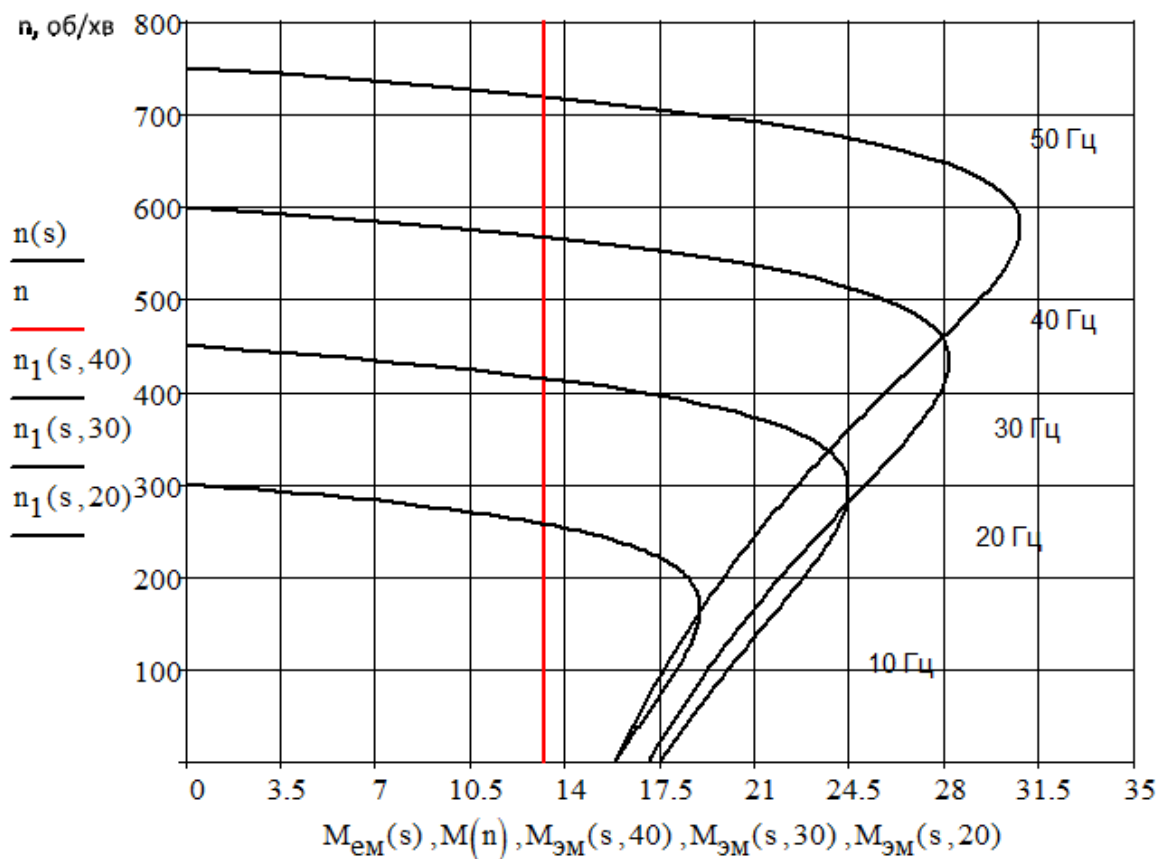


Рисунок 2.10 – Штучні механічні характеристики електродвигуна АИР100S2

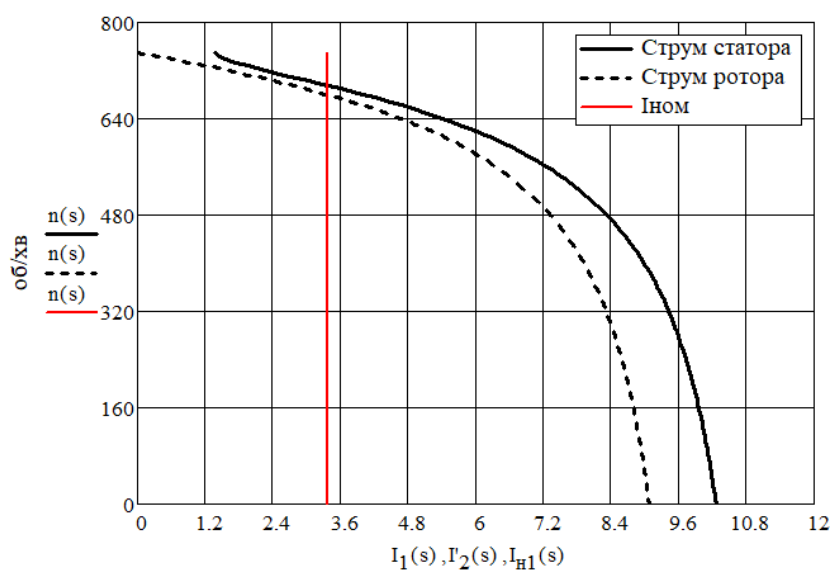


Рисунок 2.11 – Електромеханічна характеристика електродвигуна АИР100S2

Номинальний струм ротора двигуна при номінальній кутовій швидкості

$$I'_{2H} = \frac{U_{1\phi H}}{\pm \sqrt{X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H}\right)^2}} = \frac{220}{\pm \sqrt{20,445^2 + \left(7,883 + \frac{5,040}{s}\right)^2}} = 2,10 \text{ А.}$$

Синус кута між вектором фазної напруги $\overline{U_{1\phi}}$ і пов'язаним вектором струму ротора $\overline{-I'_2}$:

$$\sin\varphi_{2H} = \frac{X_{KH}}{\sqrt{X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H}\right)^2}} = \frac{20,44}{\pm \sqrt{20,445^2 + \left(7,883 + \frac{5,040}{s}\right)^2}} = 0,196.$$

Номинальний струм статора двигуна

$$I_{1H} = \sqrt{I_0^2 + I'_{2H}{}^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_{2H} \cdot \sin\varphi_{2H}} = \\ = \sqrt{1,377^2 + 2,101^2 + 2 \cdot 1,377 \cdot 2,101 \cdot 0,196} = 2,728 \text{ А.}$$

2.9 Схема релейно-контакторного управління електроприводом конвеєра хлібопекарської печі

Безпосередній запуск асинхронного двигуна здійснюється за простою схемою підключення з використанням звичайного релейно-контактного перемикаючого пристрою (рисунок 2.12). Такий електропривод не регулюється і підтримує оберти, відповідні точці перетину механічних властивостей двигуна з навантаженням, при частоті мережі 50 Гц. Їх перевагою є простота схеми підключення електроприводу конвеєра, а недоліками - значний пусковий струм і крутий момент, що перевищують номінальне значення в 5...8 разів, що може призвести до механічного пошкодження системи приводу і конвеєра в печі і призвести до аварійної зупинки печі з великими виробничими втратами.

При натисканні кнопки «Пуск» SB1 спрацьовує магнітний контактор KM, три контакти якого одночасно підключають 3-фазне живлення до двигуна, а 4-й контакт шунтує кнопку «Пуск». Тобто живлення автоматично відключається. Живлення двигуна відключається кнопкою SB2 «Стоп», яка розмикає ланцюг живлення магнітного контактора. Аварійне вимкнення двигуна також здійснюється шляхом включення теплового реле КК в разі перегріву обмоток двигуна при тривалому перевантаженні двигуна.

