

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА

(підпис)

“ ____ ” _____ 2026 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи автоматизації,

електропривод та електромобільність»

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і назва)

на тему: _____ Електропривод і автоматизація кривошипного преса _____

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕП-п31

(шифр групи)

_____ Клименко Олександр Олександрович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)



(підпис)

Керівник _____ доц., к.т.н. Теряєв Віталій Іванович _____

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

(підпис)

Консультант _____

(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Рецензент _____ асистент Стулішенко А.С. _____

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

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____  _____

(підпис)

Київ – 2026 р.

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: Електропривод і автоматизація кривошипного преса

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва)

Освітньо-професійна програма – Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА

(підпис)

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Клименку Олександру Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Електропривод і автоматизація кривошипного преса

керівник проекту _____ Теряєв Віталій Іванович, к.т.н., доц.

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

затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проекту 10.06.2026 р. _____

3. Вихідні дані до проекту: кривошипний прес моделі JL21-110, напруга живлення 380 В, частота мережі 50 Гц, хід повзуна 160 мм, кількість ходів 50 хв⁻¹, номінальне зусилля 1100 кН, двигун 11 кВт, маса пресу 9340 кг, маса маховика 750 кг.

4. Зміст пояснювальної записки: 1 Аналітичний огляд в області електроприводів ковальсько-пресових машин; 2 Визначення потрібної потужності двигуна; 3 Вибір типу електродвигуна та силового обладнання; 4 Розрахунок параметрів та побудова схеми; 5 Синтез системи керування електроприводом; 6 Дослідження статичних і динамічних режимів системи електроприводу (шляхом моделювання). Аналіз результатів; 7 Спецчастина. Автоматизація електроприводу кривошипного пресу; 8 Розробка схеми керування та силової схеми перетворювального пристрою.

5. Перелік графічного матеріалу: Загальний вид установки, Схема електрична принципова силова. Структурна схема та результати моделювання.

6. Консультанти розділів проекту

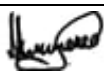
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 1.04.2026 р.

Календарний план

Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки про виконання
1. Аналітичний огляд в області електроприводів ковальсько-пресових машин Призначення та класифікація металорізальних верстатів 1.1 Призначення, галузі використання та типові технічні рішення ковальсько-пресових машин 1.2 Огляд сучасних різновидів пресів з електроприводом 1.3 Вимоги до електроприводу та систем автоматизації 1.4 Обґрунтування модернізації електроприводу та автоматизації кривошипного преса	20.04.26	
2. Визначення потрібної потужності електродвигуна	30.04.26	
3. Вибір типу електродвигуна та силового обладнання	1.05.26	
4. Розрахунок параметрів та побудова схеми	15.05.26	
5.1 Синтез системи керування електроприводом 5.1.1 Опис системи ПЧ–АД 5.2. Спрощена математична модель системи ПЧ–АД 5.3 Закони частотного керування асинхронним двигуном 5.4 Особливості роботи електроприводу кривошипного преса	20.05.26	
5.2 Дослідження статичних і динамічних режимів системи електроприводу (шляхом моделювання). Аналіз результатів	25.05.26	
6. Спецчастина: Автоматизація електроприводу кривошипного пресу	31.05.26	
7. Розробка (опис) схеми керування та силової схеми перетворювального пристрою	5.06.26	
Оформлення пояснювальної записки та графічної частини. Підготовка презентації	10.06.26	

Студент



(підпис)

Олександр КЛИМЕНКО

Керівник проекту

Віталій ТЕРЯЄВ

РЕФЕРАТ

Дипломний проект складається з пояснювальної записки на 100 сторінках, 29 рисунків, 11 таблиць, 2 додатків.

В даному дипломному проекті здійснена модернізація кривошипного преса шляхом переходу на сучасний частотно-регульований асинхронний електропривод потужністю 11 кВт з одночасним регулюванням напруги та частоти статора. Аналіз штампування та розрахунок зусиль допомогли вибрати правильний електродвигун.

Розроблено та оптимізовано за допомогою графо-переходів алгоритм безпечного запуску преса, який блокує старт у разі аварії, перегріву двигуна, неготовності перетворювача чи неправильного положення повзуна.

В середовищі MATLAB/Simulink розроблено імітаційну модель електропривода. Вона дозволила вивчити статику й динаміку системи, роботу блокувань.

Результати проведених досліджень підтверджують високу енергоефективність, надійність та безпеку технічних рішень, прийнятих в процесі проектування.

