

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ННІ/факультет	<i>Навчально-науковий технологічний інститут</i>
Кафедра	<i>Електричної інженерії та автоматизації</i>
Спеціальність	<i>141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка</i>
Форма навчання	<i>денна</i>

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до випускної кваліфікаційної роботи
бакалавра
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Карпекін Дмитро Васильович
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему *Асинхронний електропривод ротаційної машини виробництва балонних виробів*

(повна назва теми)

за матеріалами

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник	доцент,к.п.н.		Модло Є.О.
	(наук. ступінь, вчене звання)	(підпис)	(прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри
від _____ 2026 __р. № _____

Завідувач кафедри

(підпис)

Наук. ступень, вчене звання

Є.О. Модло
Ініціали, прізвище

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ**

Кафедра Електричної інженерії і автоматизації

Рівень вищої освіти бакалавр

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Електричної інженерії і автоматизації

В.о. зав. каф.

Модло Є.О.

(підпис)

(посада, вчене звання,
прізвище ініціали)

«_____»

2026 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ(КИ)

Карпекін Дмитро Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра Асинхронний електропривод
ротаційної машини виробництва балонних виробів

керівник кваліфікаційної роботи Модло Євгеній Олександрович, к.п.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «06»04.2026 р. № 238-ст

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи до кафедри 01.06.2026

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи бакалавра: статті,
патенти, промислові дослідження

Об'єкт розробки і дослідження: система асинхронного частотно-регульованого електроприводу ротаційної машини (формульованого стану) виробництва сталевих балонів. Номінальна потужність електроприводу 100 кВт, живлення від промислової мережі змінного струму 380 В, 50 Гц.

Характер навантаження – робота в тривалому режимі, близьким до безперервного режиму S1, навантаження на валу ротаційної машини характеризується як активно-реактивне зі значним моментом інерції та циклічним характером дії.

Тип системи електроприводу: режим роботи електропривода - тривалий S1, рід струму – змінний, трифазний, частотний перетворювач (інвертор на базі IGBT-модулів), напруга змінного струму 10 кВт та 380 В, відхилення напруги мережі +10 %, -15 %, частоти мережі 50 Гц±2 %

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

4.1 Аналітична частина;

4.2 Основна частина.

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

1 Загальний вигляд

2 Схема перетворювача частоти

3 Структурна схема

4 Результати моделювання

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 Аналітична частина	Модло Є.О., доцент		
2 Основна частина	Модло Є.О., доцент		

7. Дата видачі завдання «__06__» ____04____ 2026р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	30.04.2026	
2.	Основна частина	05.05.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	11.05.2026	
4.	Виконання графічної частини	26.05.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	01.06.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	16.06.2026	

Студент

(підпис)

Карпекін Д.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Модло Є.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Карпекін Д.В. «Асинхронний електропривод ротаційної машини виробництва балонних виробів» – Бакалаврська робота. – Кривий Ріг, 2026. 61 с., 25 рис., 4 табл., 15 джерел.

Об'єкт дослідження: технологічний процес формування балонних виробів на ротаційному обладнанні та система його електропривода.

Предмет дослідження: режими роботи, статичні та динамічні характеристики асинхронного електропривода з частотним керуванням для забезпечення точності обертового моменту та кутової швидкості.

Мета роботи: підвищення продуктивності ротаційної машини та якості готової продукції шляхом розробки й обґрунтування енергоефективної системи регульованого асинхронного електропривода.

У ході виконання випускної роботи було проведено огляд існуючих систем електроприводу, дано обґрунтування вибору системи електроприводу, а також викладено розробку та опис принципової схеми системи управління електроприводом.

У роботі розроблено систему автоматичного керування асинхронним електроприводом ротаційної машини на базі частотного перетворювача з векторним принципом регулювання. Здійснено розрахунок параметрів силової частини приводу, вибір потужності двигуна та давачів, а також побудовано математичну модель динамічних процесів системи. За результатами комп'ютерного моделювання у середовищі MATLAB/Simulink підтверджено точність позиціонування каруселі та плавність перехідних процесів у всіх робочих режимах. Впровадження цієї системи дозволяє усунути ударні навантаження в кінематиці обладнання та забезпечує зниження споживання електроенергії на 20-25%.

ЕЛЕКТРОПРИВОД, РОТАЦІЙНА МАШИНА, БАЛОННІ ВИРОБИ,
ЧАСТОТНЕ КЕРУВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ,
АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН, ТИРИСТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Технологічний процес роботи ротаційної машини та технічні параметри машини	10
1.1.1 Цикл ротаційного формування	10
1.2 Характеристика об'єкта	13
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	19
2.1 Розрахунок потужності і вибір двигуна. Статичні характеристики системи ПЧ-АД	19
2.2 Природна механічна характеристика АД при $U/f=\text{const}$ ($f=50$ Гц)	20
2.3 Розрахунок штучних механічних характеристик АД при $U/f=\text{const}$ ($f_1=35$, $f_2=25$, $f_3=10$)	21
2.4 Механічні характеристики ЧЧ-АД при збереженні постійності перевантажувальної здатності	26
2.5 Розрахунок параметрів та елементів силової схеми перетворювача частоти	32
2.5.1 Розрахунок та вибір силових елементів випрямляча та інвертора	32
2.5.2 Аналітичний огляд та вибір серійного перетворювача частоти	35
2.6 Математичне моделювання системи ЧР-АД	38
2.6.1 Математичний опис системи ЧР-АД	38
2.6.2 Модель ПЧ-АД у середовищі MATLAB	41
2.7 Обґрунтування вибору системи частотно-регульованого електроприводу	46
2.8 Заходи із охорони праці та безпеки при експлуатації під час експлуатації автоматизованого асинхронного електроприводу ротаційно-обкатної машини для формування металевих балонів високого тиску	52
2.8.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників при експлуатації електропривода ротаційної машини	52

2.8.2 Засоби зниження дії небезпечних і шкідливих виробничих чинників	53
2.8.3 Інженерно-технічні заходи захисту від ураження електричним струмом	54
2.8.4 Пожежна безпека	55
2.9 Висновки до основної частини	56
ВИСНОВКИ	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60
ДОДАТКИ	62

ВСТУП

Полімер - це матеріал, якого не існує в природі і який отримують у процесі хімічної обробки. Їх поширеність і широке використання у виробництві зумовлене низкою їхніх специфічних властивостей, таких як невелика щільність при достатній технологічній міцності, відмінна хімічна корозійна стійкість, високі електроізоляційні властивості та інші корисні якості. Пластизолі - це дисперсії частинок спеціальних сортів полімерів у рідкому пластифікаторі. Широке промислове застосування в даний час знайшли лише пластизолі на основі полівінілхлориду, але відомо значну кількість різних пластизолів. При нагріванні пластизоль швидко перетворюється на монолітний пластикат з хорошими фізико-механічними властивостями, а в звичайних умовах пластизолі стабільні й являють собою пастоподібну або рідку масу, що має високий електричний опір і хімічну стійкість. При виготовленні об'ємних виробів із пластизолу застосовується метод ротаційного формування. При ротаційному формуванні дозовану порцію полімеру завантажують у порожнисту форму, яку щільно закривають і приводять у обертання у двох взаємно перпендикулярних площинах з певною швидкістю, що необхідно для правильного розподілу пластизолу по об'єму форми. Одночасно форми нагрівають до температури, необхідної для набухання полімеру в пластифікаторі. Заміна електроприводу ротаційної машини на основі системи «тиристорний перетворювач - двигун постійного струму» на систему «перетворювач частоти - асинхронний двигун» може здійснюватися під час модернізації застарілого обладнання та під час проектування нового технологічного обладнання. У нашому випадку заміна двигуна постійного струму на асинхронний двигун, керований за допомогою перетворювача частоти, дозволить під час ротаційного формування змінювати кутову швидкість, що необхідно для правильного розподілу пластизолу по об'єму форми, збільшити ККД системи електроприводу, забезпечити енергозбереження та підвищити експлуатаційні показники, що в цілому забезпечить економічний ефект. Випускна робота є актуальною, оскільки

більшість регульованих електроприводів у різних сферах виробництва оснащені системою керування «ТП-ДПТ», які застаріли морально та фізично.

Метою роботи є заміна електроприводу ротаційної машини на основі системи «тиристорний перетворювач - двигун постійного струму» на систему «перетворювач частоти - асинхронний двигун».

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Технологічний процес роботи ротаційної машини та технічні параметри машини

1.1.1 Цикл ротаційного формування

Ротаційне формування - це виробництво порожнистих виробів шляхом завантаження полімеру у форму та обертання форми відносно 2-х взаємно перпендикулярних осей з одночасним нагріванням форми, при цьому полімер, поміщений у порожнину форми, утворює монолітний шар на поверхні форми. Для збереження бажаної форми полімерного виробу обертання форми триває також протягом стадії охолодження. Коли полімер достатньо затвердіє, охолодження та обертання форми припиняється, а виріб виймається з форми.

Основні етапи процесу формування:

На стадії завантаження (рис. 1.1) щільність є найважливішим параметром процесу. Щільність визначає характер заповнення форми матеріалом, а також характер руху матеріалу всередині форми під час обертання на стадії нагрівання [1, 2]. У більшій частині циклу формування форма з матеріалом обертається відносно 2-х взаємно перпендикулярних осей. Цей процес відрізняється від відцентрового формування невисокими швидкостями обертання, зазвичай 4-20 об/хв. Ротаційне формування не покладається на відцентрові сили для переміщення полімеру до стінки форми. Швидкості обертання малі, і полімер піддається постійній перемішувальній дії. Якість перемішування при цьому залежить від співвідношення швидкостей обертання, тобто від співвідношення основної та додаткової швидкостей. Зазвичай таке співвідношення дорівнює 4:1, оскільки це забезпечує рівномірне покриття внутрішньої поверхні матеріалом для більшості форм. Обертова форма з полімером всередині переміщується до печі, в якій відбувається етап нагрівання (рис. 1.2). Полімер усередині форми проходить через низку змін на стадії нагрівання.

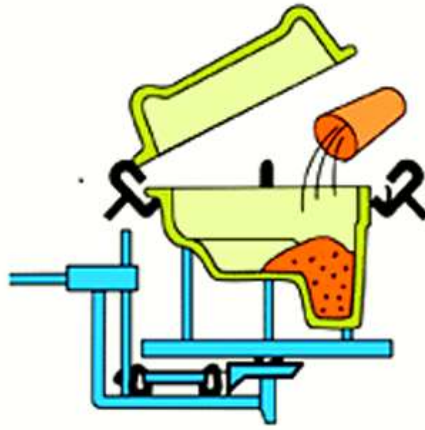


Рис. 1.1. Стадія завантаження

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

На перших стадіях процесу нагрівання стінка форми ще недостатньо нагріта, тому весь матеріал перебуває у вільному стані. При подальшому нагріванні під час обертання металева стінка форми нагрівається, і поверхня полімеру стає липкою. Злипання полімеру при досягненні температури, частинки починають прилипати до стінок форми і одна до одної, утворюючи скупчення на внутрішній стінці форми. При подальшому нагріванні починається спікання полімеру до утворення гомогенного розплаву [2, 3]. Однак під час такого спікання усередині матеріалу залишається багато повітряних включень, тобто утворюється пориста структура. Таку структуру необхідно ущільнити для отримання якісного виробу з високими фізико-механічними характеристиками. Газові включення між частинками полімеру під впливом високої температури повільно перетворюються на бульбашки і з часом зникають. Іноді їх називають бульбашками, ці газові включення не переміщуються через розплав. Бульбашки залишаються там, де вони утворилися, і зменшуються в розмірі з плином часу, коли в'язкість розплаву занадто велика для цього, [2, 3]. Зміна температури печі є єдиним способом контролю якості виробу, часу перебування в печі, швидкості обертання та швидкості охолодження. На властивості кінцевого виробу значний вплив має кожен із цих параметрів. Оптимальні значення параметрів у виробництві часто встановлюються емпіричним шляхом [3].

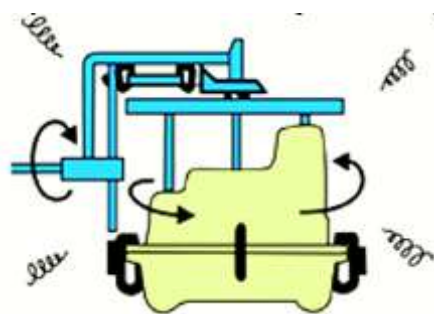


Рис. 1.2. Стадія нагрівання

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

Форму виймають із печі після досягнення необхідного ступеня ущільнення виробу, починається стадія охолодження (рис. 1.3). Поглинаючи до цього моменту тепло в печі, форма з гарячим виробом тепер починає сама віддавати енергію. Відбувається теплова інверсія в шарі розплаву полімеру, і тепловий потік змінює свій напрямок. Зовнішню поверхню форми можна охолоджувати розпиленою вологою або повітрям. Також можливе комбіноване охолодження. Метод охолодження може вплинути на якість кінцевого продукту, навіть якщо параметри нагрівання (час перебування в печі та температура печі) мають оптимальне значення. Виключно основна проблема полягає в тому, що охолодження при ротаційному формуванні відбувається тільки з зовнішньої сторони форми. Швидкість охолодження зменшується, а несиметрична природа охолодження може призвести до деформації відформованого виробу та до викривлення [2, 3]. Також слід врахувати, що кристалізація полімерів відбувається під час охолодження. Необхідно ретельно підібрати параметри охолодження: температуру та швидкість охолодження для отримання виробу з максимальними механічними характеристиками. Швидке охолодження з використанням води забезпечує найбільш оптимальні характеристики готового виробу порівняно з повільним охолодженням з використанням повітря. При різних способах охолодження механічні властивості полімеру будуть різними. Покращенню міцності та жорсткості полімеру сприяє повільніше охолодження, але вплив внутрішнього навантаження зменшує її стійкість. При стрімкому охолодженні виріб виходить міцнішим, але менш жорстким. Розміри та форма

виробу залежать від швидкості охолодження, що пояснюється зміною конфігурації усадки полімеру.

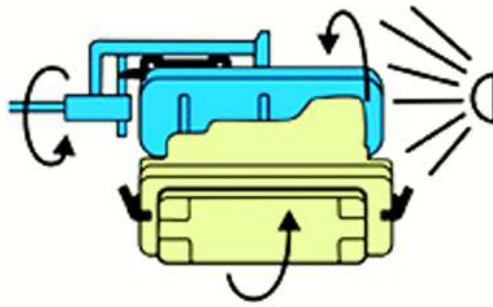


Рис. 1.3. Стадія охолодження

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

Обертання форми припиняється, і виріб виймається після досягнення достатнього ступеня охолодження (рис.1.4). На цьому етапі можна виконати певні операції з обслуговування форми, після чого нова порція полімеру завантажується у форму, форма закривається, і цикл повторюється.