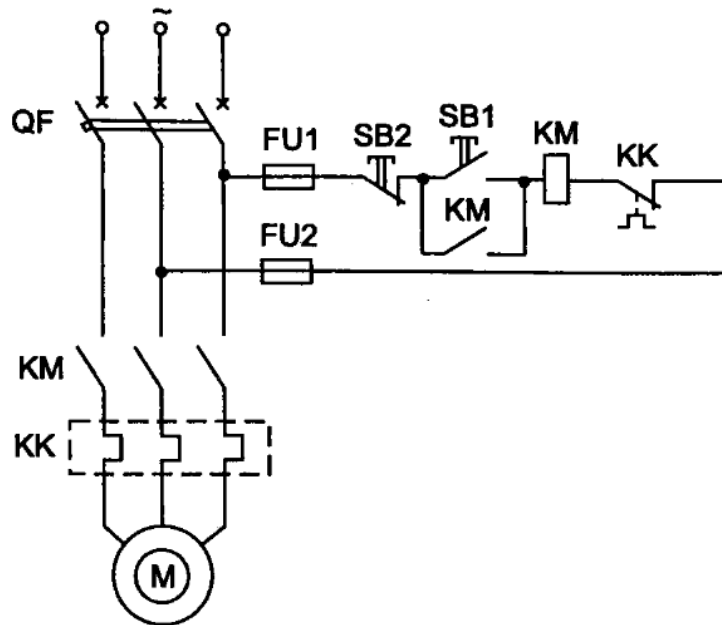


Рисунок 2.12 – Принципова електрична схема нерегульованого електроприводу

3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

3.1 Дослідження динамічних характеристик асинхронного двигуна при прямому пуску

Віртуальна модель прямого пуску асинхронного електропривода конвеєра хлібопекарської печі в пакеті моделювання *Matlab-Simulink* з використанням бібліотеки *SimPowerSystem* наведена на рисунку 3.1. Приведений момент навантаження двигуна – постійний, з параметрами з виразу (2.1).

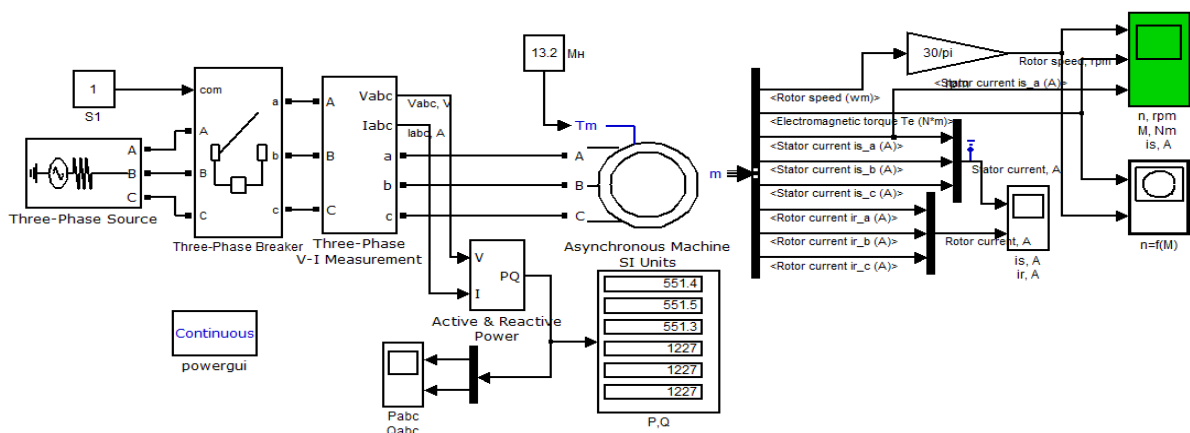


Рисунок 3.1 – Схема моделі прямого пуску електропривода конвеєра

На рисунку 3.2 наведені параметри схеми заміщення асинхронного двигуна АИР100S2, взяті з таблиці 2.4 розрахункових параметрів двигуна,

Розрахунковий момент інерції конвеєра печі з виробами складає $J_{\text{конв}} = 2,8$ кг·м², приведений до валу двигуна $J_{\text{конв.пр}} = \frac{J_{\text{конв}}}{i_p^2} = \frac{2,8}{40^2} = 0,00175$ кг·м².

Еквівалентний момент інерції [10]

$$J = J_{\text{дв}} + k \cdot J_{\text{дв}} + J_{\text{конв.пр}} = 0,009 + 0,2 \cdot 0,009 + 0,00175 = 0,01255 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

де $k = 0,2$ – коефіцієнт, що враховує момент інерції сполучної муфти та першої шестерні редуктора.

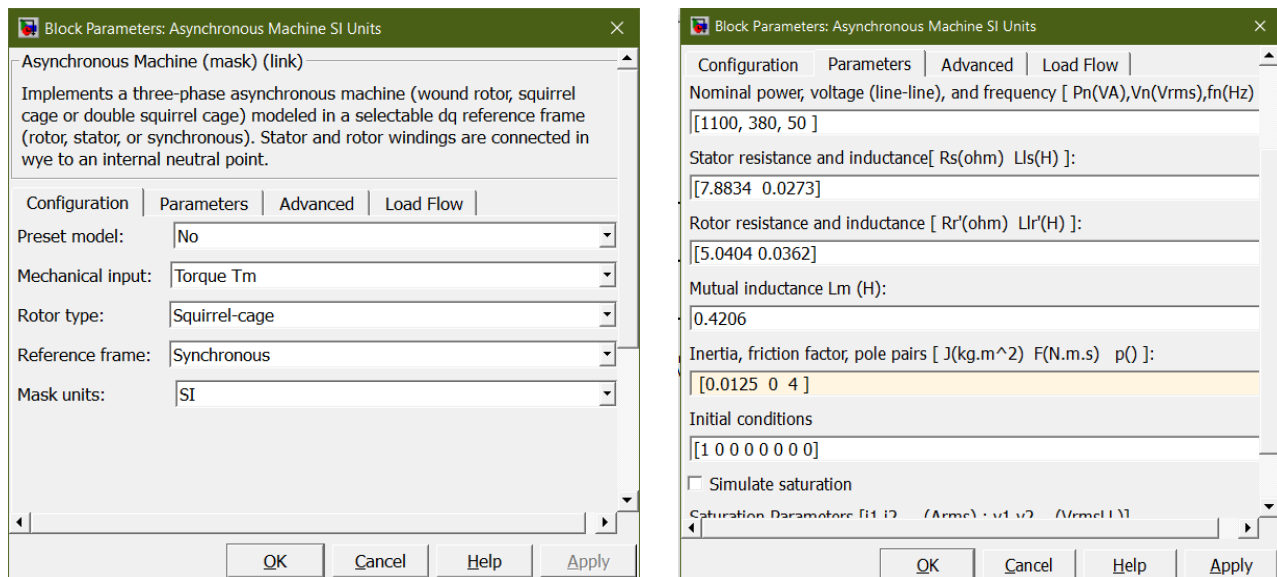


Рисунок 3.2 – Вікна введення параметрів асинхронного двигуна потужністю 1,1 кВт з таблиці 2.4

На рисунку 3.3 наведені параметри трифазного блоку живлення *Three-Phase Source* і блоку двокоординатного будувача *XY-Scope*.