КРИВОШИПНИЙ ПРЕС, АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ГРАФО-ПЕРЕХІД, АВТОМАТИЗАЦІЯ, БЕЗПЕКА, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, РОЗРОБКА, ДОСЛІДЖЕННЯ

					141.003.017.БР			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	Електропривод і автоматизація кривошипного преса Реферат			
Розроб.		Клименко О.О.						
Керівн.		Теряєв. В. І.						
Реценз.								
Н. Контр.		Теряєв. В. І.						
Зав. каф		Ковбаса С. М.			КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, каф. АЕМС-ЕП гр. ЕП-п31			
					Літ. Арк. Акрушів 6 100			

SUMMARY

This thesis project consists of an explanatory note of 100 pages, 29 figures, 11 tables, and 2 appendices.

This thesis project involved the modernization of a crank press by switching to a modern 11 kW frequency-controlled asynchronous electric drive with simultaneous regulation of stator voltage and frequency. An analysis of the stamping process and force calculations helped in selecting the appropriate electric motor.

A safe press startup algorithm was developed and optimized using state diagrams; this algorithm blocks startup in the event of a malfunction, motor overheating, inverter unavailability, or incorrect ram position.

A simulation model of the electric drive was developed in the MATLAB/Simulink environment. It allowed for the study of the system's statics and dynamics, as well as the operation of the interlocks.

The results of the conducted research confirm the high energy efficiency, reliability, and safety of the technical solutions adopted during the design process.

CRANK PRESS, ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE, GRAPH TRANSITION, AUTOMATION, SAFETY, MATHEMATICAL MODEL, DEVELOPMENT, RESEARCH

					141.003.017.BW			
	letter	No of document		Date				
Devel.	O.Klymenko				Electric drive and automation of a crank press Summary	.	Page	Pages
Checked	V. Teriaiev						7	100
Recension						NTUU "I. Sikorskiy KPI", FEA department AEMS-ED gr. EP- p31		
N. contr.	V. Teriaiev							
Approved	S. Kovbasa							

ЗМІСТ

ВСТУП.....	100
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ КОВАЛЬСЬКО-ПРЕСОВИХ МАШИН	122
1.1 Призначення, галузі використання та типові технічні рішення ковальсько-пресових машин.....	122
1.2 Опис технологічного процесу роботи кривошипного преса	19
1.3 Вимоги до електроприводу та систем автоматизації	23
1.4 Обґрунтування модернізації електроприводу та автоматизації кривошипного преса	28
Висновки до розділу 1	34
2 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА.....	37
2.1 Обґрунтування вибору електродвигуна кривошипного преса	37
Висновки до розділу 2	39
3 ВИБІР ТИПУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ	41
Висновки до розділу 3	45
4 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	48
4.1 Загальні положення.....	48
4.2 Розрахунок номінальних даних двигуна.....	48
Для проведення розрахунків користуємось паспортними даними двигуна 4А132М4У3, наведеними в таблиці 4.1.	48
4.3 Перерахунок параметрів з Г - подібної схеми заміщення в Т - подібну	50
4.4 Кінематичний розрахунок	53
Висновки до розділу 4	54

5 ПРИНЦИП ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ І МАТЕМАТИЧНА	56
МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ПЧ-АД	56
5.1 Частотне керування в системі ПЧ - АД.....	56
Висновки до розділу 5	63
6 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	65
6.1 Побудова моделі системи ПЧ - АД у MATLAB/Simulink.....	65
6.3 Аналіз результатів моделювання.....	70
Висновки до розділу 6	71
7 АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КРИВОШИПНОГО ПРЕСУ	73
7.1 Загальна характеристика системи автоматизації	73
7.2 Автоматизація роботи кривошипного преса	73
Висновки до розділу 7	77
8.1 Загальна структура системи керування	79
8.2 Силова схема перетворювального пристрою	79
8.3 Частотний перетворювач АВВ ACS580 - 01. Призначення та принцип роботи	81
Висновки до розділу 8	84
ВИСНОВКИ.....	86
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	88
ДОДАТОК А.....	94
ДОДАТОК Б.....	98

ВСТУП

Сучасний прогрес машинобудівної та металообробної галузі безпосередньо пов'язаний з покращенням продуктивності процесів, точності роботи та автоматизації виробничих процесів та обладнання. Одним з найпоширеніших видів обладнання, що застосовуються на виробництві, є преси і штампи. Ефективність їх роботи загалом визначається за рахунок електроприводу, від якого залежить ефективність, якість та кількість зробленої заготовки або матеріалу.

В наш час розвиток промисловості спрямований в сторону автоматизації процесів, при цьому особлива увага приділяється вже існуючому обладнанню з метою його модернізації для поліпшення процесів роботи. Класичні некеровані електроприводи пресів не забезпечують потрібного гнучкого управління, характеризуються значними пусковими струмами, збільшеними механічними навантаженнями та обмеженими можливостями регулювання швидкості. Це призводить до збільшення енергоспоживання, прискорює зношення механічних вузлів та погіршує експлуатаційні характеристики устаткування.