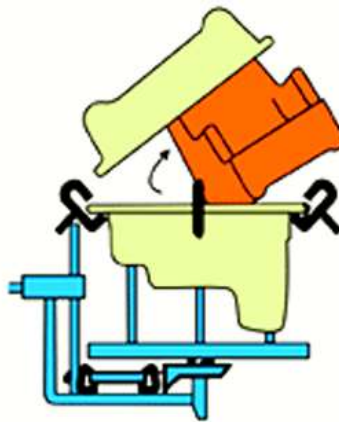
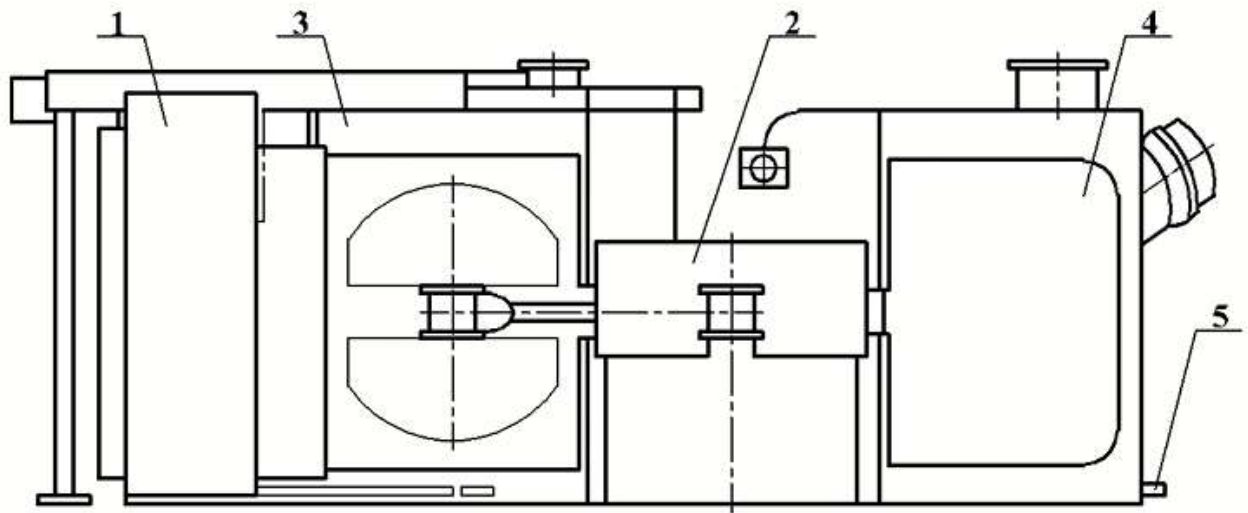


Рис. 1.4. Стадія охолодження

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

1.2 Характеристика об'єкта

Об'єктом бакалаврської роботи є ротаційної машини. Машина для ротаційного формування призначена для виробництва балонних виробів із полівінілхлоридних пластизолів за технологією ротаційного формування.



1 - пристрій керування; 2 - карусель; 3 - камера формування;

4 - камера охолодження; 5 - злив води

Рис. 1.5. Схема конструкції ротаційної машини

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

Опис конструкції та принципу роботи ротаційної машини

На рисунку 1.6 представлено кінематико-технологічну схему ротаційної машини, призначеної для виробництва балонних виробів методом послідовного багатопозиційного формування. Машина має карусельно-поворотну структуру з радіальним розташуванням робочих позицій, що забезпечує безперервно-циклічний режим обробки заготовок під час їх переміщення по колу.

Основні функціональні зони та позиції машини

Позиція завантаження-вивантаження: початкова точка технологічного циклу. На цій позиції задіяно два основних механізми: пристрій завантаження форм: забезпечує автоматичну подачу підготовленої заготовки (матриці/форми) на поворотну карусель.

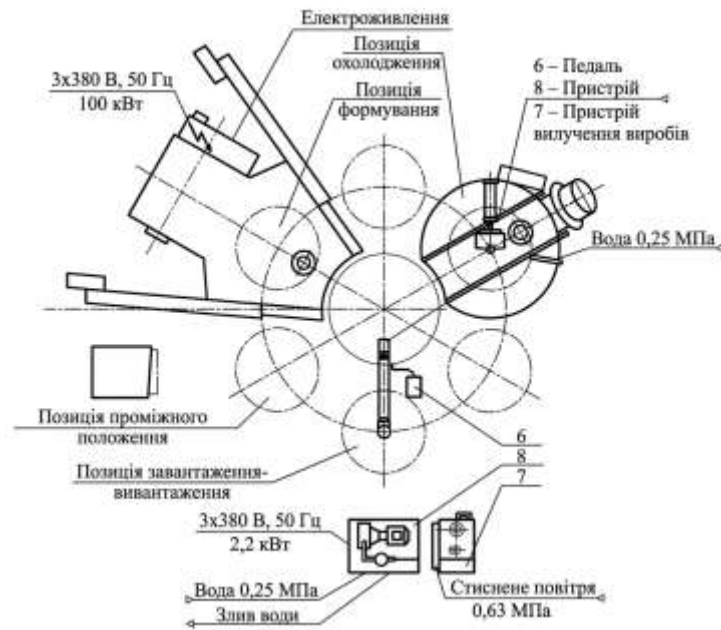


Рис. 1.6. Устрій машини

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

Пристрій виймання виробів: здійснює зняття готового балона після завершення повного циклу обробки. Керування виконавчими механізмами на цій позиції частково дублюється ногою педаллю для зручності оператора під час налагодження.

Позиція проміжного положення: служить для фіксації, центрування та попереднього прогрівання (за необхідності) заготовки перед подачею в зону деформації.

Позиція формування (робоча зона) - ключовий вузол машини, де відбувається основний технологічний вплив. Тут встановлено головний асинхронний електропривід потужністю 100 кВт (живлення від мережі 380 В, 50 Гц). Висока потужність обумовлена необхідністю подолання значних моментів опору при ротаційному розкатуванні або обтиску горловини балона.

Позиція охолодження необхідна для стабілізації геометричних параметрів виробу та зняття внутрішніх термічних напружень. У цю зону підведені два середовища: стиснене повітря під тиском 0,63 МПа (використовується для інтенсивного обдування або роботи пневмоприводів фіксації). Вода під тиском

0,25 МПа для водяного охолодження, з подальшим відведенням через систему зливу води. Задана конфігурація робочих позицій вимагає суворого узгодження швидкостей обертання та моментів на етапі формування. Це обґрунтовує необхідність застосування регульованого асинхронного електроприводу з частотним керуванням, який дозволить плавно регулювати частоту обертання головного двигуна (100кВт) залежно від технологічного навантаження, що динамічно змінюється.



Рис. 1.7. Ротаційна машина формування металевих балонів високого тиску

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

Машина використовує метод ротаційного формування балонних виробів з полівінілхлоридного пластизолу. Під час ротаційного формування дозовану порцію пластизолу завантажують у порожнисту металеву форму, яку герметично закривають і приводять до обертання у двох взаємно перпендикулярних площинах. Одночасно форми нагрівають до температури, необхідної для набухання полімеру в пластифікаторі. Під час обертання форми пластизоль рівномірно розподіляється по її внутрішній поверхні, гомогенізується, і на гарячих стінках форми утворюється тонке монолітне

покриття, яке утримується за рахунок адгезії та відцентрових сил. Після гомогенізації розплавленої композиції форму охолоджують. При витяганні виробів з нероз'ємних форм використовують пружну деформацію матеріалу виробу. Робота машини починається з вихідного положення. У вихідному положенні важелі каруселі знаходяться в проміжному положенні, двері КФ закриті, нагрівачі КФ увімкнені, двері КФ відкриті. У початковому положенні оператор завантажує форми, розташовані між позицією завантаження - вивантаження та КФ. Після нагрівання КФ протягом 40–60 хв оператор натисканням кнопки «ЦИКЛ» на УУ переводить машину з вихідного положення в режим роботи за автоматичним циклом. Відразу після натискання кнопки ЦИКЛ починають відкриватися двері КФ і відключаються ТЕН та вентилятор КФ. Повністю відкрите положення дверей КФ та КО є необхідною умовою початку повороту каруселі. Поворот каруселі відбувається з постійною швидкістю. При наближенні важелів каруселі до робочого положення швидкість обертання ступенево зменшується, а при досягненні робочого положення карусель зупиняється і механічно фіксується. Відразу після фіксації каруселі починається обертання форм у позиціях формування та охолодження, одночасно закриваються двері КФ. З моменту повного закриття дверей КФ вмикається ТЕН і починається автоматичний відлік часу формування виробів. Після закінчення заданого часу формування УУ видає попереджувальний звуковий сигнал, відчиняються двері КФ і повторюється описаний вище цикл роботи машини. В результаті форми послідовно проходять через позиції завантаження - вивантаження, формування та охолодження. Протягом першого циклу формування КО не працює. З початком другого та наступних за ним циклів формування одночасно із закриттям дверей КФ закриваються двері КО та здійснюється охолодження форм водою та повітрям.

Найбільший вплив на хід процесу мають характеристики матеріалу та параметри процесу, серед яких можна відзначити такі їхні переваги та недоліки.

Найважливіші переваги ротаційного формування:

- готовий виріб може бути виготовлений суцільним, без з'єднань або без зварних швів;

- кінцевий продукт фактично не має внутрішніх напружень;
- форми для формування недорогі і можуть бути швидко виготовлені;
- дрібносерійне виробництво економічно вигідне;
- безвідходне виробництво;
- є можливість виготовляти багатошарові вироби;
- різні типи виробів можуть формуватися на одній машині;
- легко формувати внутрішні вставки.

Головні недоліки ротаційного формування:

- тривалий час формування;
- обмежений вибір матеріалів для формування.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Розрахунок потужності і вибір двигуна. Статичні характеристики системи ПЧ-АД

Проведемо розрахунок природної та штучної механічної характеристики асинхронного двигуна 4A80B4У3.

Таблиця 2.1

Паспортні дані асинхронного двигуна 4A80B4У3

Параметр	Значення
Потужність P_n , кВт	1,5
Синхронна швидкість обертання n_n , об/хв	1500
Коефіцієнт потужності, $\cos\phi$	0,83
Номінальне ковзання, $S_{ном}$	0,058
Напруга U , В	380
Взаємний реактивний опір X_1 ,	1,9
Активний опір статора R_1	0,12
Реактивний опір статора X_1 ,	0,078
Енергопоказники ККД при $P_2/P_{2ном}$	77
Енергопоказники при $\cos\phi$ при	0,88
Активний опір ротора R_2''	0,069
Реактивний опір ротора X_2'' ,	0,12
Момент інерції, J_d , кг·м ²	0,0033

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]



Рис.2.1. Асинхронний двигун 4A80B4У3

2.2 Природна механічна характеристика АД при $U/f=\text{const}$ ($f=50$ Гц)

Розрахуємо активний опір R_1 та реактивний опір X_1 :

$$X_1 = \frac{2X'_1 \cdot X_\mu}{X_\mu + \sqrt{X_\mu^2 + 4X'_1 \cdot X_\mu}} = \frac{2 \cdot 0,078 \cdot 1,9}{1,9 + \sqrt{1,9^2 + 4 \cdot 0,078 \cdot 1,9}} = 0,075 \quad (2.1)$$

$$R_1 = \frac{R'_1 \cdot X_1}{X'_1} = \frac{0,12 \cdot 0,075}{0,078} = 0,115 \quad (2.2)$$

$$X'_2 = \frac{2X''_2 \cdot X_\mu}{X_\mu + \sqrt{X_\mu^2 + 4X''_2 \cdot X_\mu}} = \frac{2 \cdot 0,12 \cdot 1,9}{1,9 + \sqrt{1,9^2 + 4 \cdot 0,12 \cdot 1,9}} = 0,105 \quad (2.3)$$

$$R'_2 = \frac{R''_2 \cdot X'_2}{X''_2} = \frac{0,069 \cdot 0,105}{0,12} = 0,06 \quad (2.4)$$

Розрахуємо значення критичного ковзання s_k , прирівнюючи $dM/ds = 0$, при чому двигун розвиває максимальний (критичний) момент:

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} = \pm \frac{0,06}{\sqrt{0,115^2 + (0,075 + 0,105)^2}} = 0,281 \quad (2.5)$$

Знак « $\pm$ » стосується режиму руху або гальмування проти включення.

Знаходимо значення максимального (критичного) моменту, підставляючи значення K_s у вираз для моменту асинхронного двигуна:

$$M_k = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 \cdot (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x'_2)^2})} \quad (2.6)$$

$$M_k = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157 \cdot (0,115 + \sqrt{0,115^2 + (0,075 + 0,105)^2})} = 1407,244 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.7)$$

де ω_0 - кутова синхронна швидкість;

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ рад/с} \quad (2.8)$$

де n - швидкість обертання в об/хв.