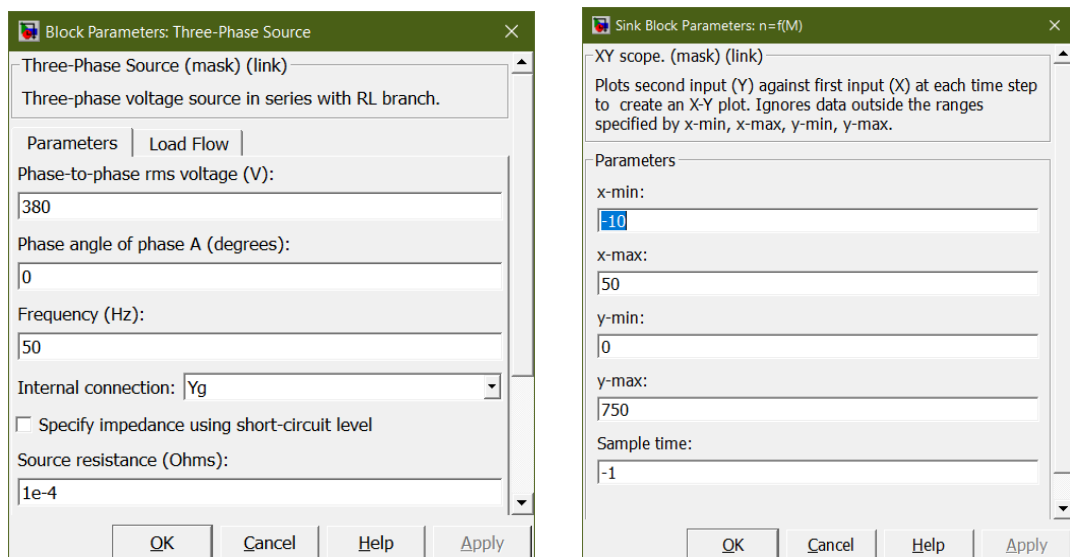


Рисунок 3.3 – Вікна введення параметрів трифазного блоків живлення *Three-Phase Source* і двокоординатного будувача *XY-Scope*

Результати моделювання електропривода конвеєра печі на базі трифазного асинхронного привода наведені на рисунках 3.4, 3.5.

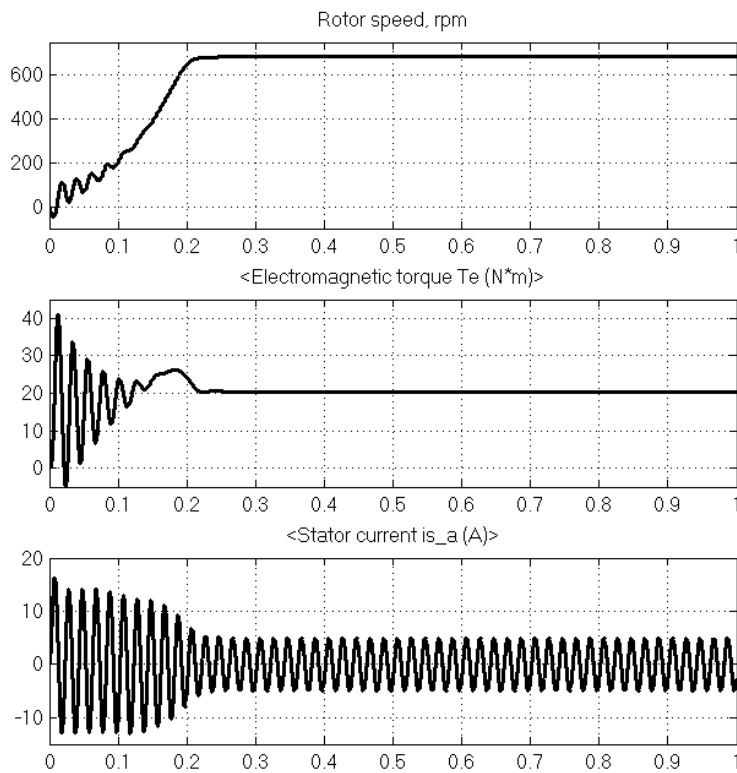


Рисунок 3.4 – Перехідні процеси зміни швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при прямому пуску електропривода і нульовому факторі тертя

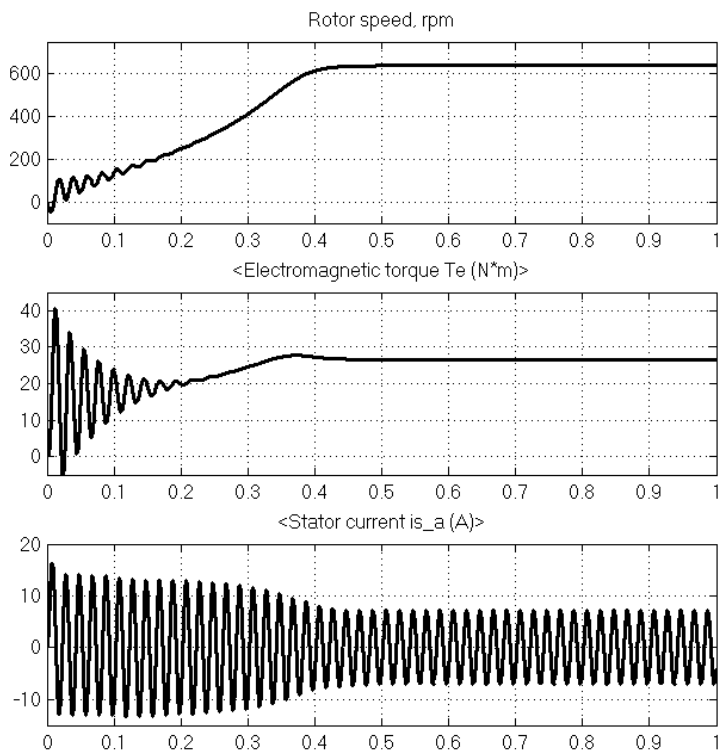


Рисунок 3.5 – Перехідні процеси зміни швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при прямому пуску електропривода і факторі тертя $F = 0,2 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$

З графіка на рисунку 3.4 видно, що час налаштування частоти обертання і крутного моменту при безпосередньому запуску електроприводу становить близько 0,25 секунди, пусковий електромагнітний момент досягає приблизно 42 Н·м, що приблизно в 3 рази перевищує номінальний, а пусковий струм статора досягає 17 А, що приблизно в 5 разів перевищує номінальний.

Якщо врахувати коефіцієнт тертя $F = 0,2 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ (рисунок 3.5), то час розгону двигуна збільшується майже в 2 рази, а електромагнітний момент і струм статора складають 0,5 секунди.

3.2 Дослідження динамічних характеристик асинхронного електропривода з широтно-імпульсним перетворювачем частоти (ПЧ-АД)

Модель прямого пуску асинхронного електроприводу конвеєра печі з ПЧ зі скалярним законом наведена на рисунку 3.6 [11, 12]. Приведений момент навантаження двигуна – постійний, з параметрами з виразу (2.1). Параметри двигуна – на рисунку 3.2.