Одним із перспективних варіантів модернізації для кривошипного пресового устаткування є використання асинхронних електродвигунів з частотним регулюванням обертів двигуна. Використання системи «частотний перетворювач - асинхронний двигун» (далі ПЧ-АД) дозволяє забезпечити плавний пуск двигуна та гальмування приводу, зменшити динамічні навантаження на механічну частину преса, збільшити енергоефективність обладнання та покращити якість управління над технологічним процесом.

Актуальність дипломної роботи полягає у необхідності підвищення ефективності роботи кривошипного преса марки JL21-110 шляхом заміни і оновлення його електроприводу із застосуванням сучасного частотно-регульованого асинхронного приводу. Реалізація такого технологічного рішення дозволить покращити динамічні характеристики системи, знизити енергетичні втрати та підвищити надійність електроустаткування в умовах змінного технологічного навантаження.

Предметом дослідження є процеси електромеханічного перетворення енергії та регулювання обертів в системі електроприводу кривошипного преса.

Метою дипломної роботи є розробка та дослідження роботи кривошипного преса серії JL21-110.

Для досягнення мети дослідження необхідно виконати наступне:

1. Провести детальний аналіз конструкції та принципу роботи кривошипного преса серії JL21-110.
2. Виконати розрахунок навантажень і вибір основного електроустаткування електроприводу преса.
3. Обрати АД та ПЧ для оновленого приводу.
4. Розробити математичну модель АД.
5. Дослідити принципи частотного керування ЕП.
6. Виконати моделювання системи ПЧ-АД у середовищі MATLAB\Simulink.
7. Проаналізувати статичні та динамічні характеристики роботи електроприводу та оцінити ефективність запропонованого технічного рішення.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ КОВАЛЬСЬКО-ПРЕСОВИХ МАШИН

1.1 Призначення, галузі використання та типові технічні рішення ковальсько-пресових машин

Історія розвитку ковальсько-пресового обладнання [1 - 9] є невід'ємною частиною еволюції машинобудування та технологій обробки в металургії. Це обладнання проходило кілька важливих етапів, кожен з яких був пов'язаний із розвитком енергетики, матеріалознавства та механіки. Перші методи обробки металів тиском виникли ще в давнину. Основним інструментом був ручний молот, який використовувався ковалями для формування необхідної форми металу. Уже в цей період було зрозуміло, що пластична деформація дозволяє отримувати більш міцні вироби порівняно з литтям [1 - 9].

У середньовіччі з'являються перші механізовані пристрої, водяні молоти, які працювали від енергії водяного колеса. Це дозволило значно підвищити продуктивність праці та обробляти заготовки більшого розміру. Справжній прорив у розвитку ковальсько-пресового обладнання відбувся під час промислової революції. Використання парових машин дало змогу створити парові молоти, перші механічні преси та гідравлічні преси. Парові молоти стали основним обладнанням для обробки великих деталей. Вони дозволяли робити на багато більше, однак мали суттєві недоліки: сильні вібрації, низьку точність, високий рівень шуму та значну залежність якості обробки від кваліфікації оператора. Саме ці недоліки стимулювали пошук більш досконалих технічних рішень.

З появою електродвигунів виникли перші кривошипні преси. Головний принцип їхньої роботи - перетворення обертання двигуна у лінійний рух повзуна. Таке рішення підвищило точність обробки, автоматизувало процес і різко збільшило продуктивність. Ця класична конструкція без змін використовується і сьогодні.

Ковальсько-пресові машини займають важливе місце серед технологічного обладнання сучасних промислових підприємств. Їх широке застосування зумовлене високою ефективністю процесів обробки металів тиском, що дозволяє отримувати деталі складної форми з мінімальними витратами матеріалу та енергії.

Найбільш чутливою до стану та розвитку ковальсько-штампувального обладнання є аерокосмічна галузь. Для об'єктів аерокосмічної техніки необхідно отримувати в деталях мінімальної ваги максимальні службові та експлуатаційні характеристики. Це, як правило, може забезпечити тільки обробка матеріалів тиском.

Машинобудування неможливе без використання ковальсько-пресового обладнання, оскільки значна частина деталей виготовляється саме методами пластичної деформації. У порівнянні з литтям або механічною обробкою, такі процеси забезпечують підвищену міцність виробів за рахунок ущільнення структури металу, усунення внутрішніх дефектів і сприятливого розташування волокон матеріалу. Це значно підвищує експлуатаційні властивості деталей, їх довговічність та стійкість до механічних навантажень.