Для знаходження моменту асинхронного двигуна в робочому режимі розраховуємо природну механічну характеристику:

$$M_D = \frac{2M_K(1 + as_K)}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} + 2as_K} \quad (2.9)$$

де M_K - максимальний (критичний) момент двигуна;

s_K - критичне ковзання;

$$a = \frac{R_1}{R_2'} = \frac{0,115}{0,06} = 1,917$$

$$s = 0..1 \quad (2.10)$$

$$as_K = 0,539$$

Розрахуємо момент для ковзання асинхронного двигуна та побудуємо природну механічну характеристику; результати розрахунків наведено в таблиці 2.2:

$$M_D = \frac{2M_K(1 + as_K)}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} + 2as_K} = \frac{2 \cdot 1495,728 \cdot (1 + 0,52)}{\frac{s}{0,297} + \frac{0,297}{s} + 2 \cdot 0,52} \quad (2.11)$$

2.3 Розрахунок штучних механічних характеристик АД при $U/f=\text{const}$ ($f_1=35$, $f_2=25$, $f_3=10$)

Для побудови механічних характеристик розраховуємо кутову швидкість для всіх значень ковзання:

$$\omega = \omega_0 - \omega_0 \cdot s \quad (2.12)$$

Необхідно перерахувати індуктивний опір для розрахунку значень кутової швидкості для частоти 35 Гц:

$$L = \frac{X}{2\pi \cdot f} \quad (2.13)$$

$$X = 2\pi \cdot f \cdot L$$

$$L = \frac{X_1}{2\pi \cdot f} = \frac{0,075}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,000239 \text{ Гн} \quad (2.14)$$

$$X_{135} = 2\pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 35 \cdot 0,000239 = 0,0525 \text{ Ом}$$

$$X'_{235} = \frac{X'_2}{1,429} = \frac{0,105}{1,429} = 0,0735 \text{ Ом}$$

Для частоти 25 Гц розрахуємо індуктивний опір:

$$X_{125} = 2\pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 25 \cdot 0,000239 = 0,0375 \text{ Ом} \quad (2.15)$$

$$X'_{225} = \frac{X'_2}{2} = \frac{0,105}{2} = 0,0525 \text{ Ом} \quad (2.16)$$

Для частоти 10 Гц розрахуємо індуктивний опір:

$$X_{110} = 2\pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 0,000239 = 0,015 \text{ Ом} \quad (2.17)$$

$$X'_{210} = \frac{X'_2}{5} = \frac{0,105}{5} = 0,021 \text{ Ом} \quad (2.18)$$

При частоті 35 Гц розрахуємо значення критичного ковзання:

$$s_{K35} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{135} + X'_{235})^2}} = \pm \frac{0,06}{\sqrt{0,115^2 + (0,0525 + 0,0735)^2}} = 0,351 \quad (2.19)$$

$$as_{k35} = \frac{R_1}{R'_2} \cdot s_{K35} = \frac{0,115}{0,06} \cdot 0,351 = 0,673 \quad (2.20)$$

$$as_{k35} = \frac{R_1}{R'_2} \cdot s_{K35} = \frac{0,115}{0,06} \cdot 0,351 = 0,673 \quad (2.21)$$

$$\omega_{035} = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{6,28 \cdot 35}{2} = 109,9 \text{ рад/с} \quad (2.22)$$

При частоті 25 Гц розрахуємо значення критичного ковзання:

$$s_{K25} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{125} + X'_{225})^2}} = \pm \frac{0,06}{\sqrt{0,115^2 + (0,0375 + 0,0525)^2}} = 0,411 \quad (2.23)$$

$$as_{k25} = \frac{R_1}{R'_2} \cdot s_{K25} = \frac{0,115}{0,06} \cdot 0,411 = 0,789 \quad (2.24)$$

$$\omega_{025} = \frac{2\pi f_2}{p} = \frac{6,28 \cdot 25}{2} = 78,5 \text{ рад/с} \quad (2.25)$$

При частоті 10 Гц розрахуємо значення критичного ковзання:

$$s_{K10} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{110} + X'_{210})^2}} = \pm \frac{0,06}{\sqrt{0,115^2 + (0,015 + 0,021)^2}} = 0,498 \quad (2.26)$$

$$as_{k10} = \frac{R_1}{R'_2} \cdot s_{K10} = \frac{0,115}{0,06} \cdot 0,498 = 0,955 \quad (2.27)$$

$$\omega_{010} = \frac{2\pi f_3}{p} = \frac{6,28 \cdot 10}{2} = 31,4 \text{ рад/с} \quad (2.28)$$

Розрахуємо значення критичного моменту. Згідно закону частотного регулювання $U/f=\text{const}$, то отримуємо $220/50=4,4$; звідки випливає, що: при частоті $f_1=35$ Гц, $U_{\phi 1}=154$ В, при частоті $f_2=25$, Гц $U_{\phi 2}=110$ В, при частоті $f_3=10$ Гц, $U_{\phi 3}=44$ В.

Для частоти 35 Гц розрахуємо значення критичного моменту:

$$M_{\kappa 35} = \frac{3U_{\phi 1}^2}{2\omega_{035} \cdot (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_{135} + X'_{235})^2})} \quad (2.29)$$

$$M_{\kappa 35} = \frac{3 \cdot 154^2}{2 \cdot 109,9 \cdot (0,115 + \sqrt{0,115^2 + (0,0525 + 0,0735)^2})} = 1131,798 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для частоти 25 Гц розрахуємо критичний момент:

$$M_{\kappa 25} = \frac{3U_{\phi 2}^2}{2\omega_{025} \cdot (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_{125} + X'_{225})^2})} \quad (2.30)$$

$$M_{\kappa 25} = \frac{3 \cdot 110^2}{2 \cdot 78,5 \cdot (0,115 + \sqrt{0,115^2 + (0,0375 + 0,0525)^2})} = 885,863 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для частоти 10 Гц розрахуємо критичний момент:

$$M_{\kappa 10} = \frac{3U_{\phi 3}^2}{2\omega_{010} \cdot (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_{110} + X'_{210})^2})} \quad (2.31)$$

$$M_{\kappa 10} = \frac{3 \cdot 44^2}{2 \cdot 31,4 \cdot (0,115 + \sqrt{0,115^2 + (0,015 + 0,021)^2})} = 392,714 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.32)$$

При частотах 35, 25, 10 Гц обчислюємо значення моментів асинхронного двигуна та побудуємо штучні механічні характеристики за формулою:

$$M_{\text{д}} = \frac{2M_K(1 + as_K)}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} + 2as_K} \quad (2.32)$$

Таблиця 2.2

Результати розрахунку природних та штучних характеристик

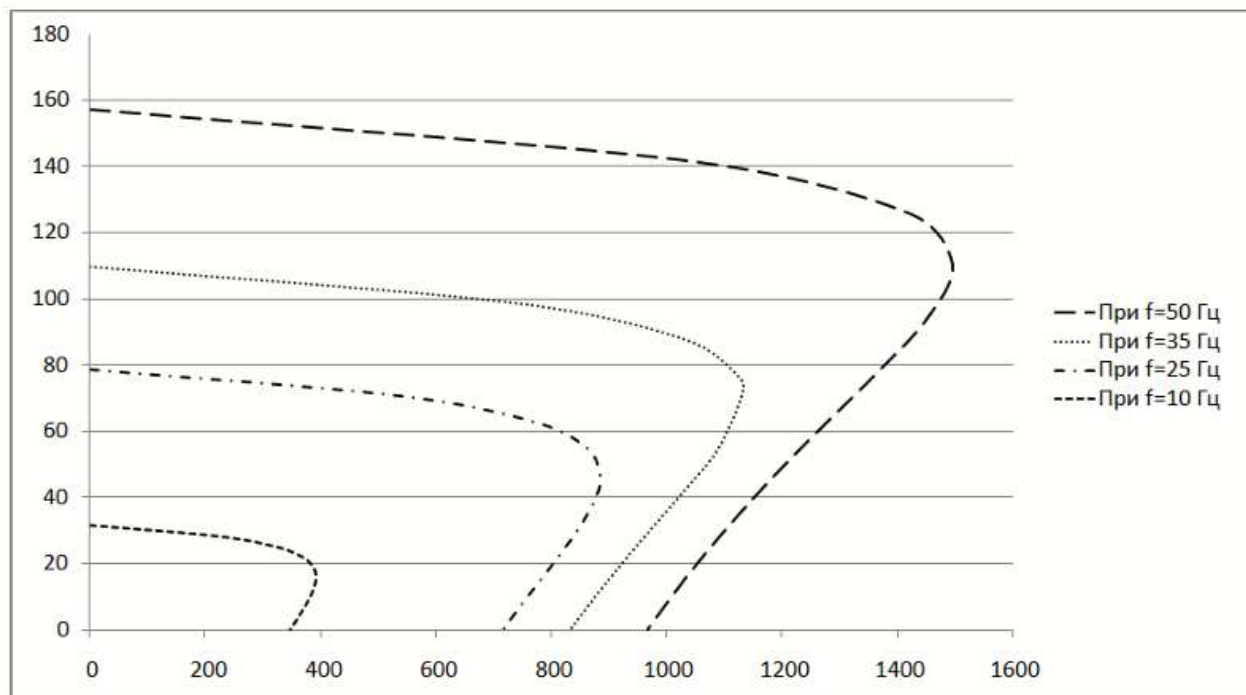
При 50 Гц											
s	0	0,10	0,20	0,2810	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1
M	0	1046,084 0	1421,652 0	1495,728 0	1453,044 0	1370,614 0	1278,975 0	1189,947 0	1107,717 0	1033,341 0	966,6260
ω	157	141,30	125,60	110,3710	94,20	78,50	62,80	47,10	31,40	15,70	0

При 35 Гц											
s	0	0,10	0,20	0,30	0,351	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,0
M	0	736,6410	1031,654 0	1123,504 0	1131,798 0	1090,567 0	1040,269 0	985,7530	931,8510	880,6760	833,0390
ω	109,90	98,9110	87,9210	76,9310	71,32511 0	54,9510	43,9610	32,9710	21,9810	10,9910	0

При 25 Гц											
s	0	0,10	0,20	0,30	0,4110	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1
M	0	534,3880	769,3960	861,7950	885,8630	876,4220	851,3950	819,3810	784,9040	750,3030	716,7690
ω	78,50	70,650	62,80	54,950	46,23650	39,250	31,40	23,550	15,70	7,850	0

При 10 Гц											
s	0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,4980	0,60	0,70	0,80	0,90	1
M	0	216,550	319,7910	368,0160	387,9310	392,7140	389,2480	381,2990	370,9930	359,5570	347,7130
ω	31,40	28,260	25,120	21,980	18,840	15,76280	12,560	9,420	6,280	3,140	0

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

**Рис. 2.1. Механічні характеристики АД при частотному регулюванні**

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

2.4 Механічні характеристики ЧЧ-АД при збереженні постійності перевантажувальної здатності

Використовуючи Т-подібну схему заміщення, зручно проводити аналіз властивостей асинхронного двигуна при частотному керуванні:

а) Відносна частота статора:

б) Відносна частота струму статора або параметри абсолютного ковзання:

$$\beta = \frac{\Delta\omega}{\omega_{1H}} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_{1H}} = \frac{f_S}{f_{1H}} \quad (2.33)$$

де β - відношення абсолютного ковзання при номінальній частоті до синхронної швидкості.

$$s = \frac{\Delta\omega}{\omega_1} = \frac{f_2 f_{1H}}{f_1 f_{1H}} = \frac{\beta}{\alpha} \quad (2.34)$$

в) Відносна напруга:

$$\gamma = \frac{U}{U_H} \quad (2.35)$$

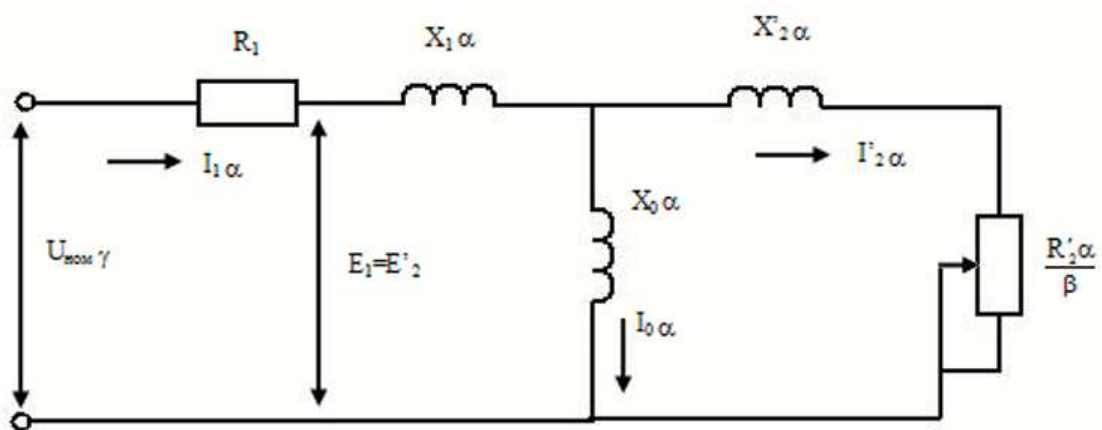


Рис. 2.2. Схема заміщення асинхронного двигуна при частотному керуванні

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

У активному опорі статора величина впливу зниження напруги на характеристики двигуна залежить не тільки від його параметрів, а й від закону

частотного регулювання. Напруга регулюється лише у функції α і не залежить від β , це найбільш сильно проявляється в тому випадку, коли певне значення напруги не регулюється при зміні навантаження заданої частоти. Такими законами є $U/f = \text{const}$; $fU = \text{const}$; $U/f^2 = \text{const}$. При управлінні за законом $U/f = \text{const}$, або $\gamma = \alpha$, зі зниженням частоти різко знижується максимальний момент двигуна, як наслідок цього жорсткість механічних характеристик зменшується. Це призводить до збільшення втрат двигуна при низьких частотах, через зменшення перевантажувальної здатності знижується надійність роботи, а робота двигуна виявляється взагалі неможливою при частотах, близьких до нуля. Расчеты для 50 Гц:

$$a = \frac{f_1}{f_{1\text{НОМ}}} = 1$$

$$b = R_1 \cdot (1 + \tau_2) = 0,115 \cdot (1 + 0,055) = 0,1213$$

$$c = X_\mu \cdot \tau = 1,9 \cdot 0,096 = 0,1824 \quad (2.36)$$

$$d = \frac{R_1}{X_\mu} = \frac{0,115}{1,9} = 0,06$$

$$e = 1 + \tau_1 = 1 + 0,039 = 1,039 \quad (2.37)$$

$$\tau_1 = \frac{X_1}{X_\mu} = \frac{0,075}{1,9} = 0,039 \quad (2.38)$$

$$\tau_2 = \frac{X'_2}{X_\mu} = \frac{0,105}{1,9} = 0,055 \quad (2.39)$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2 = 0,039 + 0,055 + 0,039 \cdot 0,055 = 0,096$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{0,115 + \sqrt{(0,1213^2 + 0,1824^2)(0,06^2 + 1,039^2)}}{0,115 + \sqrt{(0,1213^2 + 0,1824^2)(0,06^2 + 1,039^2)}}} = 1 \quad (2.40)$$

$$M_{K\alpha} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157} \cdot \frac{1}{0,115 + \sqrt{(0,1213^2 + 0,1824^2)(0,06^2 + 1,039^2)}} = 1348,164 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Розрахунки для 35 Гц:

$$a = \frac{f_1}{f_{1HOM}} = \frac{35}{50} = 0,7 \quad (2.41)$$

$$b = R_1 \cdot (1 + \tau_2) = 0,115 \cdot (1 + 0,0387) = 0,119$$

$$c = X_\mu \cdot \tau = 1,9 \cdot 0,067 = 0,127 \quad (2.42)$$

$$d = \frac{R_1}{X_\mu} = \frac{0,115}{1,9} = 0,06$$

$$e = 1 + \tau_1 = 1 + 0,0276 = 1,0276$$

$$\tau_1 = \frac{X_{135}}{X_\mu} = \frac{0,0525}{1,9} = 0,0276 \quad (2.43)$$

$$\tau_2 = \frac{X'_{235}}{X_\mu} = \frac{0,0735}{1,9} = 0,0387$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2 = 0,0276 + 0,0387 + 0,0276 \cdot 0,0387 = 0,067$$

$$\gamma = \frac{0,115 \cdot 0,7 + \sqrt{(0,119^2 + 0,127^2 \cdot 0,7^2)(0,06^2 + 1,0276^2 \cdot 0,7^2)}}{0,115 + \sqrt{(0,119^2 + 0,127^2)(0,06^2 + 1,0276^2)}} = 0,88 \quad (2.44)$$

$$M_{\kappa\alpha} = \frac{3 \cdot 154^2}{2 \cdot 109,9} \cdot 0,88^2 \cdot \frac{1}{0,115 \cdot 0,7 + \sqrt{(0,119^2 + 0,127^2 \cdot 0,7^2)(0,06^2 + 1,0276^2 \cdot 0,7^2)}} = 1335,476 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.45)$$