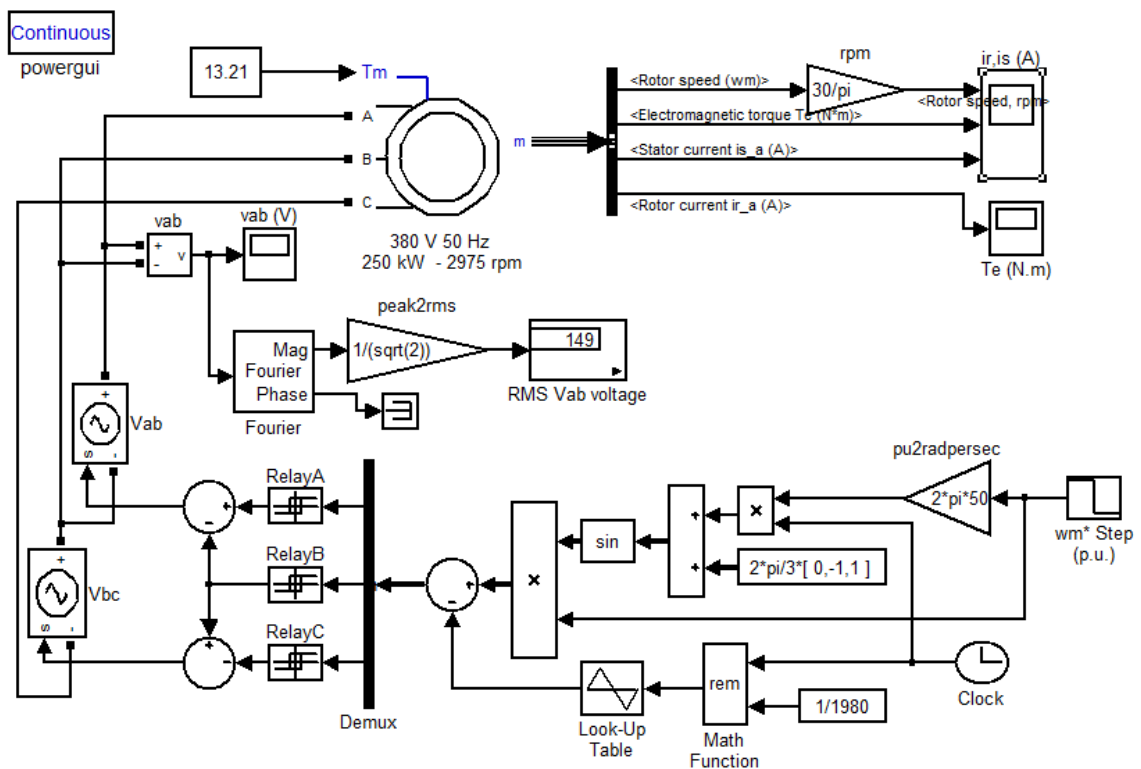


Рисунок 3.6 – Схема моделі електроприводу конвеєра печі з широтно-імпульсним перетворювачем частоти

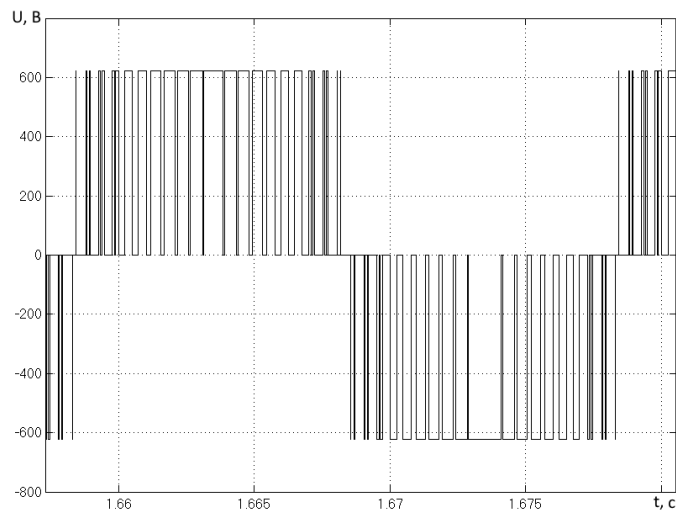


Рисунок 3.7 – Осцилограма формування синусоїдального струму статора широтно-імпульсним перетворювачем

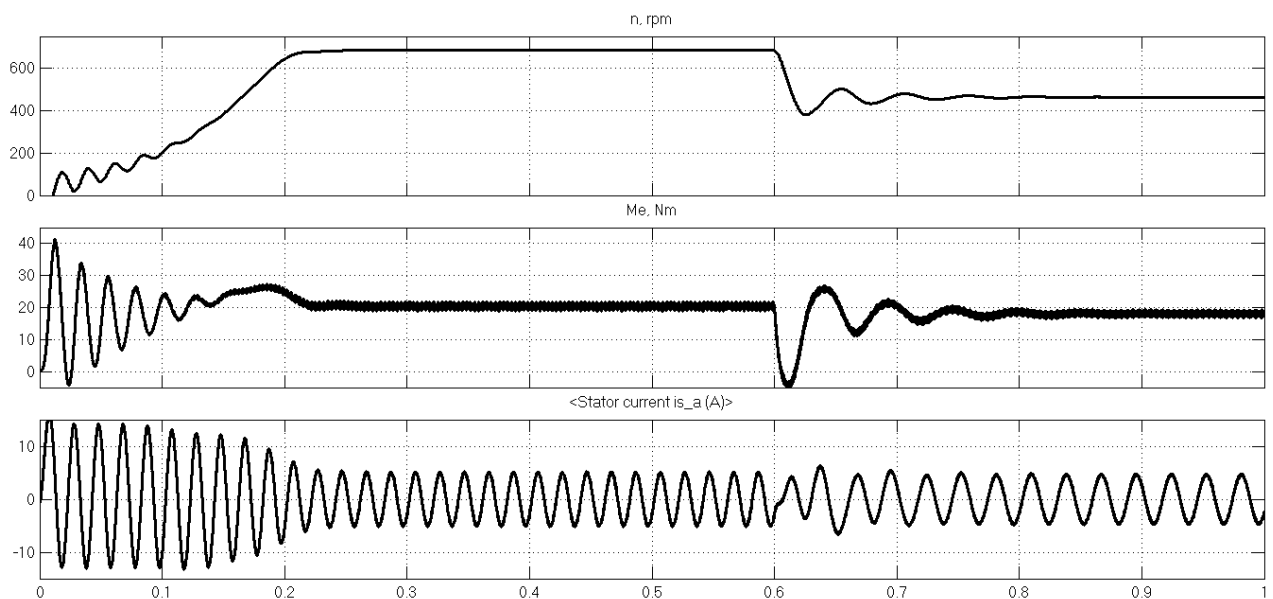


Рисунок 3.8 – Перехідні процеси зміни швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при зміні частоти електроприводу з 50 Гц до 35 Гц

Як видно з графіка на рисунку 3.8, час установки числа обертів і крутного моменту при запуску електроприводу з перетворювачем частоти становить 0,25 секунди, пусковий електромагнітний момент досягає приблизно 43 Н·м, що приблизно в 2 рази перевищує номінальний, а пусковий струм статора досягає 15 А, що приблизно в 4,5 рази перевищує номінальне значення.

4 ОРГАНІЗАЦІЙНА ТА ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Організація і технологія монтажу електроприводів конвеєрів хлібопекарських печей

Монтаж електроприводів і систем для конвеєрів хлібопекарських печей – це складний комплекс робіт, які повинні виконуватися відповідно до проекту і діючих технічних умов. Як правило, монтаж системи електроприводу машини включає в себе наступні етапи робіт:

- підготовка до монтажних робіт;
- проведення монтажних робіт;
- здача змонтованої системи в експлуатацію.

На першому етапі монтажу (підготовка) виділяють три складові: інжиніринг, технологія, матеріали та організація.

Питома вага цих складових залежить від складності об'єкта автоматизації, але їх наявність і правильне поєднання забезпечує своєчасне і якісне виконання всього комплексу робіт.