До основних технологічних операцій, що виконуються на ковальсько-пресових машинах, належать: штампування листового металу, об'ємне кування, холодне та гаряче штампування, витяжка листового металу, пробивання та вирубка, калібрування, обтискання, гнуття та формоутворення деталей. Завдяки такій універсальності ковальсько-пресове обладнання широко використовується в авіа-космічній промисловості, машинобудуванні, енергетичному машинобудуванні, виробництві побутової техніки, приладобудуванні та багатьох інших галузях. Практично кожне сучасне виробництво містить у своєму технологічному циклі операції, пов'язані з пластичною деформацією металів (див. рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Класифікація ковальсько-пресових машин

В сучасному вигляді кривошипні преси являють собою високотехнологічні машини, що поєднують у собі механічну надійність класичних конструкцій із сучасними системами керування та автоматизації. Основою їх роботи, як і раніше, залишається кривошипно-шатунний механізм, однак його реалізація значно вдосконалена за рахунок застосування нових матеріалів, високоточних методів обробки, оптимізованих конструктивних рішень та удосконалення приводних систем. Сучасні преси оснащуються асинхронними електроприводами з частотним регулюванням, що дозволяє змінювати швидкість обертання двигуна залежно від стадії технологічного процесу. Це забезпечує підвищення енергоефективності, зменшення динамічних навантажень і покращення якості обробки.

Значну роль відіграють також маховики оптимізованої конструкції, які забезпечують накопичення та раціональне використання кінетичної енергії в процесі деформації металу. У момент найбільшого навантаження маховик віддає

накопичену енергію, зменшуючи потребу у встановленні надмірно потужного двигуна. Це дозволяє знизити енергоспоживання та підвищити економічність обладнання.

Розглянемо більш докладно різновиди сучасних пресів з електроприводом.

Кривошипний прес з електроприводом, є одним із найпоширеніших видів пресового обладнання. Його принцип дії базується на перетворенні обертального руху електродвигуна у зворотно-поступальний рух повзуна за допомогою кривошипно-шатунного механізму. Електродвигун через пасову передачу або редуктор обертає маховик, який накопичує кінетичну енергію. Під час робочого ходу ця енергія через муфту передається на кривошипний вал.

Такі преси застосовуються для холодного штампування листового металу, вирубки, пробивки отворів, гнуття та неглибокої витяжки деталей. Вони характеризуються високою продуктивністю, можливістю роботи у безперервному циклі та відносно простою конструкцією.

У сучасних моделях використовуються асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором потужністю від кількох кіловат до сотень кіловат. Для регулювання режимів роботи часто застосовують частотні перетворювачі, які забезпечують плавний запуск, зниження пускових струмів та зміну частоти обертання двигуна (див. рисунок 1.2).

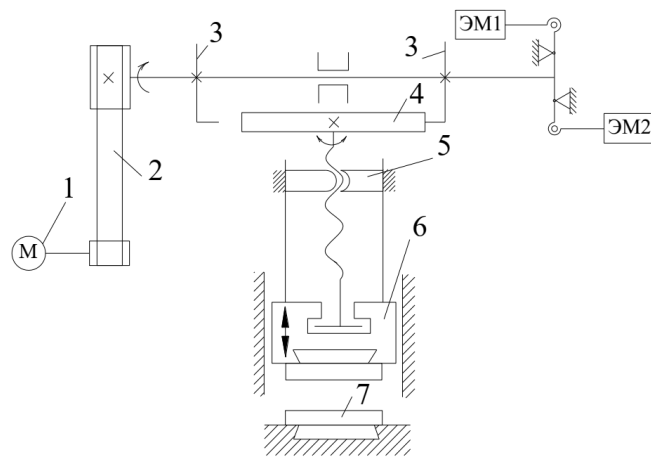


Рисунок 1.2 - Кривошипний прес

Іншою різновидністю пресів є гвинтовий прес з фрикційним приводом. На рисунку 1.3,а показаний гвинтовий прес зусиллям 400 т, а на рисунку 1.3,б - його кінематична схема.



а)



б)

Рисунок 1.3 – Гвинтовий фрикційний прес

На рис. 1.3,б позначені: 1 - АД з короткозамкненим ротором; 2 - пасова передача; 3 - фрикційні диски; 4 - маховик; 5 - нерухома гайка; 6 - повзун; 7 - станина; 8 - ЭМ1, ЭМ2 – електромагніти реверсора.

Обертання двигуна через пасову передачу передається на вал із закріпленим на ньому фрикційним диском. За допомогою електромагнітів ЕМ1 або ЕМ2 один з дисків уводиться в зачеплення з маховиком і за рахунок сил тертя передає йому обертання від електродвигуна. Маховик виконує роль муфти ковзання й одночасно є інерційним елементом, що запасає кінематичну енергію. Повзун переміщається униз і здійснює пресування.

Недоліком гвинтового преса з маховиком є наявність фрикційного вузла.

Використання прямого кільцевого або дугостаторного привода для гвинтового преса дає можливість усунути фрикційну механічну передачу між двигуном і натискним гвинтом. Конструктивне виконання сучасного гвинтового преса з безредукторним приводом та гідравлічним захистом від перевантажень показано на рисунку 1.3,в.