Розрахунок для 25 Гц:

$$a = \frac{f_1}{f_{1HOM}} = \frac{25}{50} = 0,5$$

$$b = R_1 \cdot (1 + \tau_2) = 0,115 \cdot (1 + 0,0276) = 0,118$$

$$c = X_\mu \cdot \tau = 1,9 \cdot 0,0478 = 0,091$$

$$d = \frac{R_1}{X_\mu} = \frac{0,115}{1,9} = 0,06$$

(2.46)

$$e = 1 + \tau_1 = 1 + 0,0197 = 1,0197$$

$$\tau_1 = \frac{X_{125}}{X_\mu} = \frac{0,0375}{1,9} = 0,0197 \quad (2.47)$$

$$\tau_2 = \frac{X'_{225}}{X_\mu} = \frac{0,0525}{1,9} = 0,0276$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2 = 0,0197 + 0,0276 + 0,0197 \cdot 0,0276 = 0,0478 \quad (2.48)$$

$$\gamma = \frac{0,115 \cdot 0,5 + \sqrt{(0,118^2 + 0,091^2 \cdot 0,5^2)(0,06^2 + 1,0197^2 \cdot 0,5^2)}}{0,115 + \sqrt{(0,118^2 + 0,091^2)(0,06^2 + 1,0197^2)}} = 0,841 \quad (2.49)$$

$$M_{\kappa\alpha} = \frac{3 \cdot 110^2}{2 \cdot 78,5} \cdot 0,841^2 \cdot \frac{1}{0,115 \cdot 0,5 + \sqrt{(0,118^2 + 0,091^2 \cdot 0,5^2)(0,06^2 + 1,0197^2 \cdot 0,5^2)}} = 1331,546 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Розрахунок для 10 Гц:

$$a = \frac{f_1}{f_{1HOM}} = \frac{10}{50} = 0,2 \quad (2.50)$$

$$b = R_1 \cdot (1 + \tau_2) = 0,115 \cdot (1 + 0,011) = 0,1163$$

$$c = X_\mu \cdot \tau = 1,9 \cdot 0,019 = 0,0361$$

$$d = \frac{R_1}{X_\mu} = \frac{0,115}{1,9} = 0,06 \quad (2.51)$$

$$e = 1 + \tau_1 = 1 + 0,0079 = 1,0079$$

$$\tau_1 = \frac{X_{110}}{X_\mu} = \frac{0,015}{1,9} = 0,0079$$

$$\tau_2 = \frac{X'_{220}}{X_\mu} = \frac{0,021}{1,9} = 0,011$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2 = 0,0079 + 0,011 + 0,0079 \cdot 0,011 = 0,019$$

$$\gamma = \frac{0,115 \cdot 0,2 + \sqrt{(0,1163^2 + 0,0361^2 \cdot 0,2^2)(0,06^2 + 1,0079^2 \cdot 0,2^2)}}{0,115 + \sqrt{(0,1163^2 + 0,0361^2)(0,06^2 + 1,0079^2)}} = 0,826 \quad (2.52)$$

$$M_{\kappa\alpha} = \frac{3 \cdot 44^2}{2 \cdot 31,4} \cdot 0,826^2 \cdot \frac{1}{0,115 \cdot 0,2 + \sqrt{(0,1163^2 + 0,0361^2 \cdot 0,2^2)(0,06^2 + 1,0079^2 \cdot 0,2^2)}} = 1328,21 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Перезавантажувальна здатність є постійною при постійному потоці, критичне ковзання β_k є постійним, при будь-якій частоті механічні характеристики будуть відповідними. Знаходимо критичне ковзання:

$$\beta_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} = 0,281 \quad (2.53)$$

для 35 Гц:

$$\beta_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_{140} + X_{240}')^2}} = 0,351$$

для 25 Гц:

$$\beta_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_{130} + X_{230}')^2}} = 0,411 \quad (2.54)$$

для 10 Гц:

$$\beta_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_{120} + X_{220}')^2}} = 0,498$$

Розраховуємо максимальний момент двигуна та будуємо природну механічну характеристику ($M_\alpha(\beta)$ та $M_d(s)$):

$$M_\alpha(\beta) = \frac{2M_{K\alpha}}{\frac{\beta}{\beta_k} + \frac{\beta_k}{\beta}} \quad (2.55)$$

Таблиця 2.3

Результати розрахунку природних та штучних характеристик при $U/f=\text{const}$

При 50 Гц											
β	0	0,10	0,20	0,2810	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1
M	0	851,6860	1273,809 0	1348,164 0	1268,271 0	1151,608 0	1035,629 0	932,1690	843,070	767,0770	702,220
ω	157	141,30	125,60	110,3710	94,20	78,50	62,80	47,10	31,40	15,70	0

При 35 Гц											
β	0	0,10	0,20	0,30	0,3510	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1
M	0	703,8270	1148,895 0	1319,184 0	1335,476 0	1256,031 0	1164,117 0	1070,208 0	982,7070	904,150	834,6720
ω	109,90	98,910	87,920	76,930	71,32510	54,950	43,960	32,970	21,980	10,990	0

При 25 Гц											
β	0	0,10	0,20	0,30	0,4110	0,50	0,60	0,70	0,80	0,9	1
M	0	611,740	1047,794 0	1268,183 0	1331,546 0	1306,369 0	1241,619 0	1162,767 0	1082,460	1006,289 0	936,360
ω	78,50	70,650	62,800	54,9500	46,23650	39,250	31,40	23,550	15,70	7,850	0

При 10 Гц											
β	0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,4980	0,60	0,70	0,80	0,90	1
M	0	512,7430	918,6660	1174,155 0	1296,945 0	1328,210	1305,482 0	1254,774	1191,794	1125,334	1060,010
ω	31,40	28,260	25,120	21,980	18,840	15,76280	12,560	9,420	6,280	3,140	0

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [8]

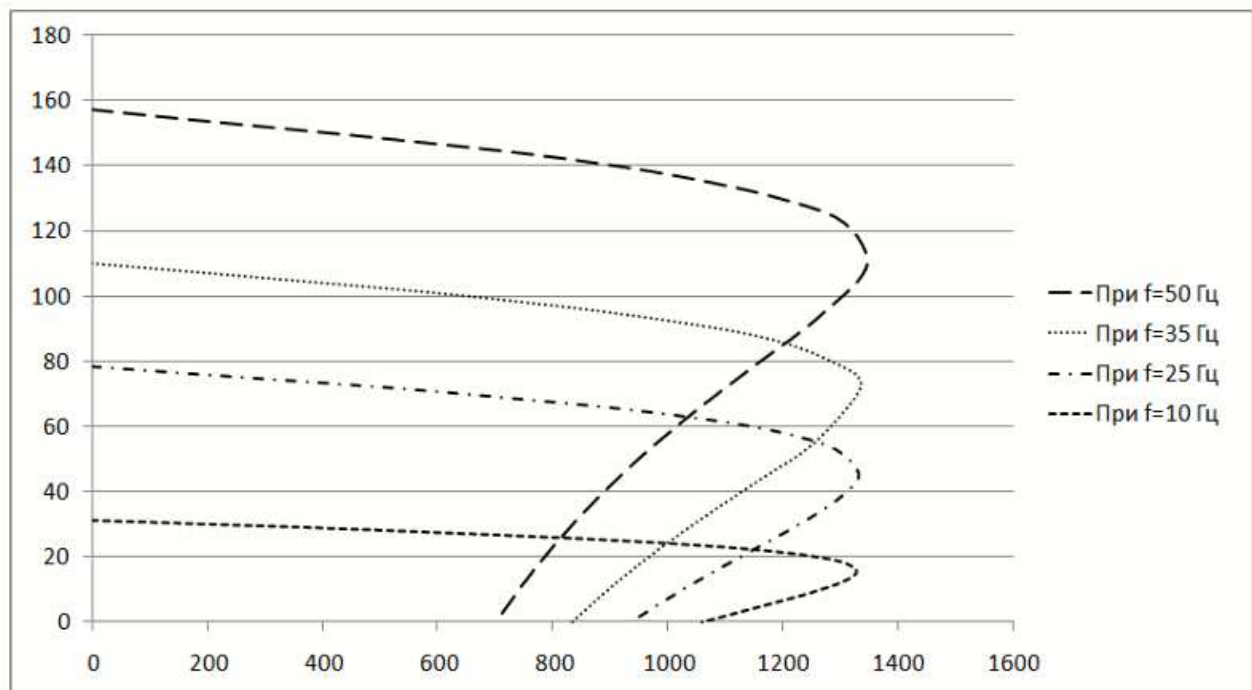


Рис. 2.3. Механічні характеристики при постійних значеннях критичного моменту

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

Зі змінюю частоти кутова швидкість зменшується, але при цьому зменшується значення критичного моменту, що видно з побудованих механічних характеристик асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором для різних частот. Це призводить до погіршення якісних характеристик двигуна. Доцільно, змінюючи частоту, зменшувати кутову швидкість обертання, але при цьому зберігати постійне значення критичного моменту, що дозволить досягти більш якісного частотного регулювання асинхронного короткозамкнутого двигуна.

Якщо напруга змінюється пропорційно до частоти, максимальний крутний момент двигуна залишається постійним при зміні частоти. Тоді значенням активного опору статора з $x_k = x_1 + x'_2$ можна знехтувати при порівняно високих частотах. Активний опір статора стає порівнянним із значенням x_k , і максимальний крутний момент двигуна знижується при подальшій зміні частоти. Це відбувається як наслідок впливу на активний опір статора загальної прикладеної напруги, зменшення потоку двигуна через збільшення частки падіння напруги, так і при незмінному потоці - до зменшення моменту внаслідок зменшення струму ротора, що призводить навіть до зменшення абсолютного критичного ковзання.

2.5 Розрахунок параметрів та елементів силової схеми перетворювача частоти

2.5.1 Розрахунок та вибір силових елементів випрямляча та інвертора

$$U_H = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{U_{SI}}{\mu_{\max}} \quad (2.56)$$

Обираємо асинхронний двигун серії 4А, призначений спеціально для розрахунку частотного регулювання.

Потужність P_H , кВт Номінальний струм при 380 В I_H , А Номінальна частота обертання пн, об/хв Коефіцієнт потужності, $\cos\varphi$ 1,52,73814130,83

Таблиця 2.4

Дані двигуна 4A180S4Y3

Потужність P_H , кВт	Номінальний струм при 380 В I_H , А	Номінальна частота обертання пн, об/хв	Коефіцієнт потужності, $\cos\varphi$
1,5	2,738	1413	0,83

Знайдемо амплітудне значення струму статора за заданих коефіцієнтів потужності двигуна та потужності:

$$I_{sm} = \frac{P_H \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos\varphi} = \frac{1,5 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,83} = 3,883 \text{ A} \quad (2.57)$$

Розрахуємо середнє значення струму через транзистор за отриманим амплітудним значенням струму статора:

$$I_{VT} = \frac{I_{sm}}{2\pi} \left(1 + \frac{\pi\mu}{4} \cos\varphi_s\right) = \frac{3,883}{2 \cdot 3,14} \left(1 + \frac{3,14 \cdot 0,992}{4} \cdot 0,83\right) = 1,018 \text{ A} \quad (2.58)$$

Коли протягом тривалого часу змінюється амплітудне значення струму навантаження, що під час роботи на низьких частотах для транзистора буде найбільш важким режимом. У цьому випадку середнє значення робочого струму через тиристор складе:

$$I_T = \frac{I_{s,m}}{2} (1 + \mu) = 3,867 \text{ A} \quad (2.59)$$

Найбільш важким режимом для тиристора буде випадок, коли він протягом тривалого часу комутує амплітудне значення струму навантаження, якщо АІН працює при досить низькій вихідній частоті. Середнє значення струму через діоди зворотного струму визначимо за формулою:

$$I_{VD} = \frac{I_{sm}}{2\pi} \left(1 - \frac{\pi\mu}{4} \cos\varphi_s\right) = \frac{3,883}{2 \cdot 3,14} \left(1 - \frac{3,14 \cdot 0,992}{4} \cdot 0,83\right) = 0,219 \text{ A} \quad (2.60)$$

Робота інвертора на дуже низьких частотах (під час запуску) у режимі максимального навантаження діода:

$$I_d = \frac{I_{s,m}}{2} (1 - \mu) = 0,015 A \quad (2.61)$$

Коли струм від АІН спрямований до джерела живлення (гальмування), вибір діодів і транзисторів АІН здійснюємо виходячи з напруги на вході інвертора з урахуванням перенапруг, які можуть виникнути на компенсаційному конденсаторі. Цю напругу вибираємо виходячи з допустимого перенапруження конденсатора ΔU_c .

Розрахуємо значення напруги на вході:

$$\begin{aligned} U_{II} &= 500,57 \text{ В} \\ \Delta U_c &= 100 \text{ В} \\ U_{IPVT, \max} &= 600,57 \text{ В} \end{aligned} \quad (2.62)$$

Розрахунок гальмівного резистора

Можна використовувати підключення на час гальмування спеціального гальмівного резистора R_T для збільшення допустимого гальмівного моменту в схемі без рекуперації енергії в мережу. Щоб під час гальмування не відбувалося замикання випрямляча, опір цього резистора повинен вибиратися таким чином. Опір розрахуємо за формулою:

$$R_T = \frac{U_{II}}{I_{II \max}} \quad (2.63)$$

Розрахуємо максимальне значення постійного струму за формулою:

$$I_{II} = \frac{3}{4} \mu I_{sm} \cos \varphi_{S1} = \frac{3}{4} \cdot 0,992 \cdot 3,883 \cdot 0,83 = 2,3978 \text{ А} \quad (2.64)$$

Розрахуємо гальмівний опір:

$$R_T = \frac{U_{II}}{I_{II \max}} = \frac{500,57}{2,3977} = 208,762 \approx 209 \text{ Ом} \quad (2.65)$$

2.5.2 Аналітичний огляд та вибір серійного перетворювача частоти

Частотне керування є ефективним методом регулювання швидкості асинхронних і синхронних електродвигунів. Стало можливим керувати моментом і швидкістю електродвигуна за заданими параметрами відповідно до характеру навантаження. З розвитком силової мікропроцесорної та напівпровідникової техніки стало можливим створення перетворювачів частоти. Це дозволяє без важких перехідних процесів в електричних мережах і технологічних системах здійснювати точне регулювання практично будь-якого процесу з найбільш економічним ефектом. Застосування ЧРП можна рекомендувати для всіх механізмів, що працюють з приводом від електродвигунів змінного струму. Впровадження частотного регулювання електроприводів дозволяє:

- підвищити надійність роботи систем та обладнання;
- поліпшити якість послуг, що надаються, та продукції, що виробляється;
- автоматизувати виробництво;
- економити енергію та ресурси.