Наприклад, інженерно-технічна підготовка включає в себе інструкції з монтажу та експлуатації, вивчення нормативно-технічної документації. За результатами аналізу може знадобитися розрахунок і вибір апаратів захисту, проводів і пускового захисту, а також складання графіка виконання монтажних робіт. Матеріально-технічна підготовка включає закупівлю матеріалів, комплектуючих, деталей і конструкцій.

Організаційна підготовка включає підготовку майданчика для проведення робіт, зберігання обладнання та інструментів, укомплектування монтажної бригади, управління монтажем вбудованих конструкцій та іншими будівельно-монтажними завданнями, а також участь у разі необхідності. Як правило, підготовчі роботи виконуються в наступному порядку:

- вивчення електричних схем і схем зовнішніх з'єднань, а також специфікацій замовника на електрообладнання (обладнання, дроти, кабелі, монтажні та кріпильні матеріали);

- з'ясування місця розташування електрообладнання та маршруту прокладання проводів і кабелів;
- з'ясування місця розташування електрообладнання та маршруту прокладання проводів і кабелів;
- за допомогою спеціальних металошукачів перевірка, чи немає на маршруті прихованої електропроводки, металевих конструктивних частин, труб, тощо, інших споживачів енергії;
- дослідження характеристик стіни, по якій буде прокладено трасу електропроводки;
- підготовка списку додаткових матеріалів, деталей та інструментів, не передбачених проектною документацією;
- перевірка наявності необхідних монтажних інструментів та контрольно-вимірювальних приладів;
- підготовка графіків електромонтажних робіт та узгодження їх з іншими підрядниками, які беруть участь у будівництві об'єкта (наприклад, будівельниками, сантехніками, енергетиками).

Якщо монтаж електрообладнання здійснюється без проектної документації (як правило, малопотужні побутові кондиціонери), готуються схеми електричних з'єднань, монтажні схеми, розрахунки з вибору проводів і автоматичних вимикачів, специфікації на комплектуючі та монтажні матеріали.

Монтаж електричних машин, що поставляються в розібраному вигляді, набагато складніший, і включає в себе такі основні технічні задачі:

- встановлення нижніх підшипників, статора з ротором на фундаментну плиту;
- встановлення напівмуфт;
- центрування валів;
- перевірка зазорів у підшипниках і посадки підшипників;
- перевірка повітряного зазору і магнітного центрування статора і ротора;
- заливка фундаментних плит і фундаментних болтів за допомогою бетонної суміші;

- перевірка центрування валів після заливки фундаментних плит;
- перевірка остаточного складання і ущільнення підшипників;
- монтаж траверс щіток і регулювання щіток і щіткотримачів (для двигунів постійного струму);
- підключення зовнішніх кабелів, повітроохолоджувачів, мастилопроводів і заземлення;
- встановлення захисних кришок, щитів та огорожень.

Опорні плити для середніх і великих електричних машин, що постачаються, виготовляють з товстого сталевого листа або швелерів і балок великого перерізу.

Для електричних машин, що входять до складу перетворювального агрегату, в залежності від розмірів перетворювального агрегату, фундаментна плита виконується з однієї плити, загальної для всього агрегату, або з окремих плит для кожної машини, а для приводних електродвигунів, як правило, застосовуються тільки окремі плити.

Основною причиною паразитних струмів є несиметрія магнітного поля машини, що призводить до виникнення пульсуючих магнітних потоків через коротке замикання (вал - стояк підшипника - опорна плита - вал), які можуть викликати великі струми. Ізоляційні прокладки блокують коротке замикання.

Заводські монтажні креслення містять інструкції щодо ізоляції болтів і конічних контрольних штифтів, які кріплять стояк до опорної плити. Болти слід ізолювати бакелітовими трубками товщиною 2 мм, а конусні штифти – трубками з пресованого або електрично гофрованого картону.

Центрування валів передбачає дві основні задачі: вирівнювання осей загального валу (центрування по лінії валу) і усунення бічних і кутових перекосів валів машин і механізмів, що з'єднуються.

Як правило, сушка ізоляції електричних машин проводиться перед монтажем. Однак нерідкі випадки, коли вже змонтовані електричні машини тривалий час не експлуатуються через затримку пуску об'єкта або технічного комплексу, в результаті чого ізоляція стає вологою і перестає відповідати нормативним вимогам. У таких випадках ізоляцію електричної машини сушать перед введенням її в експлуатацію.

Метою сушіння є видалення води з ізоляції частин, що перебувають під напругою, наприклад, обмоток, і підвищення опору до допустимого значення.

Сушіння ізоляторів досягається зовнішнім нагріванням, нагріванням від зовнішнього джерела, індукцією, струмом короткого замикання в режимі генератора, на «повзучій швидкості» (для двигунів постійного струму) і вентиляційними втратами.

Якщо температура, необхідна для сушіння, не може бути досягнута жодним з перерахованих вище методів, або якщо нагрівання відбувається нерівномірно, використовується комбіноване сушіння. У цьому випадку будь-які два методи використовуються одночасно замість одного.

Для зовнішнього обігріву машини використовуються чавунні опори і коробки опору, а також спеціально виготовлені нагрівачі. Ці нагрівачі розміщуються під машиною таким чином, щоб виключити можливість локального перегріву через прямий відбір тепла або перегріву через близьке розташування нагрівачів.

Під час сушіння температура гарячого повітря, що надходить у машину, не повинна перевищувати 90 °С, а температура обмоток у найбільш нагрітих частинах не повинна перевищувати 70 °С. Температура вимірюється термометрами, розміщеними на соплах повітряного потоку і на найбільш нагрітій частині обмотки, або, у великих електричних машинах, вбудованими індикаторами температури (термопарами). Цей метод використовується для сушіння дуже вологих машин.

Для сушіння машин у такий спосіб використовують кілька методів. Нижче описані лише найпоширеніші з них.

Асинхронні двигуни сушать трифазним струмом в режимі короткого замикання. Для цього ротор сповільнюють, а його обмотки замикають на кільце спеціальними перемичками (щоб уникнути перегорання кільця). Струм сушіння підтримується нижче 0,7 А, тому напруга живлення повинна бути нижче 0,7 напруги короткого замикання. Це можна рекомендувати для всіх електричних машин. Цей метод використовує один з двох типів сушіння: сушіння за рахунок втрат в осерді статора або сушіння за рахунок втрат в корпусі статора. Нагрівання

досягається шляхом подачі на статор обмотки, намагніченої однофазним струмом, який генерує змінний магнітний потік.

4.2 Організація і технологія ремонту електроприводів конвеєрів хлібопекарських печей

Обсяг і критерії післяремонтних випробувань електрообладнання викладені в ПУЕ [2].

Опір ізоляції електродвигуна вимірюється для перевірки роботи на холостому ходу, без навантаження і під навантаженням.

Опір ізоляції статора вимірюється мегомметром на 1,0 кВ, а ротора – мегомметром на 0,5 кВ. При температурі 10...30 °С опір ізоляції статора повинен бути не менше 0,5 МОм. Опір ізоляції ротора не нормується. Значення опору реостата і пускового опору не повинні відхилятися від паспортних даних більше ніж на 10 %. Також слід перевірити цілісність паяних з'єднань.

Тривалість випробування на холостому ходу – не менше однієї години. Робота під навантаженням перевіряється з живленням від технологічного обладнання перед введенням обладнання в експлуатацію. Для електродвигунів з регульованою частотою обертання визначаються межі регулювання.