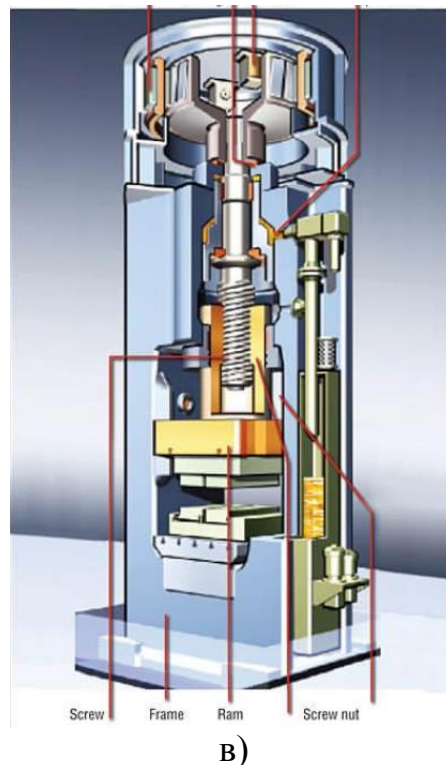


Рисунок 1.3 – Гвинтовий прес з прямим дугостаторним приводом

На даному гвинтовому пресі використовується безредукторний привод з тихохідним багатополюсним кільцевим електродвигуном.

Перевагами гвинтових пресів є рівномірність зусилля по довжині ходу і значна величина робочого ходу.

Серво-прес - є сучасним високоточним видом пресового обладнання, у якому основним приводом є серводвигун змінного струму. На відміну від класичних механічних пресів, тут відсутній постійно обертовий маховик. Рух повзуна формується безпосередньо серводвигуном через кульково-гвинтову передачу, ролико-гвинтовий механізм або редуктор (див. рисунок 1.4).

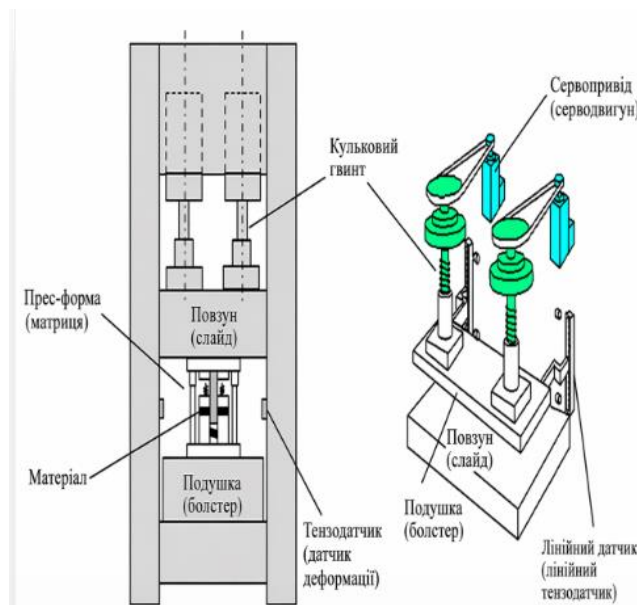


Рисунок 1.4 - Кінематична схема серво-преса

Завдяки електронному керуванню можливо програмувати швидкість, прискорення, глибину ходу, момент зусилля та час витримки у нижній точці. Це особливо важливо у точному штампуванні, складанні електронних компонентів, запресовуванні підшипників, деталей автомобільної галузі та високоточному формуванні (див. рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 - Серво-прес

Система електроприводу включає сервомотор, серво-підсилювач, енкодер зворотного зв'язку та програмований логічний контролер. Така система дозволяє реалізувати замкнене керування положенням і силою.

1.2 Опис технологічного процесу роботи кривошипного преса

Технологічний процес , роботи кривошипного преса являє собою складну сукупність взаємопов'язаних механічних, енергетичних і керуючих процесів, спрямованих на виконання операцій обробки металів тиском. Основною особливістю даного процесу є його циклічний характер, при якому всі операції повторюються з певною періодичністю, забезпечуючи безперервність виробництва.

Кривошипний прес перетворює обертальний рух електродвигуна у зворотно-поступальний рух повзуна, що здійснює безпосередній вплив на заготовку через штамповий інструмент. Така кінематична схема забезпечує стабільність параметрів процесу та високу продуктивність обладнання (див. рис. 1.6).