Двигун змінного струму з перетворювачем частоти може забезпечити високу якість динамічних і статичних характеристик, мати діапазон регулювання крутного моменту та швидкості, близькі до тих, які має двигун постійного струму при регулюванні напруги на якорі. Перетворювачі в режимі джерела струму формують на виході криву струму, при цьому крива напруги близька до синусоїдальної, а фазовий зсув основної гармоніки струму машини відносно основної гармоніки напруги залежить від її навантаження та внутрішнього опору машини.

Силовa схема перетворювача наведена на рисунку 2.4.

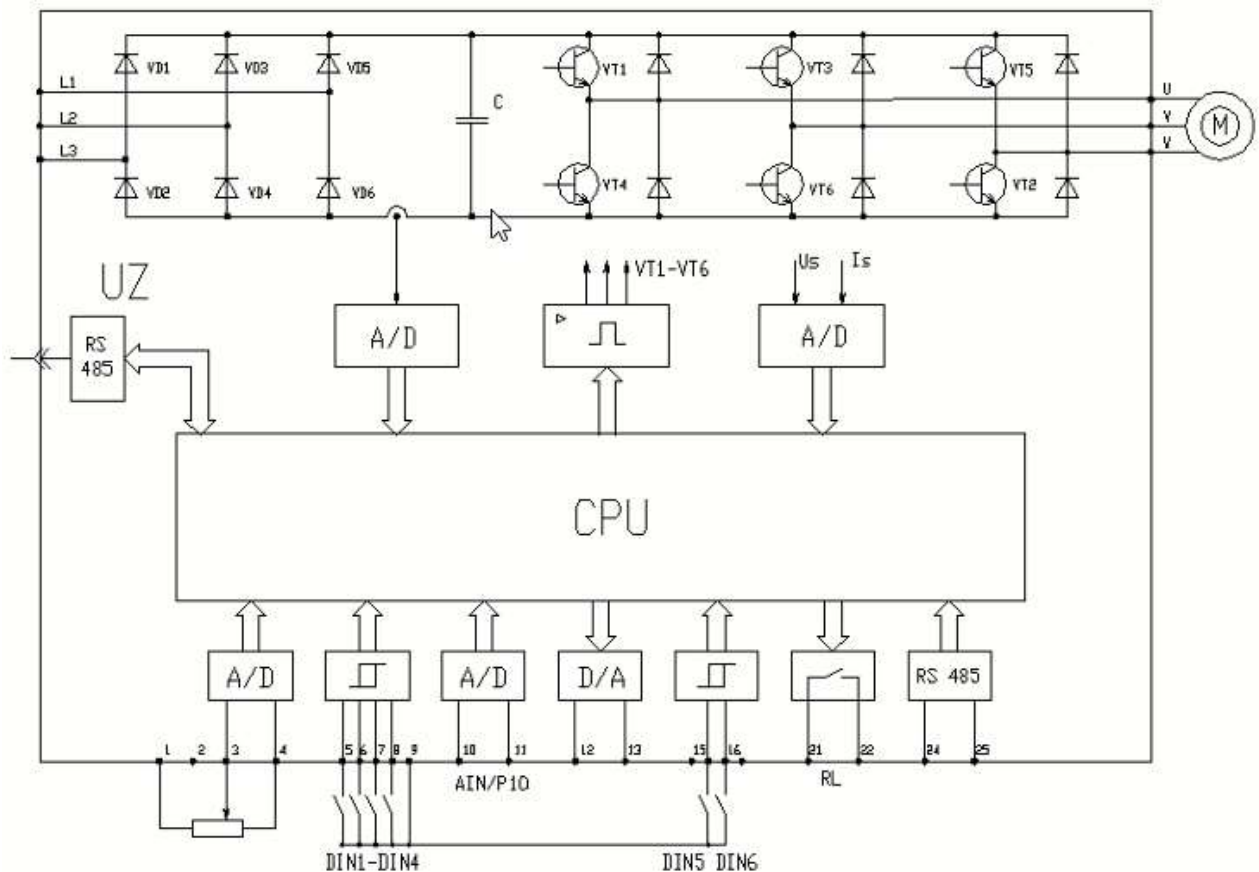


Рис. 2.4. Схема перетворювача частоти з ШІМ

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

Перетворювачі Micromaster 420 є серійними перетворювачами для регулювання трифазних двигунів. Окремі моделі, що постачаються, мають діапазон потужностей від 120 Вт при однофазному вході до 75 кВт при трифазному вході. Micromaster 420 із заводськими налаштуваннями є ідеальним для широкої сфери простих застосувань регулювання швидкості завдяки обширному списку параметрів налаштувань. Основні особливості:

- простий запуск в експлуатацію;
- малий час відгуку на сигнали керування;
- особливо гнучка конфігурація завдяки модульній конструкції;
- три вільно параметризовані, потенційно розв'язані цифрові входи;
- два аналогові входи (від 0 до 10 В, 0 мА до 20 мА), можуть за вибором бути використані як 7-й і 8-й цифрові входи;
- два настроювані аналогові виходи (від 0 мА до 20 мА);

- три настроювані релейні виходи (DC 30 В/5 А, омичне навантаження, AC 250 В/2 А, індуктивне навантаження);
- безшумна робота двигуна завдяки високій частоті імпульсів;
- силові параметри:
- новітня технологія IGBT;
- цифрове мікропроцесорне керування;
- регулювання постійним струмом (FCC) для найкращих динамічних характеристик та оптимального керування двигуном;
- лінійне U/f-керування;
- квадратичне U/f-керування;
- налаштовувана крива залежності U/f;
- «підхоплення на ходу»;
- компенсація ковзання;
- автоматичний повторний запуск при зникненні мережі або порушеннях режиму;
- просте регулювання процесу завдяки вбудованому PI-регулятору;
- налаштовуваний час розгону та гальмування в межах 0 ... 650 сек.;
- згладжування кривої пуску;
- швидкодіюче обмеження струму (FCL) для безаварійної роботи;
- швидкодіючий, відтворюваний опит цифрових входів;
- точне введення заданого значення завдяки 10-бітному аналоговому входу;
- комбіноване гальмо для контрольованого швидкого зупинення;
- 4 частоти пропускання проти резонансу.

Тому на підставі отриманих розрахункових даних та технологічних вимог обирається частотний перетворювач фірми Siemens Micromaster 420, який забезпечує необхідний діапазон регулювання швидкості за законом $U/f = \text{const}$ та має всі види захисту від аварійних режимів.

2.6 Математичне моделювання системи ЧР-АД

2.6.1 Математичний опис системи ЧР-АД

Перетворювачі частоти можуть мати властивості джерела струму та властивості джерела напруги. Перетворювач має вхід керування напругою U_{yc} , у випадку інвертора напруги - поряд із входом керування частотою U_{yc} . Через вхід керування струмом U_{yt} здійснюється інвертора струму регулювання магнітного потоку машини при регулюванні частоти. Струм впливає на тиристорний випрямляч або безпосередньо на його швидкодію, або канал керування напругою може оцінюватися швидкодією цього керованого перетворювача. Канал управління частотою може здійснювати або безперервне, або дискретне формування частоти напруги та струму. Можна вважати практично безінерційним, якщо струми заданої частоти або при безперервному формуванні синусоїдальних напруг.

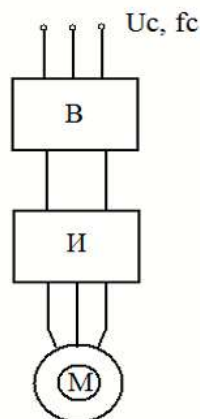


Рис. 2.5. Блок-схема перетворювача частоти

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

При регулюванні напруги в схемі, що забезпечує сталість потокозчеплення за умови постійних ψ_μ , або $\psi = \text{const}$, у межах значення абсолютного ковзання $S_a \leq S_k$ рівняння механічної характеристики двигуна має вигляд: ψ_1, ψ_μ, ψ_2 ,

$$(1 + T_{\Sigma p})M = \beta(\omega_0 - \omega) \quad (2.65)$$

В системі ПЧ-АД:

$$\omega_a = \frac{2\pi \cdot K_{yq}}{P_H} \cdot U_{yq} \quad (2.66)$$

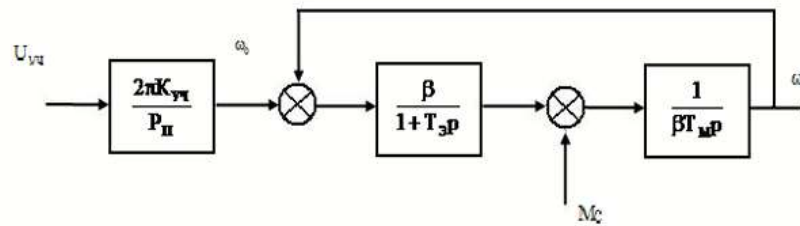
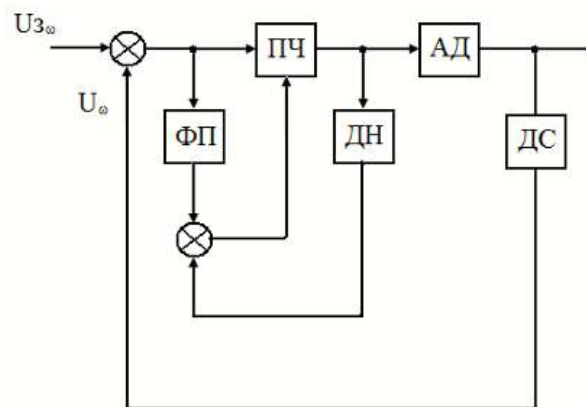


Рис. 2.6. Структурна схема лінеаризованої системи ПЧ-АД

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

Структурна схема частотного регулювання з контуром стабілізації магнітного потоку та швидкості із зворотним зв'язком за швидкістю показана на рисунку 2.7.



АД - асинхронний двигун; ПЧ - перетворювач частоти; ФП - функціональний перетворювач у каналі зв'язку частоти та напруги; ДН - датчик напруги; ДС - датчик швидкості; U_{3F} - задавальна напруга каналу регулювання частоти;

U_{3Y} - задавальна напруга каналу регулювання напруги

Рис. 2.7. Структурна схема двоконтурної системи керування ПЧ - АД

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

де механічні характеристики у двоконтурній системі частотного регулювання описуються рівнянням:

$$M = \frac{m_1 U_{1H}^2}{\omega_{1H}} [U_{3*} + S_a K]^2 \frac{R'_2 S_a}{\beta(f_{0*} S_a)} \quad (2.67)$$

$$U_{3*} = K_U (U_{3U} / U_H) \quad (2.68)$$

$$K = \frac{\omega_{1H} K \omega K_U}{U_{1H}} \quad (2.69)$$

Необхідно застосовувати двигуни з автономною вентиляцією, що дає можливість частотного регулювання, забезпечує постійний крутний момент навантаження та у всьому діапазоні від номінальної швидкості вниз, рівний номінальному. Структурна схема керування в режимі $\psi_2 = \text{const}$. При цьому вхідні сигнали i_{12d} , i_{12q} , α_{02} , p ψ_2 , ψ_2 формуються системою задавання струму в декартових координатах ψ_2 . Задані значення проекції напруги в системі координат u_1 обчислюються за формулами:

$$U_{12q} = i_{12q} r_1 + p X'_1 i_{12q} - \alpha_{02} X'_1 i_{12d} + \frac{X_0}{X_2} \alpha_{02} \psi_2 \quad (2.70)$$

$$U_{12d} = i_{12d} r_1 + p X'_1 i_{12d} - \alpha_{02} X'_1 i_{12q} + \frac{X_0}{X_2} p \psi_2 \quad (2.71)$$

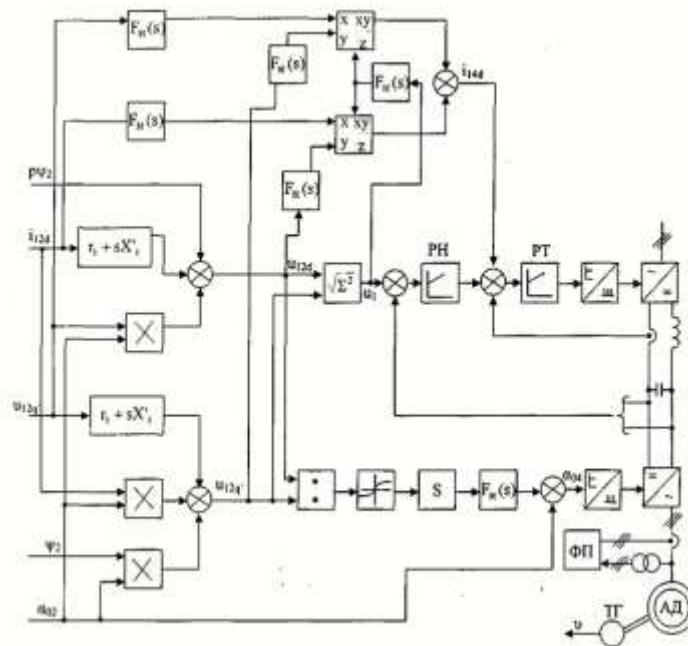


Рис. 2.8. Структурна схема керування в режимі $\psi_2 = \text{const}$

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

2.6.2 Модель ПЧ-АД у середовищі MATLAB

Програма MATLAB дозволяє моделювати процеси, що відбуваються як у силовій частині, так і в електроприводі в цілому.

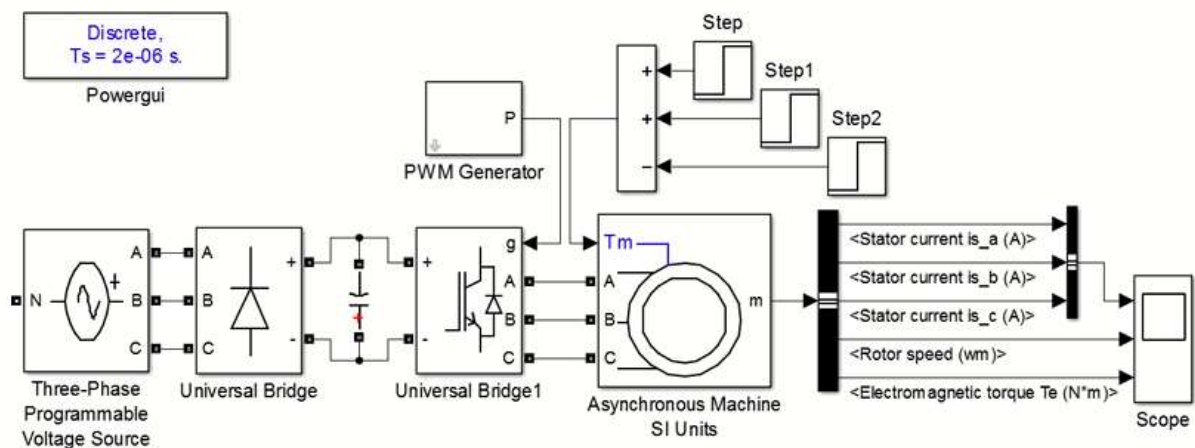


Рис. 2.9. Структурна схема моделі системи ПЧ-АД у середовищі MATLAB

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

Оскільки основні параметри двигуна (табл.2.1) наведено у відносних одиницях, переведемо їх у абсолютні одиниці.