Для електродвигунів змінного струму напругою понад 1000 В, крім вищевказаних випробувань, перевіряється можливість включення без сушіння, проводяться випробування підвищеною напругою промислової частоти, вимірюється постійний опір обмоток статора і ротора, гідравлічне випробування повітроохолоджувача і вимірювання вібрації підшипників.

Випробування підвищеною напругою промислової частоти проводяться на повністю зібраних двигунах. Обмотки статора випробовуються для кожної фази окремо щодо корпусу, а дві інші фази підключаються до корпусу. Тривалість випробування напругою – одна хвилина.

Опір постійному струму обмоток статора і ротора вимірюється при потужності електродвигуна не менше 300 кВт. Опори обмоток різних фаз не повинні відрізнятися один від одного або від заводських даних більше ніж на 2 %.

Повітряні охолоджувачі повинні бути встановлені під тиском 0,20 . .0,25 МПа при надлишковому тиску протягом 10 хвилин. Не повинно спостерігатися падіння тиску або витоків.

Вимірювання вібрації повинно проводитися на кожному підшипнику. Граничні значення не повинні перевищувати наведені нижче результати:

Вторинні кола керування, захисту та сигналізації контактних кіл реле в установках до 1 кВ повинні випробовуватися протягом 1 хвилини при зростаючій напрузі 1 кВ, а опір ізоляції повинен вимірюватися при напрузі 0,5 . .1 кВ повинен вимірюватися мегомметром. Опір ізоляції повинен бути не менше 0,5 МОм. Опір ізоляції кіл керування, захисту та збудження машин постійного струму повинен бути не менше 1,0 МОм.

Повністю зібрані схеми випробовуються на можливість функціонування при різних значеннях робочого струму. Автоматика і контактори випробовуються шляхом багаторазового вмикання і вимикання при зниженій номінальній напрузі робочого струму.

Всі випробування та вимірювання оформлюються актами та протоколами. Поточні ремонти реєструються у відповідних журналах та на бланках, що визначають типові ремонти електрообладнання (електродвигунів, силових трансформаторів та масляних вимикачів). Ця система спрощує ведення ремонтної документації, оскільки персоналу потрібно лише внести основні дані про відремонтоване обладнання до журналів та форм, а також відмітити перелік виконаних робіт та ім'я особи, яка їх виконувала.

Капітальний ремонт документується спеціальним актом приймання-передачі відремонтованого обладнання. Цей закон містить перелік типових та обов'язкових завдань для цього виду ремонту. Правильна документація допомагає поліпшити організацію ремонтних робіт, дає необхідне уявлення про стан електрообладнання і, виходячи з цього, правильно встановити терміни і обсяг наступного ремонту.

Крім випробувань відремонтованого електрообладнання, відділ випробувань здійснює ремонт і перевірку електровимірювальних приладів, а також проводить профілактичні випробування електрообладнання та мережі

електропередач заводу за допомогою мобільного і стаціонарного випробувального обладнання. Випробувальний відділ розташований поруч з монтажним майданчиком, де проводяться комплексні випробування та вимірювання відремонтованого електрообладнання відповідно до діючих стандартів перед передачею в експлуатацію.

4.3 Організація і технологія технічного обслуговування електроприводів конвеєрів хлібопекарських печей

Технічне обслуговування електрообладнання передбачає проведення оглядів і контролю в терміни, зазначені в правилах технічного обслуговування (ПТЕ). Чим важчі умови експлуатації, тим частіше потрібно проводити огляди електроприводів. Наприклад, довший час розгону двигуна, частіші пуски, вища температура навколишнього середовища тощо. Конструкція електроприводу також впливає на необхідну частоту перевірок. Крім того, при визначенні частоти перевірок необхідно враховувати технічний стан двигуна, наприклад, ступінь зносу.

Під час огляду електроприводів перевіряють температуру нагрівання двигуна і стежать за тим, щоб двигун був чистим. Переконаються, що поблизу електродвигуна немає сторонніх предметів, особливо тих, які можуть бути небезпечними з точки зору пожежі. Переконаються, що електродвигун запускається і зупиняється виробничим персоналом відповідно до інструкцій і що двигун не працює на холостому ході. Переконаються, що напруга мережі підтримується в межах 95...110 % від номінальної напруги. Перевіряють рівень масла в підшипниках, реостатах і пускових пристроях. Звертають увагу на справність огорожень, що запобігають випадковому дотику до обертових частин електроприводу, усувають дрібні несправності (наприклад, замінюють перегорілі запобіжники, регулюють притискання щіток в ДПС тощо) і проводять зовнішнє очищення електродвигуна. Контроль температури електродвигуна є невід'ємною частиною його експлуатації, оскільки найбільш вразливі частини електродвигуна пов'язані з нагріванням вище максимально допустимої температури. Розрізняють

максимально допустимі температури нагріву і максимально допустимі температури нагріву окремих частин електричної машини.

Під час роботи не завжди є можливість відключити машину від електромережі і визначити температуру нагрівання шляхом вимірювання опору обмоток. Тому моніторинг нагріву здійснюється шляхом вимірювання температури доступних компонентів, таких як корпус двигуна, кришки підшипників, колектори і контактні кільця.

Основною причиною перевищення максимально допустимої температури електродвигуна є перевантаження. Тому під час роботи електродвигуна і при налагодженні технологічного процесу необхідно контролювати показання амперметра, встановленого в колі статора. Якщо двигун нагрівається вище допустимих меж, слід зменшити навантаження.

Зі збільшенням напруги живлення струм намагнічування зростає і перевищує максимально допустиму температуру. Якщо напруга живлення знижується, крутний момент зменшується, а струм і температура зростають. З цієї причини під час роботи двигуна контролюється напруга мережі живлення.

Якщо під час роботи двигуна погіршується ізоляція обмоток, це може призвести до короткого замикання між обмотками або короткого замикання між обмотками на корпусі двигуна. Щоб запобігти таким явищам і, як наслідок, виходу електродвигуна з ладу, необхідно регулярно вимірювати опір ізоляції обмоток за допомогою мегомметра. Терміни проведення таких перевірок залежать від місцевих умов (вологості навколишнього середовища, запиленості приміщення), технічного стану електродвигуна і встановлюються графіком.

Крім регулярних перевірок, також проводяться спеціальні перевірки після тривалих перерв в роботі електродвигуна, після потрапляння води або при ризику погіршення стану ізоляції обмоток. При оцінці стану ізоляції обмоток електродвигуна отримані дані слід порівняти з результатами попередніх вимірювань.

Якщо є дуже великі розбіжності в результатах вимірювань, це є підставою для проведення детального дослідження. Якщо результати контрольного

вимірювання опору ізоляції обмоток електродвигуна незадовільні, електродвигун слід просушити або відремонтувати.

Під час роботи електроприводу можуть виникнути ситуації, коли двигун необхідно відключити від мережі електроживлення. Прикладами таких ситуацій можуть бути задимлення або загоряння двигуна або його обладнання, травмування персоналу, що вимагає вимкнення двигуна, вібрації, що загрожують цілісності двигуна, вихід з ладу приводного механізму, перегрів підшипників понад допустимі значення, а також зниження швидкості двигуна при швидкому нагріванні.

Вібрація вимірюється, за необхідності, під час перевірок електроприводу. Для цієї мети найбільш простим і зручним у використанні є віброметр типу ВР. Цей віброметр може вимірювати вібрації від 0,05 до 6 мм на машинах з частотою обертання двигуна 750 об/хв і вище, і має реєструючий пристрій.