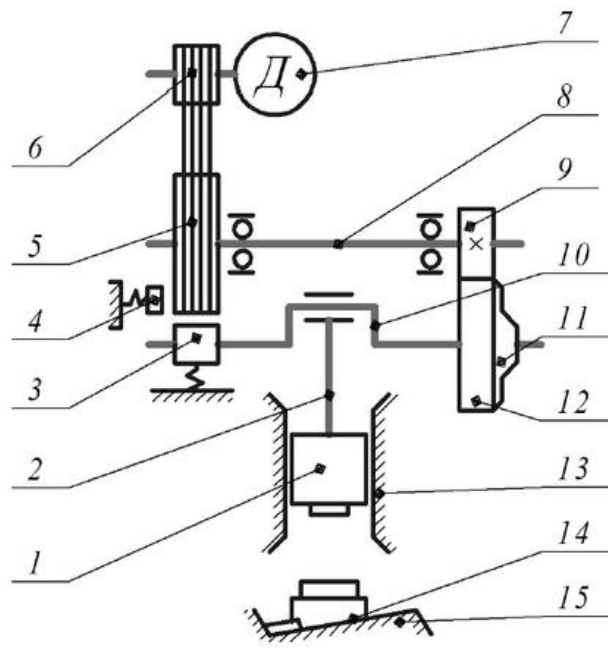


Рисунок 1.6 - Кінематична схема кривошипного преса

Повний цикл роботи преса включає декілька основних стадій, кожна з яких має свої функціональні особливості та впливає на загальну ефективність процесу. Першою стадією є підготовка та подача заготовки в робочу зону. У сучасних умовах дана операція виконується переважно автоматизовано за допомогою механічних подавачів, роликів систем або маніпуляторів, що дозволяє забезпечити високу точність позиціонування та мінімізувати вплив людського фактору та небезпеку для працівників. На цьому етапі важливо забезпечити правильне розташування заготовки відносно робочого інструменту, оскільки навіть незначні відхилення можуть призвести до браку або пошкодження обладнання. Після подачі заготовки здійснюється включення приводу преса. Електродвигун, як правило асинхронний, передає обертальний момент через клинопасову або зубчасту передачу на маховик, який накопичує кінетичну енергію. Далі рух передається на кривошипно-шатунний механізм, який забезпечує перетворення обертального руху у поступальний. Початковий етап руху повзуна вниз називається холостим або підвідним ходом. На цьому етапі повзун рухається до заготовки без значного навантаження, а швидкість

його переміщення є максимальною. Основною метою цієї стадії є скорочення часу циклу та підвищення продуктивності.

Наступною і найбільш відповідальною стадією є робочий хід, під час якого відбувається безпосередня деформація металу. У цей момент інструмент контактує із заготовкою, і виникає значне технологічне зусилля, яке може досягати максимальних значень для даного преса. Характер навантаження на цій стадії є різко змінним і імпульсним, що створює підвищені вимоги до міцності та жорсткості конструкції преса, а також до параметрів електроприводу. Залежно від типу операції (вирубка, витяжка, гнуття, об'ємне штампування) характер деформації може відрізнятися, проте в усіх випадках відбувається пластична зміна форми заготовки під дією прикладеного зусилля. Особливу роль у забезпеченні ефективності робочого ходу відіграє маховик (див. рис. 1.9). Його функція полягає у накопиченні енергії під час холостого ходу та її віддачі у момент виконання робочої операції. Це дозволяє значно зменшити навантаження на електродвигун і забезпечити більш рівномірний режим його роботи. Енергетичні процеси у пресі мають складний характер, оскільки лише частина накопиченої енергії використовується безпосередньо для деформації, а решта виконує роль резерву для стабілізації роботи системи.