Для цього визначимо базове значення опору фази двигуна:

$$Z_{\phi аз} = \frac{U_{1н}}{I_{1н}} = \frac{220}{2,738} = 80,35 \text{ Ом} \quad (2.73)$$

Розрахуємо номінальний фазний струм статора:

$$I_{1н} = \frac{P_{2н} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{1н} \cdot \cos \varphi_n} = \frac{1,5 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,83} = 2,738 \text{ А} \quad (2.74)$$

Розрахуємо реактивний опір фази статора:

$$X_1 = X \cdot Z_{\phi аз} = 0,078 \cdot 80,35 = 6,2673 \text{ Ом.} \quad (2.75)$$

Розрахуємо активний опір статора:

$$R_1 = R \cdot Z_{\phi аз} = 0,12 \cdot 80,35 = 9,642 \text{ Ом.} \quad (2.76)$$

Розрахуємо індуктивність фази статора:

$$L_1 = \frac{X_1}{\omega_1} = \frac{6,2673}{314} = 0,0199 \text{ Гн.} \quad (2.77)$$

Розрахуємо реактивний опір фази ротора:

$$X_2 = X'_2 \cdot Z_{\phi аз} = 0,12 \cdot 80,35 = 9,642 \text{ Ом.} \quad (2.78)$$

Розрахуємо активний опір ротора:

$$R_2 = R'_2 \cdot Z_{\text{баз}} = 0,069 \cdot 80,35 = 5,544 \text{ Ом.} \quad (2.79)$$

Розрахуємо індуктивність фази ротора:

$$L_2 = \frac{X'_2}{\omega_1} = \frac{9,642}{314} = 0,0307 \text{ Гн.} \quad (2.80)$$

Розрахуємо реактивний взаємоіндукційний опір:

$$X_m = X'_m \cdot Z_{\text{баз}} = 1,9 \cdot 80,35 = 152,665 \text{ Ом.} \quad (2.81)$$

Розрахуємо взаємну індукцію індуктивності:

$$L_m = \frac{X_m}{\omega_1} = \frac{152,665}{314} = 0,486 \text{ Гн} \quad (2.82)$$

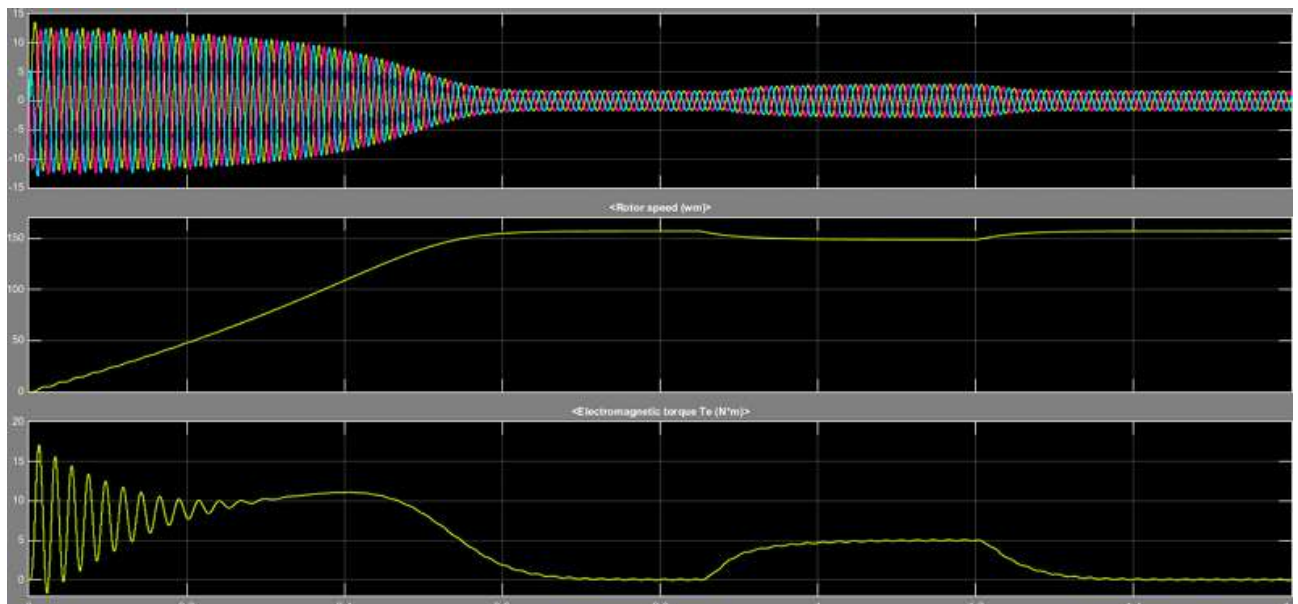


Рис. 2.10. Осцилограми струму, швидкості та моменту під час запуску двигуна, навантаження та скидання навантаження ($f = 50$ Гц)

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

Результати математичного моделювання системи, виконаного в програмному комплексі MATLAB/Simulink на основі структурної схеми (рис. 2.9), наведено на рис. 2.10. Графіки відображають три послідовні динамічні режими. Початковий етап симуляції ілюструє прямий пуск електроприводу, який здійснювався за нульових початкових умов. На позначці часу $t = 0,85$ с було змодельовано скачкоподібне збурення у вигляді навантаження статичного моменту навантаження $M_c = 5$ Н·м, що стало причиною другого перехідного процесу. До моменту наступного збурення - повного зняття навантаження при $t = 1,2$ с - основні координати приводу (струми, кутова швидкість та електромагнітний момент) вже досягли стаціонарних значень. Ці параметри і виступили ненульовими початковими умовами для наступного етапу. Завдяки безперервному розрахунку в рамках єдиної задачі, фіксація вихідних даних для другого і третього режимів відбулася автоматично.

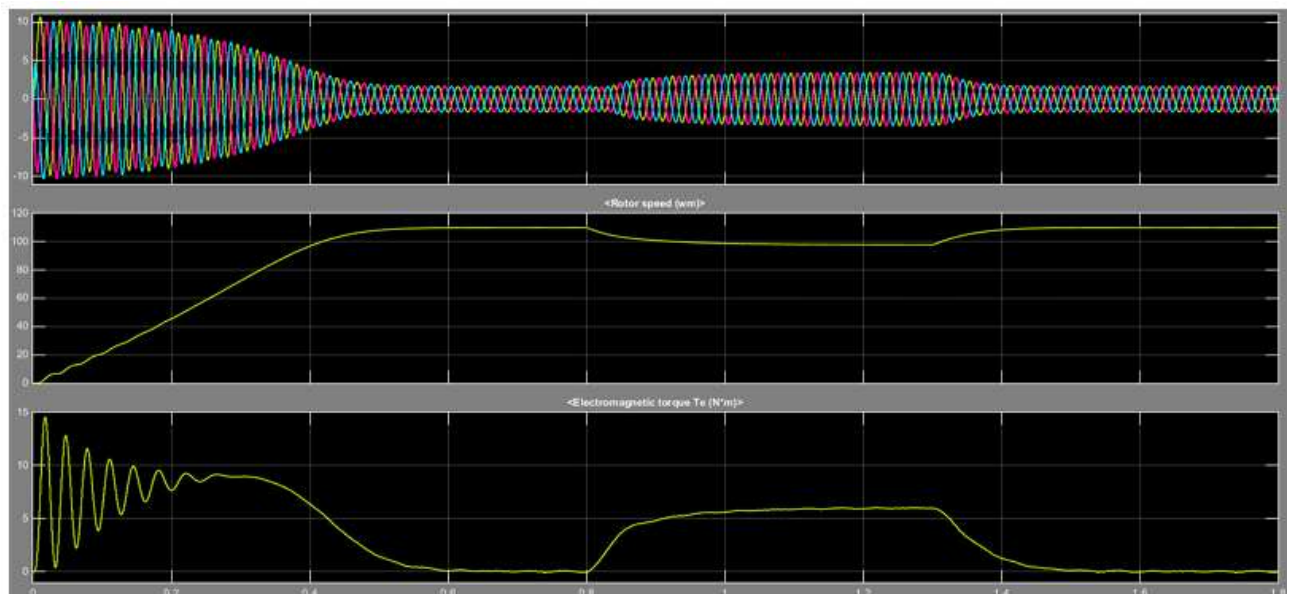


Рис. 2.11. Осцилограми струму, швидкості та моменту під час запуску двигуна, навантаження та скидання навантаження ($f = 35$ Гц)

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

На рисунку 2.11 наведено результати розрахунку, виконаного в середовищі Matlab Simulink за структурною схемою, представленою на рисунку 2.9. На

рисунку показано три перехідні процеси. У момент часу $t = 0,8$ с був накладений момент навантаження $M_C = 6$ Н·м. У момент часу $t = 1,3$ с відбулося зняття навантаження.

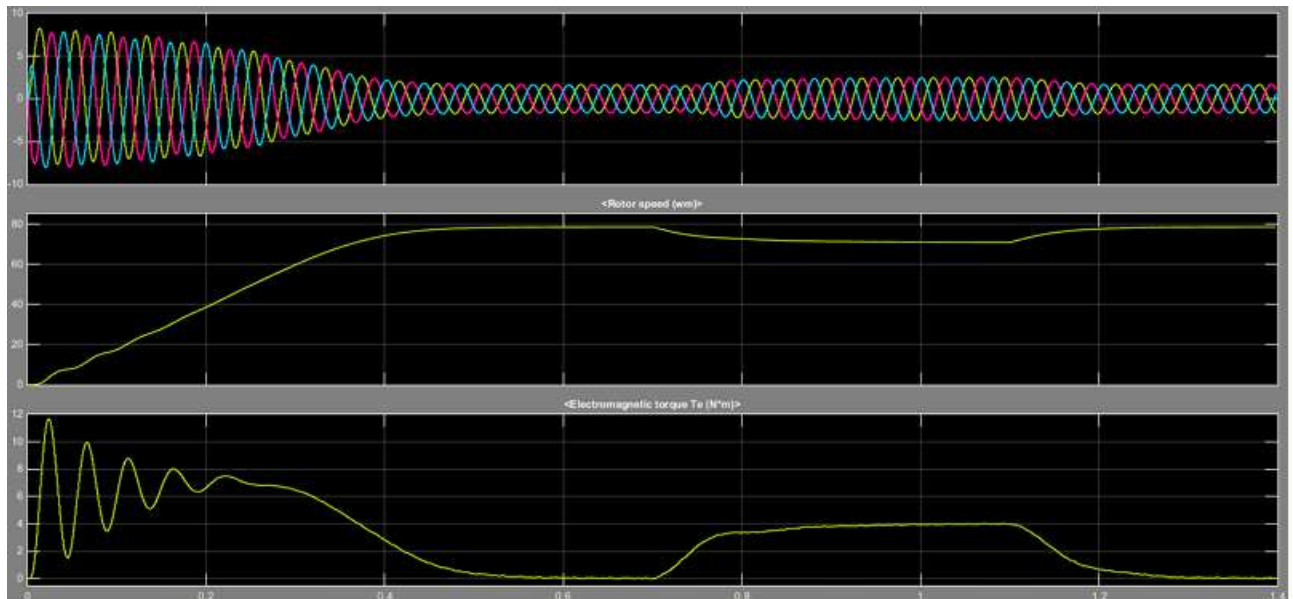


Рис. 2.12. Осцилограми струму, швидкості та моменту під час запуску двигуна, навантаження та скидання навантаження ($f = 25$ Гц)

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

На рисунку 2.12 наведено результати розрахунку, виконаного в середовищі Matlab Simulink за структурною схемою, представленою на рисунку 2.9. На рисунку показано три перехідні процеси. У момент часу $t = 0,7$ с був накладений момент навантаження $M_C = 4$ Н·м. У момент часу $t = 1,1$ с відбулося зняття навантаження.

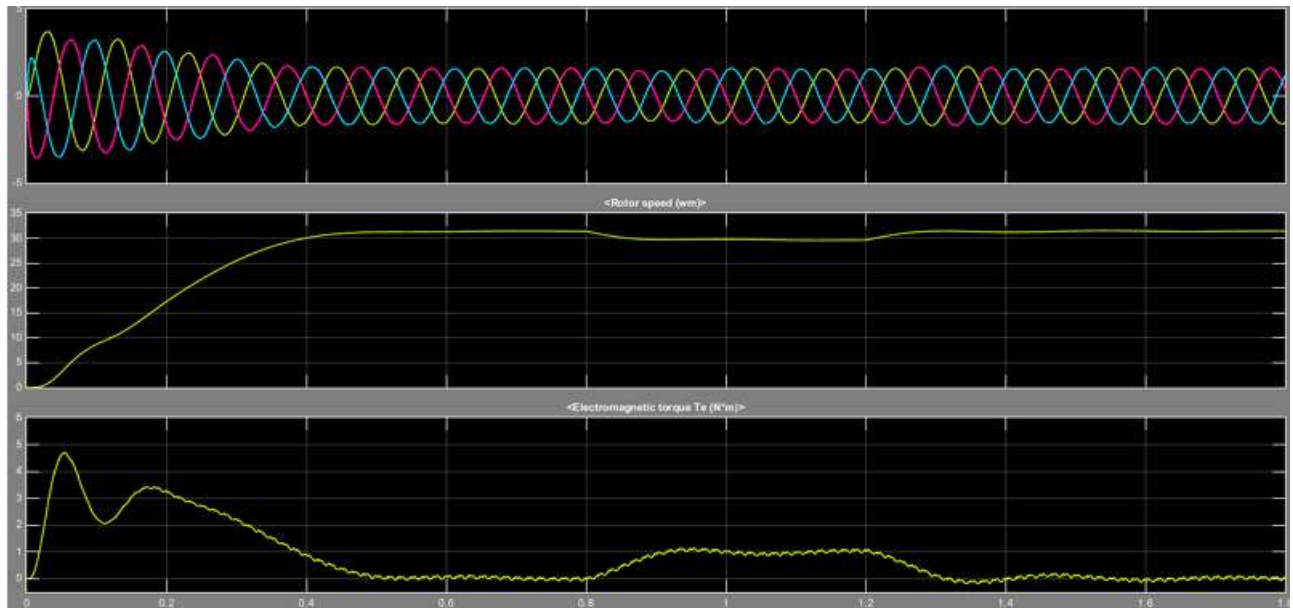


Рис. 2.13. Осцилограми струму, швидкості та моменту під час запуску двигуна, навантаження та скидання навантаження ($f = 10$ Гц)

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

На рисунку 2.13 наведено результати розрахунку, виконаного в середовищі Matlab Simulink за структурною схемою, представленою на рисунку 2.9. На рисунку показано три перехідні процеси. У момент часу $t = 0,8$ с був накладений момент навантаження $M_C = 1$ Н·м. У момент часу $t = 1,2$ с відбулося зняття навантаження.