Стан електродвигуна, його пускових і захисних пристроїв повинен забезпечувати надійну роботу при пуску і в робочому режимі.

Будь-яке відхилення напруги від номінального значення, зазначеного на заводській табличці електродвигуна, призведе до зміни крутного моменту, струму, температури нагріву обмоток і активної сталі, а також показників енергоефективності, таких як коефіцієнт потужності та ККД.

4.4 Організація охорони праці та безпеки під час обслуговування хлібопекарських печей і конвеєрів

Категорично забороняється виконувати наступні дії:

- виконувати роботи на конвеєрі печі з увімкненим електроприводом;
- експлуатувати конвеєр печі з пошкодженою ізоляцією дротів;
- експлуатувати конвеєр печі з сторонніми звуками або шумами;
- включати конвеєр печі без заземлення.

Під час огляду конвеєра печі, не вимикаючи його, не наближатися до рухомих частин ближче ніж на 0,6 м.

Будь-які роботи, що наближають до струмоведучих частин пічного конвеєра на відстань більше ніж 0,6 м, повинні виконуватися при відключеному і заземленому пічному конвеєрі.

Інструкція з охорони праці підготовлена відповідно до вимог Закону України «Про охорону праці», який встановлює правила виконання робіт і поведінки електромонтерів на території підприємства, у виробничих приміщеннях і на робочому місці, відповідно до загальнодержавних, міжвідомчих і галузевих нормативних актів про охорону праці [3].

Ця інструкція поширюється на всі підрозділи підприємства.

Відповідно до статті 18 Закону України «Про охорону праці», працівники зобов'язані знати і виконувати вимоги нормативно-правових актів про охорону праці, правила поводження з машинами, механізмами, устаткуванням та іншими засобами виробництва, користуватися засобами колективного та індивідуального захисту, проходити в установленому порядку попередні і періодичні медичні огляди.

Залежно від конкретних обставин виробничого процесу, а також у зв'язку з нещасними випадками та аваріями до цієї інструкції можуть бути внесені зміни і доповнення, які в такому випадку викладаються окремим документом за підписом відповідальної особи відповідного структурного підрозділу.

До самостійної роботи з монтажу систем вентиляції та кондиціонування повітря допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, не мають протипоказань, навчені безпечним методам і прийомам роботи, склали іспит і отримали посвідчення.

Монтажники щорічно повинні проходити повторну перевірку знань з техніки безпеки. Особи, які працюють з ручними електричними машинами II і III класів, повинні мати групу з електробезпеки I.

Монтажники повинні проходити такі інструктажі з охорони праці:

- вступний – під час прийняття на роботу;
- б) первинний – на робочому місці;
- в) повторний – не рідше одного разу на 3...4 місяці;
- г) позаплановий – при порушенні вимог охорони праці та нещасному випадку, що стався або може статися; при зміні технологічного процесу,

конструкції електричного приводу або чинних нормативно-правових актів з охорони праці; при перерві в роботі за фахом на строк понад 60 календарних днів;

д) цільовий – для виконання разових робіт, безпосередньо не пов'язаних з обов'язками за фахом, ліквідації аварій, стихійних лих, робіт, на які видано наряд-допуск, дозвіл або інший документ.

Для зниження рівня впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів монтажники забезпечуються наступними засобами індивідуального захисту:

- комбінезон бавовняний – термін експлуатації 12 місяців;
- черевики шкіряні з твердою підкладкою під шкарпетками – термін служби шкарпеток 12 місяців;
- рукавички комбіновані – термін експлуатації 1 місяць.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Розрахунок витрат електроенергії існуючим електроприводом конвеєру печі

При випіканні хлібобулочних виробів у хлібопекарських печах витрачається велика кількість теплової та електричної енергії, тому необхідно взяти заходів для її зменшення. Ці заходи включають модернізацію електроприводів конвеєрів в існуючих хлібопекарських печах, яка передбачає заміну асинхронних, неконтрольованих електроприводів на енергозберігаючі частотно-регульовані приводи.

Така заміна може вирішити ряд проблем:

- зменшення споживання електроенергії;
- зниження експлуатаційних витрат;
- підвищення продуктивності випалювальної печі.

Модернізація електроприводу конвеєра тунельної хлібопекарської печі, побудованого на базі сучасних частотних перетворювачів, дозволяє плавно регулювати швидкість конвеєра при зміні типу хлібобулочних виробів, що випікаються, і змінювати її при потребі в процесі випікання.

Річне споживання електроенергії нерегульованим електроприводом Q_{e1} , кВт-год/рік при роботі хлібопекарської печі

$$Q_{e1} = F_{до} \cdot k_3 \cdot P_{cp1}, \quad (5.1)$$

де $k_3 = 1$ – коефіцієнт завантаження обладнання за часом,;

$P_{cp1} = 1,1$ кВт – середня потужність, споживана електродвигуном конвеєра печі,;

$F_{до}$ – фактичний час роботи обладнання, год.

$$F_{до} = F_n \cdot (1 - (a_p + a_n)), \quad (5.2)$$

де a_p – коефіцієнт, що враховує втрати часу;

$a_n = 0,07$ – коефіцієнт, що враховує втрати часу на налагодження та регулювання обладнання протягом робочої зміни;

F_n – номінальний час роботи електроприводу, год

$$F_n = \Phi_{зм} \cdot F_{зм} \cdot F_{p,\delta}, \quad (5.3)$$

де $\Phi_{зм} = 12$ год – тривалість зміни;;

$F_{зм} = 2$ – кількість змін на добу;;

$F_{p,\delta} = 335$ днів – кількість робочих днів на рік з врахуванням днів простоїв у ремонті.

$$F_n = 12 \cdot 2 \cdot 335 = 8040 \text{ год},$$

$$F_{до} = 8040 \cdot (1 - (0 + 0,07)) = 7477 \text{ год},$$

$$Q_{e1} = 7477 \cdot 1 \cdot 1,1 = 8225 \text{ кВт-год}.$$

Річні витрати на електроенергію C_{e1} , грн/рік

$$C_{e1} = Q_{e1} \cdot C_e, \quad (5.4)$$

де $C_e = 2,74$ грн/кВт-год – ціна 1 кВт-год електроенергії, приймаємо..

$$C_{e1} = 8225 \cdot 2,74 = 22536 \text{ грн/рік},$$

Витрати на електроенергію при роботі конвеєру печі з нерегульованим електроприводом складають 22536 грн/рік.

5.2 Розрахунок витрат в проектному варіанті (з ПЧ-АД)

Річні витрати електроенергії після модернізації Q_{e2} , кВт-год/рік:

$$Q_{e2} = F_{до} \cdot k_3 \cdot P_{cp2}, \quad (5.5)$$

де $P_{cp2} = 0,75$ кВт – середня потужність, споживана електроприводом конвеєру печі.

$$Q_{e2} = 7477 \cdot 1 \cdot 0,75 = 5608 \text{ кВт-год/рік},$$

Річні витрати на електроенергію після модернізації C_{e2} , грн / рік

$$C_{e2} = Q_{e2} \cdot C_e, \quad (5.6)$$

$$C_{e2} = 5608 \cdot 2,74 = 15366 \text{ грн},$$

Розрахуємо капітальні вкладення у виробництво при установці регульованого електропривода.