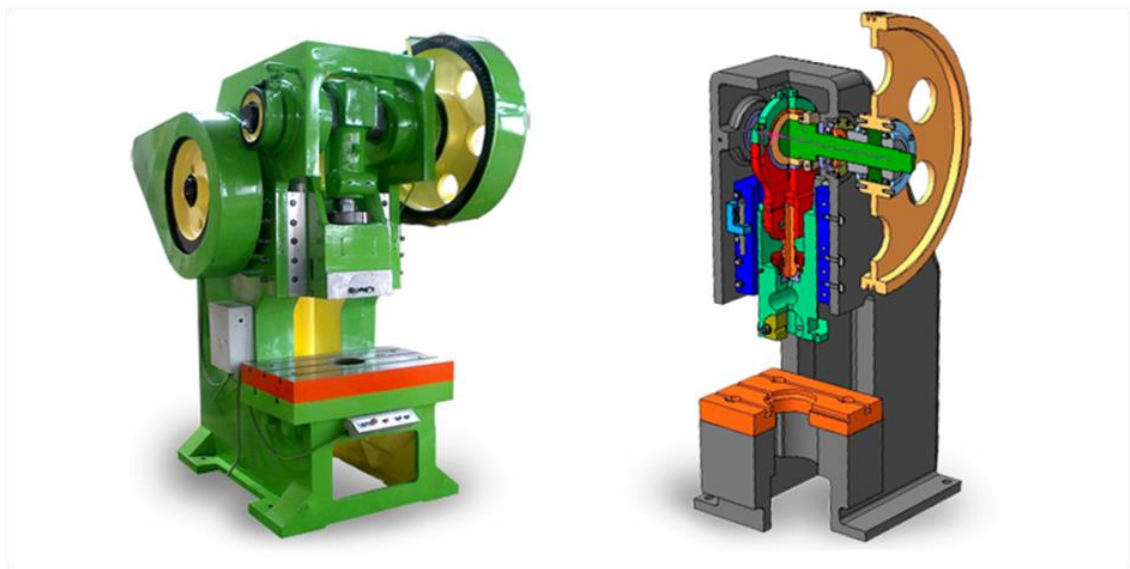


Рисунок 1.7 - Розріз приводного механізму кривошипного преса та маховика

Після досягнення нижньої мертвої точки повзун починає рухатися у зворотному напрямку - вгору. Ця стадія називається зворотним ходом і супроводжується зняттям навантаження з інструменту та механізмів [1-7].

На цьому етапі відбувається відновлення енергетичного балансу системи, а також підготовка до наступного циклу роботи. Швидкість зворотного ходу може бути нижчою, ніж швидкість холостого ходу вниз, що пов'язано з необхідністю забезпечення безпечної роботи та зменшення динамічних навантажень. Після завершення зворотного ходу здійснюється видалення готової деталі із робочої зони. У залежності від рівня автоматизації це може виконуватися вручну або за допомогою автоматичних пристроїв - виштовхувачів, транспортерів або роботизованих систем. Одночасно може виконуватись очищення робочої зони від відходів та підготовка до подачі нової заготовки. На цьому етапі важливим є забезпечення синхронізації всіх допоміжних операцій із основним циклом роботи преса. Важливою особливістю технологічного процесу є нерівномірний характер навантаження. Найбільші зусилля виникають у кінцевій фазі робочого ходу, що призводить до значних динамічних впливів на всі елементи системи. Це обумовлює необхідність використання спеціальних конструктивних рішень, таких як маховики, муфти, гальмівні системи та амортизуючі елементи. Крім того, значну роль відіграє правильний вибір режимів роботи преса, включаючи частоту ходів, швидкість переміщення повзуна та параметри електроприводу.

Сучасні кривошипні преси працюють у складі автоматизованих виробничих систем, що значно розширює їх функціональні можливості. Використання систем автоматизації дозволяє забезпечити точне керування всіма стадіями технологічного процесу, включаючи контроль положення повзуна, швидкості руху, навантаження та стану обладнання. Це дозволяє не тільки підвищити продуктивність, але й значно покращити якість виготовлених виробів та знизити рівень браку. Окрему увагу слід приділити питанням безпеки технологічного процесу. Робота преса пов'язана з високими навантаженнями та потенційною небезпекою для обслуговуючого

персоналу, тому сучасні системи оснащуються захисними пристроями, блокуванням та аварійними системами зупинки. Це дозволяє мінімізувати ризики травматизму та забезпечити відповідність обладнання сучасним стандартам безпеки.

Таким чином, технологічний процес роботи кривошипного преса є складною багатостадійною системою, що включає взаємодію механічних, електричних та керуючих компонентів. Його ефективність визначається правильним поєднанням конструктивних рішень, параметрів електроприводу та рівня автоматизації. Розуміння особливостей цього процесу є необхідною умовою для подальшого проектування та оптимізації систем електроприводу і керування, що є основною метою даного дипломного проекту.

1.3 Вимоги до електроприводу та систем автоматизації

Електропривод кривошипного преса є одним із найважливіших функціональних елементів, що визначає ефективність, продуктивність, точність та надійність роботи всього обладнання. Саме електропривод забезпечує перетворення електричної енергії в механічну та передачу її до виконавчих механізмів преса, зокрема до кривошипно-шатунної системи, яка здійснює робочий рух повзуна. Від характеристик електроприводу значною мірою залежить стабільність технологічного процесу, якість виготовлення деталей, економічність експлуатації та довговічність основних вузлів машини.

Особливістю роботи кривошипного преса є різко змінний характер навантаження. У період холостого ходу навантаження на двигун є відносно невеликим, тоді як під час безпосереднього процесу деформації металу виникають короткочасні, але дуже значні пікові навантаження. Такі навантаження можуть у декілька разів перевищувати номінальні параметри двигуна. Саме тому до електроприводу преса висуваються підвищені вимоги щодо перевантажувальної

здатності, термічної стійкості та надійності роботи в повторно-короткочасних режимах.

Однією з основних вимог до електроприводу є висока перевантажувальна здатність. Під час виконання робочого ходу преса електродвигун повинен забезпечити передачу великого крутного моменту без зриву швидкості, перегріву та втрати працездатності. Якщо привод не здатний витримувати такі режими, це може призвести до поступового зниження швидкості двигуна, нестабільної роботи обладнання, зниження якості штампування або аварійної зупинки машини. Тому вибір двигуна здійснюється з урахуванням запасу потужності, допустимих перевантажень і тривалості робочого циклу.