2.7 Обґрунтування вибору системи частотно-регульованого електроприводу

З метою розширення діапазону регулювання швидкості традиційно застосовуються різноманітні канали зворотного зв'язку, зокрема тахогенератори та контроль напруги якоря. Проте практичне використання електродвигунів постійного струму (ДПТ) пов'язане з істотними експлуатаційними труднощами, зумовленими їхньою конструктивною специфікою, а саме: складністю внутрішнього устрою, що зумовлює високу ринкову вартість; наявністю вразливого щітково-колекторного апарату; значними масогабаритними

показниками; потребою в регулярному технічному обслуговуванні; відносно малим експлуатаційним ресурсом. Зазначені фактори зумовлюють підвищені капітальні та експлуатаційні витрати, а також знижують показники надійності та точності функціонування електроприводу в цілому. Обслуговування ДПТ вимагає систематичної зупинки технологічного процесу для проведення планово-попереджувальних ремонтів, що включають очищення внутрішніх вузлів від струмопровідного пилу та ревізію щіткового вузла. У минулі періоди інтеграція надійних короткозамкнених асинхронних двигунів (АД) у регульовані системи з широким діапазоном зміни швидкості була ускладнена. Для цих цілей застосовувалися механічні ступінчасті редуктори або варіатори. Проміжним етапом модернізації стало використання багатошвидкісних АД з функцією перемикання кількості пар полюсів, що забезпечували ступінчасте регулювання частоти обертання. Діапазон регулювання швидкості: робочий діапазон частот обертання вала обраного АД повинен повністю покривати або перевищувати аналогічний показник замінюваної машини постійного струму. Моментні характеристики (номінальний, пусковий і критичний моменти): Розрахунковий номінальний момент АД повинен гарантувати тривалу роботу приводу в заданих швидкісних режимах без ризику критичного перегріву обмоток. Максимальний і пусковий моменти вибираються з запасом щодо статичного і динамічного опору приводного механізму.

На рисунках 2.14 та 2.15 показані механічні характеристики ДПТ при регулюванні швидкості напругою на якорі та механічні показники АД під час регулювання частотою згідно із законом $U/f = \text{const}$. При заміні двигуна постійного струму необхідно однозначно визначити діапазон швидкості обертання валу та необхідний момент у заданому діапазоні регулювання.

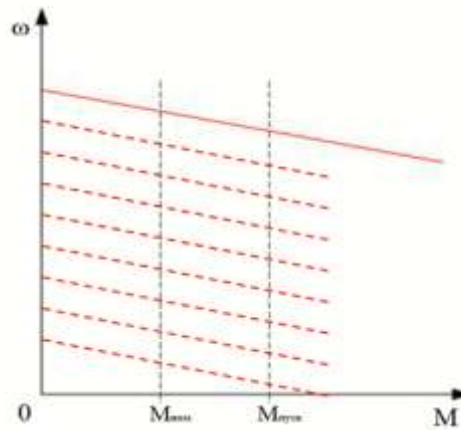


Рис. 2.14. Механічні характеристики регульованого двигуна постійного струму

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

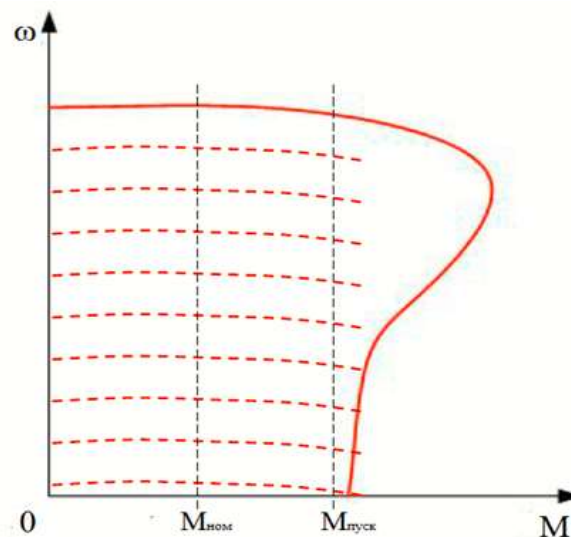


Рис. 2.15. Механічні характеристики регульованого асинхронного двигуна

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

Нагрівання електричної машини залежить від режиму її роботи, тобто від співвідношення тривалості періодів роботи під навантаженням і пауз між ними, або періодів роботи з повним або частковим навантаженням, від частоти включення машини та характеру перебігу перехідних процесів.

Поділяють такі режими роботи:

Тривалий режим (S1) - режим, при якому час роботи машини при практично незмінному навантаженні та температурі навколишнього середовища

середовища достатньо нагріву всіх її частин до практично температури, що встановилася. Режим характеризується постійними втратами протягом усього часу роботи машини.

Короткочасний режим (S2) - режим при якому періоди постійного навантаження чергуються з періодами відключення машини, причому за час роботи температура частин машини не встигає досягти значення, а за час пауз машина охолоджується до холодного стану.

Повторно короткочасні режими (S3-S8) - відрізняються від короткочасного тривалістю включення під постійне навантаження та тривалістю періодів відключення, причому час роботи машини завжди менше часу, необхідного для нагрівання її частин до встановленої температури, а час пауз менше необхідного для остигання машини до практично холодного стану. Відмінність між режимами S3-S8 полягає частотою пусків та тривалістю увімкнення машини.

У разі алгоритм роботи машини відповідає режиму S2.

Сучасні мікроконтролери застосовувані в частотних перетворювачах, дозволяють обробляти дані за період у кілька десятків мікросекунд, що дозволило розширити діапазон регулювання зі зворотним зв'язком до 1:5000 с точністю підтримки швидкості 0,2 обороту у всьому діапазоні. Найменша маса ротора асинхронного двигуна, в порівнянні з якорем двигуна постійного струму, дозволяє підвищити динаміку приводу в стежачих та швидкодіючих системах і підвищити граничні швидкості обертання двигунів для приводів. Вартість асинхронного електродвигуна у кілька разів менша вартості двигуна постійного струму. Асинхронні електродвигуни прості в обслуговуванні, надійні в експлуатації та дуже довговічні (до 10 років і більше).

З використанням перетворювача плавний програмований пуск починається зі зниженої частоти, яка зростає в міру розгону, це дуже схоже на реостатний пуск двигуна постійного струму, струм обмежується частотним інвертором його максимальне пускове значення знижується. При цьому знімаються всі обмеження щодо кількості пусків за годину або за добу роботи двигуна. Для асинхронних двигунів загальнопромислового застосування

розроблені та серійно виготовляються стандартні редуктори різного типу (циліндричні, черв'якові, планетарні). Усі вони можуть бути успішно застосовані і для регульованих асинхронних двигунів.

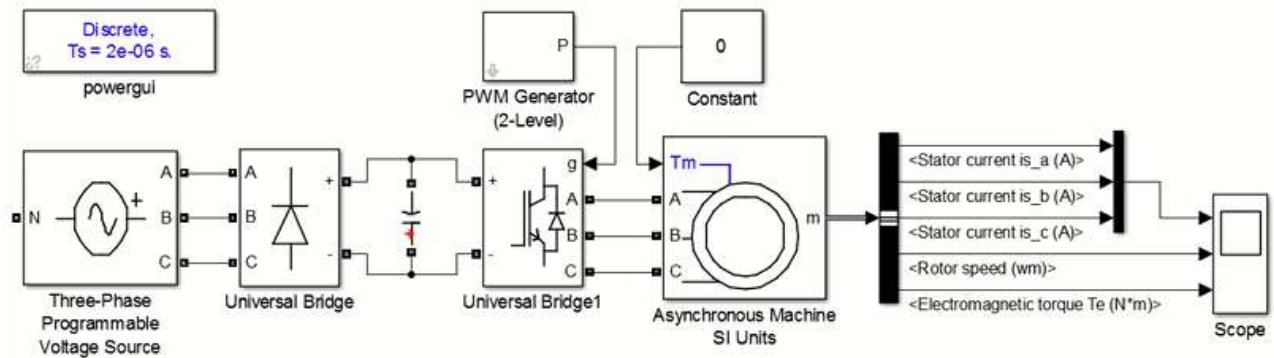


Рис. 2.16. Структурна схема моделі системи ПЧ-АТ

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

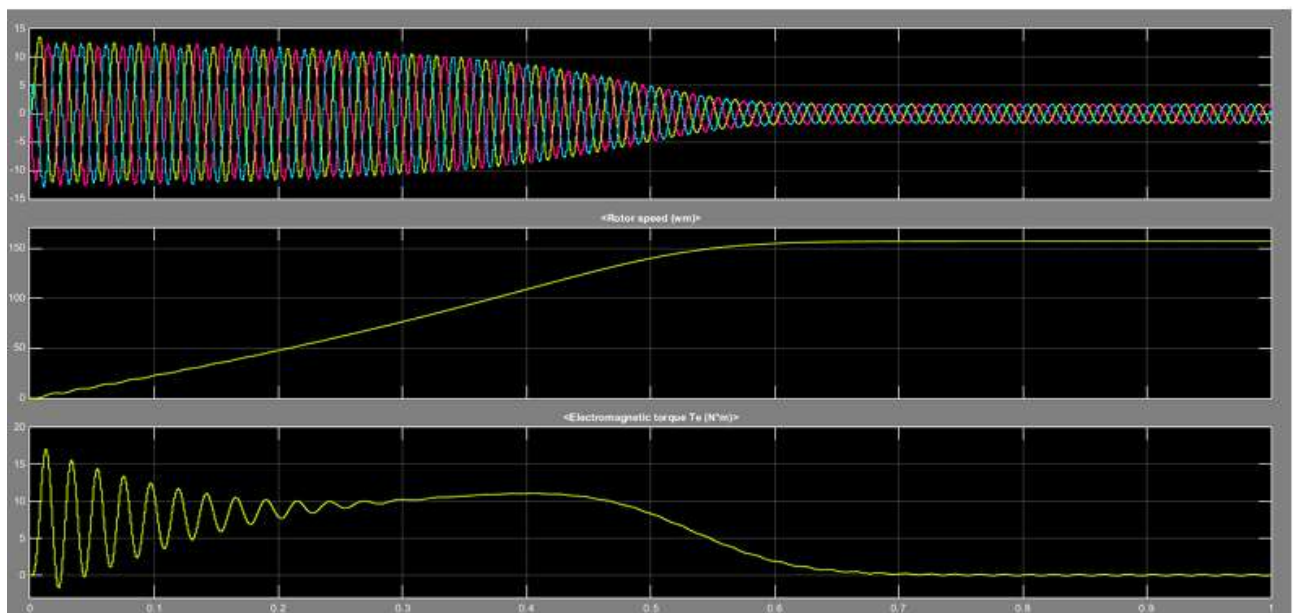


Рис. 2.17. Осцилограммы тока, скорости и момента

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

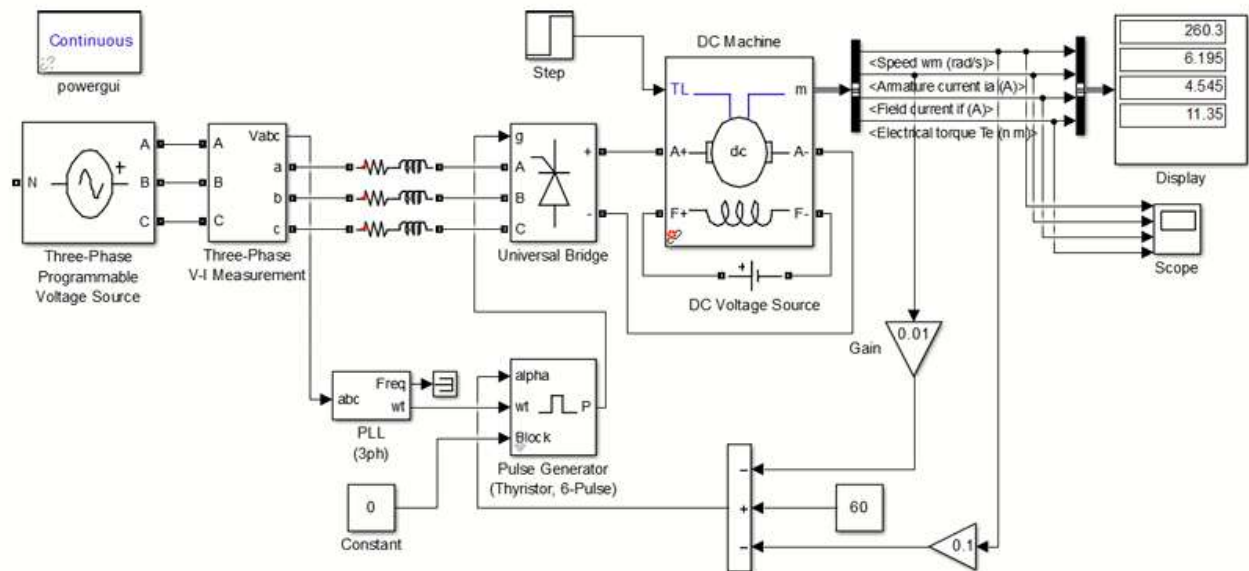


Рис. 2.18. Структурна схема моделі системи ТП-ДПТ

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [2]

2.8 Заходи із охорони праці та безпеки при експлуатації під час експлуатації автоматизованого асинхронного електроприводу ротаційно-обкатної машини для формування металевих балонів високого тиску

Об'єктом дослідження цього розділу є умови праці під час експлуатації та обслуговування автоматизованого асинхронного електроприводу ротаційно-обкатної машини для формування металевих балонів високого тиску. Ротаційна обробка трубних заготовок супроводжується значними механічними навантаженнями, високими температурами (при гарячій закатці), наявністю потужного електрообладнання та систем частотного регулювання, що потребує ретельного аналізу небезпечних факторів та впровадження інженерно-технічних заходів безпеки.