Витрати на основні технічні засоби K_{TC} , знаходяться за формулою:

$$K_{TC} = \sum_{i=1}^m N_i \cdot C_{ei} + C_{TP} \quad (5.7)$$

де m – число типів технічних засобів; $m = 3$;

$N_1 = N_2 = 1$ – кількість перетворювачів частоти і електродвигунів;

$C_1 = 7533$ грн – ціна перетворювача частоти, грн,;

$C_2 = 3000$ грн – ціна електродвигуна, грн,;

C_{TP} – транспортні витрати, грн., 10 % від витрат на технічні засоби.

Транспортні витрати C_{TP} , грн.

$$C_{TP} = 0,1 \cdot (N_1 \cdot C_1 + N_2 \cdot C_2), \quad (5.8)$$

$$C_{TP} = 0,1 \cdot (1 \cdot 7533 + 1 \cdot 3000) = 1053 \text{ грн},$$

Капітальні вкладення у виробництво при установці регульованого електропривода

$$K_{TC} = 1 \cdot 7533 + 1 \cdot 3000 + 1053 = 11586 \text{ грн},$$

Витрати на допоміжне обладнання K_{BC} , грн:

$$K_{BC} = 0,1 \cdot K_{TC}, \quad (5.9)$$

$$K_{BC} = 0,1 \cdot 11586 = 1159 \text{ грн.}$$

Витрати на монтаж і налагодження технічних засобів K_{MH} , грн:

$$K_{MH} = \frac{K_{mc} \cdot 50}{100}, \quad (5.10)$$

$$K_{MH} = \frac{11586 \cdot 50}{100} = 5793 \text{ грн.} \quad (5.11)$$

Капітальні вкладення K , грн:

$$K = K_{TC} + K_{BC} + K_{MH}, \quad (5.12)$$

$$K = 11586 + 1159 + 5793 = 18538 \text{ грн}$$

Витрати на електроенергію при роботі конвеєру печі з регульованим електроприводом $C_{E2} = 15366$ грн/рік.

Економічний ефект:

Наведені витрати Z_i , грн

$$Z_i = C_i + E_i \cdot \Sigma K_i, \quad (5.13)$$

де C_i – річні поточні витрати на підготовку виробництва, грн;

E_i – коефіцієнт економічної ефективності, $E_i = 0,15$;

K_i – капітальні вкладення в підготовку виробництва, грн.

Для існуючого електроприводу конвеєру печі без перетворювача частоти:

$$Z_1 = 22536 + 0,15 \cdot (18538 - 7533) = 24187 \text{ грн.}$$

Для проектного варіанту:

$$Z_2 = 15366 + 0.15 \cdot 18538 = 18146 \text{ грн}$$

Економічний ефект, грн:

$$E = Z_1 - Z_2, \quad (5.14)$$

$$E = 24187 - 18146 = 6041 \text{ грн.}$$

Термін окупності $T_{ок}$, рік

$$T_{ок} = \frac{\Sigma K}{E}, \quad (5.15)$$

де ΣK – капітальні вкладення, грн.

$$T_{ок} = \frac{18538}{6040} = 3,1 \text{ рік.}$$

Дані економічного розрахунку зводимо в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Зведені дані економічного розрахунку

Показники	Одиниця виміру	Діюча схема	Проектна схема
Капітальні вкладення	Грн.	–	18538
Витрати на електричну енергію	Грн/рік	22536	15366
Наведені витрати	Грн/рік	24187	18146
Економічний ефект	Грн/рік	6040.685	
Термін окупності	Рік	3,1	

Висновок: Економічний ефект від модернізації електропривода конвєсу печі склав 6041 гривень на рік, термін окупності проекту 3,1 року, що відповідає нормативам. Витрати на електричну енергію за проектною схемою скоротяться на 32 %, а наведені витрати на 25 %.

6 РЕЗУЛЬТАТИВНА ЧАСТИНА

Висновки та рекомендації, зроблені в кваліфікаційній роботі

У кваліфікаційній роботі проведено модернізацію електроприводу конвеєра тунельної хлібопекарської печі, розраховано потужність та обрано приводний мотор-редуктор МЧ-125 з двигуном АИР90ЛБ8 потужністю 1,1 кВт. Складено електричну принципову схему електроприводу. Розраховано параметри математичної моделі двигуна та побудовано імітаційну модель електроприводу в середовищі *Matlab-Simulink*.

За рахунок регулювання швидкості конвеєра печі за допомогою частотного перетворювача можна знизити споживання електроенергії до 35 %, коли в залежності від вимог технології швидкість конвеєра потрібно змінювати за рахунок зміни частоти обертання приводного барабана конвеєра, що було неможливо з попередньою версією приводу з прямим пуском.

У розділі з охорони праці та техніки безпеки описані організаційні та технічні заходи з електробезпеки при монтажі, пуско-налагоджувальних роботах і експлуатації електрообладнання хлібопекарської печі.

Економічна частина проекту включає в себе розрахунок ефективності та терміну окупності витрат на автоматизований електропривод конвеєра печі. Річний економічний ефект на експлуатаційних витратах склав 6041 грн, а термін окупності – 3,1 року.

Пропозиція щодо автоматизації електроприводу конвеєра печі підтверджена необхідними теоретичними розрахунками, є практичною і може бути впроваджена на хлібопекарських підприємствах України.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 – «Електрична інженерія» / Укладачі: П.І. Осадчук, В.Ф. Бабіч, А.А. Галіулін. – Одеса: ОНТУ, 2021. – 47 с.
2. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х. : Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
3. Тунельні хлібопекарські печі. Методичні вказівки для студентів, які навчаються за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування», здобувачів ступеня вищої освіти «Магістр». Укл. Ялпачик Ф.Ю., Паляничка Н.О., Янаков В.П. – Таврійський державний агротехнологічний університет, 2016. – 18 с. – URL: <http://www.tsatu.edu.ua/ophv/wp-content/uploads/sites/13/tunelni-hlibopekarski-peschi.pdf>. – Дата звернення 03.06.2024 р.
4. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов, – М.: Энергия, 1980. – 360 с.
5. Киселев, Б.Р. Ленточный конвейер. Расчет и проектирование основных узлов: учеб. пособие/ Б.Р. Киселев, М.Ю. Колобов; Иван. гос. хим.-технол. ун-т.– Иваново, 2019. – 179 с.
6. Конвейеры: справочник / Р.А. Волков и др.; Под общ. ред. Ю.А. Пертена. – Л.: Машиностроение, Ленингр, отд-ние, 1984. – 367 с.
7. Киселев, Б.Р. Ленточный конвейер. Расчет и проектирование основных узлов: Учеб. пособие/ Б.Р. Киселев, М.Ю. Колобов; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2019. – 179 с.
8. Черв'ячний мотор-редуктор МЧ-125 (МЧ-125М). – URL: https://reduktorntc-k.com.ua/produkt/red&m-red/chervyachnie/chervyachnyy_motor-reduktor_mch-125.shtm. – Дата звернення 03.06.2024 р.
- 9.6. Перетворювачі частоти Danfoss VLT 2800. – URL[^] <https://files.danfoss.com/download/Drives/MG28M250.pdf>. – Дата звернення 03.06.2024 р.
10. Удут Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод:

Учебное пособие / Л.С. Удуг, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство ТПУ, 2009. – 354 с.

11. Черных И.В. Моделирование электрических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink – СПб. ; М. : Питер : ДМК Пресс, 2008. – 288 с.

12. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.