2.8.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників при експлуатації електропривода ротаційної машини

Експлуатація частотно-регульованого електропривода потужністю 100 кВт у складі ротаційної машини для формування балонів супроводжується низкою небезпечних чинників, що потребують ідентифікації та мінімізації:

Електрична небезпека: Наявність напруги 380 В у силових ланцюгах частотного перетворювача створює ризик ураження електричним струмом при порушенні ізоляції, несправності захисного заземлення або при виконанні сервісних робіт на інверторному модулі. Особливу увагу слід приділяти залишковій напрузі на конденсаторах ланки постійного струму в перетворювачі частоти після вимкнення живлення.

Вібраційні та акустичні чинники: Висока потужність двигуна (100 кВт) та динамічний характер навантаження при ротаційній обкатці металу призводять до виникнення вібрацій на корпусі редукторної групи. Тривалий вплив рівнів шуму, що перевищують санітарні норми в зоні обслуговування, є шкідливим чинником, що потребує використання засобів індивідуального захисту слуху.

Теплові чинники: Ротаційна машина працює з металевими заготовками, які можуть бути нагріті в процесі виробництва. Крім того, нагрівання силових напівпровідникових ключів частотного перетворювача при тривалому режимі роботи S1 створює ризик термічного впливу на навколишнє середовище, що вимагає ефективної системи примусової вентиляції шафи керування.

Механічна небезпека: Обертові частини трансмісії, муфти та корінний вал ротаційної машини створюють ризик механічного травмування. Раптові пускові моменти або заклинювання заготовки в процесі формування можуть спричинити викид деталей або руйнування механічних вузлів, тому система керування обов'язково повинна включати алгоритми швидкого електронного захисту від перевантаження за струмом.

2.8.2 Засоби зниження дії небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Відповідно до вимог стандартів безпеки, під час роботи ротаційної машини на обслуговуючий персонал (операторів, наладчиків, електромеханіків) можуть впливати такі фактори:

1. Електрична небезпека

- електропривод потужністю 11 кВт живиться від трифазної мережі напругою 380 В, 50 Гц. Наявність силової шафи, перетворювача частоти (ПЧ), кабельних ліній та електродвигуна створює ризик ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції, пробойі на корпус або прямому дотику до струмоведучих частин. Особливу небезпеку становлять імпульсні перенапруги та висока напруга у ланці постійного струму ПЧ.

2. Механічна небезпека:

Висока кутова швидкість обертання важкого затискного патрона та трубної заготовки, рух супорта з роликом, що деформує. Існує ризик захоплення

одягу, травмування частинами, що рухаються, або вильоту заготовки при порушенні роботи затискного патрона.

3. Термічна небезпека.

- процес формування горловини або дна балона часто виконується з попереднім індукційним або газовим нагріванням торців труб до 900 -1100 °С. Контакт з розігрітим металом або теплове випромінювання можуть викликати опіки.

4. Шум та вібрація.

- робота циліндричного редуктора, підшипникових вузлів шпинделя та самого електродвигуна генерує підвищений рівень механічного шуму та локальної вібрації, які можуть перевищувати допустимі санітарні норми для машинобудівних цехів.

2.8.3 Інженерно-технічні заходи захисту від ураження електричним струмом

Електробезпека та захисні заходи

Для захисту персоналу від ураження струмом при переході напруги на відкриті провідні частини (внаслідок пошкодження ізоляції) передбачені наступні технічні рішення:

- захисне заземлення та занулення (система TN-C-S / TN-S): корпус асинхронного двигуна, металева шафа перетворювача частоти, станина рота внутрішнього контуру заземлення цеху. Опір заземлювального пристрою не повинен перевищувати $R_3 \leq 4$ Ом. Оскільки частотний перетворювач генерує високочастотні струми витоку через ємність кабелів, застосований екранований силовий кабель між ПЧ і двигуном. Екран кабелю заземлюється з обох кінців (у шафі та на корпусі двигуна) за принципом 360-градусного контакту.

- захист від залишкового заряду: конденсатори ланки постійного струму ПЧ зберігають небезпечну напругу після вимкнення живлення. На дверцятах

шафи встановлюється попереджувальний знак та блокування, що забороняє відкриття шафи раніше ніж через 5-10 хвилин після зняття напруги.

Вибір ступеня захисту оболонок

Електродвигун має ступінь захисту IP55 (захист від пилю та бризок води).

Шафа управління з ПЧ: ступінь захисту не нижче IP54 з примусовою вентиляцією та повітряними фільтрами для відведення тепла.

Захисні блокування та системи аварійного зупинки (Emergency Stop)

У системі автоматизованого управління (САУ) реалізовано апаратні та програмні рівні захисту: кнопка «СТОП»: розміщується на головному пульті оператора та безпосередньо біля зони обробки (тип «грибок» із фіксацією). Вона повністю знеструмлює силові кола приводу через лінійний контактор або активує функцію STO (Safe Torque Off) перетворювача частоти, яка гарантовано блокує генерацію імпульсів на мости ПЧ, унеможливаючи пуск двигуна.

Захисна огорожа робочої зони: зона обертання патрона та заготовки закривається суцільним або сітчастим кожухом. Кожух оснащений кінцевим вимикачем безпеки. При відкритті огороження електропривід автоматично вимикається, а запуск двигуна блокується.

2.8.4 Пожежна безпека

Відповідно до стандартів, виробнича ділянка відноситься до категорії Г із вибухопожежної небезпеки (обробка гарячого металу).

Основні джерела загоряння в електроприводі - короткі замикання, тривалі перевантаження асинхронного двигуна, перегрів силових транзисторів (IGBT) частотного перетворювача.

Використання вбудованої в ПЧ електронної системи захисту від перевантаження по струму (I^2t), обриву фаз і перенапруження.

При перевищенні допустимої температури ізоляції (155 °C для класу F) привід відключається. Засоби пожежогасіння: оснащення ділянки вуглекислотними (ОУ-5) або порошковими (ОП-5) вогнегасниками, які

дозволяється використовувати для гасіння електроустановок під напругою до 100.⌒

Первинні засоби пожежогасіння на ділянці:

- вогнегасники для електроустановок розташовані безпосередньо біля шафи управління з ПЧ та електродвигуна розміщуються вуглекислотні вогнегасники типу ОУ-5 (CO_2). Вони є діелектриками і дозволяють гасити пожежі класу Е (електроустановки під напругою до 1000 В) без ризику поразки струмом і без пошкодження дорогої електроніки. щит: Додатково стаціонарний пост комплектується ящиком із сухим піском (об'ємом не менше 0,5 м³), совковою лопатою та азбестовим покривалом (кошмою) для локалізації полум'я шляхом припинення доступу кисню.

Таким чином, розроблені інженерні та організаційні заходи, що включають систему контурного заземлення (з розрахованим опором до 4 Ом), впровадження функцій безпеки електроприводу (СТО, тепловий захист двигуна, частотне регулювання для виключення пускових струмів) та системи аварійного блокування робочої зони, забезпечують відповідність проектуваного об'єкту діючим. Це мінімізує виробничий травматизм та забезпечує надійну роботу обладнання у штатному та аварійному режимах.

2.9 Висновки до основної частини

Модель системи ПЧ-АТ може бути представлена як в нерухомій системі координат так і в обертовій системі координат. При цьому для аналізу електричної машини (АД) вибір системи координат не відіграє суттєвої ролі, в той же час для аналізу та синтезу електроприводу вибір системи координат при моделюванні пакеті Matlab Simulink є важливим чинником. У своєму складі програмне забезпечення Matlab Simulink містить віртуальні моделі автономного інвертора напруги з синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції та віртуальну модель АД. Скориставшись цими моделями та розрахувавши необхідні

параметри електродвигуна складено модель системи ПЧ-АД. Заміна електроприводу ротаційної машини на основі системи "тиристорний перетворювач - двигун постійного струму" на систему «перетворювач частоти - асинхронний двигун» може проводитись при модернізації застарілого обладнання та при проектуванні нового технологічне обладнання. У нашому випадку заміна двигуна постійного струму асинхронним двигуном, керованим за допомогою перетворювача частоти, дозволить при ротаційному формуванні змінювати кутову швидкість, що необхідно для правильного розподілу пластилю за обсягом форми, збільшити ККД системи електроприводу, забезпечити енергозбереження та підвищить експлуатаційні показники, що в загалом забезпечити економічний ефект.

ВИСНОВКИ

У ході виконання випускної кваліфікаційної роботи було проведено комплексний аналіз та розроблено систему частотно-регульованого асинхронного електроприводу. На підставі теоретичних досліджень та розрахунково-проектних етапів отримано такі результати:

Обґрунтовано доцільність застосування частотного регулювання для досліджуваного технологічного механізму. Показано, що регулювання кутової швидкості шляхом зміни частоти напруги дозволяє оптимізувати технологічний процес і підвищити енергоефективність системи.

Обґрунтовано вибір закону частотного регулювання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. На основі аналізу механічних характеристик доведено, що проста зміна частоти без узгодження рівня напруги веде до падіння критичного моменту та зниження перевантажувальної здатності машини. Для забезпечення стабільної роботи та високої жорсткості характеристик у всьому діапазоні швидкостей реалізовано пропорційний закон управління ($U/f = \text{const}$), що підтримує сталість максимального моменту двигуна.

Математично та аналітично підтверджено, що в області номінальних та підвищених частот падінням напруги на активному опорі статора R_1 можна знехтувати. Це пов'язано з тим, що визначальне значення цьому режимі має сумарний індуктивний опір короткого замикання ($X_k = X_1 + X'_2$). Це дозволило спростити математичний опис системи без втрати точності розрахунків.

Виконано обґрунтований вибір силової перетворюючої техніки. На підставі розрахованих параметрів та технологічних вимог до об'єкта вибрано мікропроцесорний перетворювач частоти серії Micromaster 420 від Siemens. Цей апарат, побудований на базі сучасних IGBT-модулів, забезпечує необхідний діапазон регулювання швидкості, безшумну роботу двигуна за рахунок оптимізації частоти комутації ШІМ, а також має розвинену систему захисту від аварійних режимів.

Розроблено математичну модель системи «ПЧ-АД» у програмному пакеті MATLAB/Simulink. Обґрунтовано вибір системи координат для моделювання, що дозволило коректно здійснити синтез замкнутого електроприводу та дослідити динамічні процеси, що протікають у ньому, з використанням стандартних блоків автономного інвертора напруги та узагальненої моделі асинхронної машини.

Доведено техніко-економічну ефективність модернізації технологічного обладнання (установки ротаційного формування). Заміна фізично та морально застарілого приводу «тиристорний перетворювач - двигун постійного струму» (ТП-ДПТ) на сучасний частотно-регульований асинхронний електропривод дозволила:

- забезпечити плавну та точну зміну кутової швидкості, необхідну для рівномірного розподілу пластилю за внутрішнім обсягом ливарної форми;
- суттєво підвищити коефіцієнт корисної дії (ККД) та експлуатаційну надійність системи;
- виключити із схеми обслуговування ненадійний щітково-колекторний вузол, забезпечивши значний енергозберігаючий та економічний ефект.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3321:2003. Система конструкторської документації. Терміни та визначення основних понять. Київ : Держспоживстандарт України, 2003. 78 с.
2. Теряєв В. І., Чорний О. П. Автоматизований електропривод промислових установок : навч. посібник. Кам'янське : ДДТУ, 2019. 320 с.
3. Автоматизований електропривод. Синтез систем підпорядкованого регулювання [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. І. Теряєв, М. М. Желінський. Електрон. текст. дані (1 файл: 932 Кбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 54 с.
4. Попович М.Г., Теряєв В.І., Кіселичник О.І., Бур'ян С.О. Особливості синтезу та дослідження електромеханічних систем з послідовною корекцією та частотно-регульованими асинхронними двигунами. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Кременчук: КДПУ, 2007. Вип. 3/2007 (44) частина 2. С. 12-16.
5. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. 2-ге вид., перероб. і доп. К.: Либідь, 2007, 656 с.
6. Phillips C., Harbor R. Feedback control systems, Prentice-Hall, 2000, 658 p.
7. Ogata K. Modern control engineering, Prentice-Hall, 2010, 905 p. ДСТУ ІЕС 60034-1:2018. Машини електричні обертові. Частина 1. Номінальні та експлуатаційні характеристики. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 120 с.
8. Абракітов В. Е. Конспект лекцій з курсу «Автоматизація технологічних процесів» (для студентів 1 курсу денної форми навчання освітнього рівня «бакалавр» галузі знань 26 – Цивільна безпека спеціальності 263 – Цивільна безпека. Охорона праці) / В. Е. Абракітов ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. – 80 с.

9. Електричні машини. Навчальний посібник / Г.Г.Півняк, Ф.П.Шкрабець, В.П.Довгань. -Дніпропетровськ,Видавництво Національного гірничого університету. 2003. -328 с.
- 10.ABB ACS850 User's Manual. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://library.abb.com> (дата звернення: 14.06.2026).
- 11.Пістун Є. П. Основи автоматизації технологічних процесів. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. 312 с.
- 12.ДСТУ EN 61800-3:2016. Системи силових електроприводів із регульованою швидкістю. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 96 с.
- 13.Сучасні інформаційні технології та системи в управлінні [Електронний ресурс] : зб. матеріалів I Всеукр. наук.-практ. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів ; 6-7 квітня 2017 р. - Київ : КНЕУ, 2017. - 213 с.
- 14.Шевела В. В., Школьний О. В. Енергоефективність частотно-регульованих електроприводів. Вісник ХНТУ. 2021. № 2 (78). С. 45–52.
- 15.Шеремет В.О., Каракаш О.І., Маранчук В.Ф. Довідниковий посібник керівника та спеціаліста гірничо-металургійного підприємства з охорони праці: навч. посіб. Дніпропетровськ: ПП Ліра ЛТД, 2005. 653 с.

ДОДАТКИ

StrikePlagiarism.com

Документ прийнятий

Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

141-10д-2026врб

Автор

141-10д-2026врб

Науковий керівник / Експерт

Модло Є

ІД документу

334133413

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

Підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту

6/2/2026

Дата редагування

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.

10.32%

10.32%

КП 1

6077

КІЛЬКІСТЬ СЛІВ

0.69%

0.69%

КЦ

49673

КІЛЬКІСТЬ СИМВОЛІВ

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навісний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		5
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		55

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Копір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз

Копір тексту

#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА (URL (НАЗВА БАЗИ))	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	https://openarchive.nure.ua/bitstreams/fb1bb701-7d16-4415-af76-f7222d1de688/download	25 (0.41 %)

ЗГОДА здобувача освіти Державного університету економіки і технологій про
перевірку кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату
та розміщення в Репозитарії ДУЕТ

Я, Карпекін Дмитро Васильович, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна бакалаврська робота «Асинхронний електропривод ротаційної машини виробництва балонних виробів» виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Державного університету економіки і технологій ознайомлений. Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформований, що відповідно до пункту 5.8 «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» згадана робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ) та ознайомлений з умовами такого розміщення.

Дата 01.06.2026

Підпис