Важливою вимогою є забезпечення достатнього пускового моменту. Оскільки система приводу преса містить маховик значної маси, шків, передачі та інші обертові елементи, при запуску необхідно подолати значні інерційні сили. Недостатній пусковий момент може викликати затяжний розгін двигуна, надмірне нагрівання обмоток, перевантаження мережі живлення або неможливість запуску машини під навантаженням. Для вирішення цієї проблеми у сучасних установках застосовуються частотні перетворювачі, які забезпечують плавний пуск двигуна із поступовим збільшенням частоти та напруги живлення. Це дозволяє зменшити пускові струми, уникнути механічних ударів і покращити умови роботи обладнання.

Не менш важливою є вимога енергоефективності електроприводу. Робота кривошипного преса характеризується нерівномірним споживанням енергії: у фазі холостого ходу споживана потужність є мінімальною, а під час робочого ходу різко зростає. Для раціонального використання енергії у приводах пресів широко застосовуються маховики, які накопичують кінетичну енергію під час зниженого навантаження і віддають її в момент штампування. Завдяки цьому зменшується необхідна встановлена потужність електродвигуна та знижується навантаження на електромережу підприємства. Додатково сучасні частотно-керовані приводи

дозволяють працювати двигуну лише в необхідних режимах, що також зменшує втрати енергії.

Окрему увагу слід приділити вимозі плавності пуску та гальмування. Різкі зміни швидкості можуть спричиняти ударні навантаження в зубчастих передачах, муфтах, підшипниках та інших елементах механізму. Це прискорює зношування деталей, збільшує шум і вібрації, а також знижує ресурс обладнання. Плавний пуск дозволяє поступово розігнати систему без перевантажень, а контрольоване гальмування забезпечує м'яку зупинку преса та точну фіксацію робочих органів у необхідному положенні.

Ще однією важливою вимогою є можливість регулювання швидкості обертання приводу. У традиційних механічних системах швидкість преса була практично сталою, що обмежувало технологічні можливості обладнання. Сучасні електроприводи дозволяють змінювати швидкість руху повзуна залежно від стадії циклу: збільшувати її на холостому ході для скорочення часу циклу та зменшувати її під час деформації металу для покращення якості обробки. Це дозволяє знизити знос штампового інструменту, підвищити точність виробів, зменшити енергоспоживання та покращити загальну продуктивність машини. []

Надійність та довговічність електроприводу є критично важливими параметрами, особливо в умовах серійного та масового виробництва. Відмова приводу часто призводить до простою всієї технологічної лінії, що спричиняє значні економічні втрати. Тому при проектуванні електроприводу необхідно враховувати теплові режими роботи двигуна, забезпечувати ефективне охолодження, використовувати підшипники підвищеної надійності та встановлювати захисні пристрої від перевантаження, коротких замикань, втрати фази та перенапруги.

Система автоматизації кривошипного преса є невід'ємною складовою сучасного виробництва і виконує функції керування, контролю та захисту. Основним завданням автоматизації є забезпечення узгодженої роботи всіх вузлів преса відповідно до заданого технологічного циклу. До таких функцій належать

запуск і зупинка електроприводу, вибір режиму роботи, регулювання швидкості, керування муфтою та гальмом, контроль положення повзуна, а також синхронізація з подаючими та вивантажувальними пристроями.

Однією з ключових функцій автоматизації є контроль положення та швидкості руху повзуна. Для цього використовуються датчики положення, енкодери, індуктивні та оптичні вимірювальні системи, які передають інформацію в систему керування у реальному часі. На основі цих даних контролер формує керуючі сигнали для приводу, забезпечуючи точне виконання циклу роботи, дотримання заданих параметрів та повторюваність технологічного процесу.

Важливою складовою автоматизації є функції захисту обладнання та персоналу. До них належать:

- захист від перевантаження електродвигуна;
- захист від перегріву двигуна;
- контроль аварійних ситуацій;
- аварійне відключення приводу;
- блокування роботи при відкритих захисних огорожах;
- контроль справності датчиків і виконавчих механізмів.

Такі системи дозволяють запобігти пошкодженню обладнання, уникнути аварій та забезпечити безпечні умови праці оператора.

Новий етап у розвитку систем автоматизації ковальсько-пресового машинобудування пов'язаний із впровадженням інтелектуальних перетворювачів частоти (ПЧ). Сучасні частотні регулятори, завдяки розвиненій мікропроцесорній архітектурі та вбудованим алгоритмам прикладного позиціонування, здатні самостійно виконувати складні циклограми роботи. Вони забезпечують точне регулювання швидкісних режимів виконавчого механізму преса, програмний підрахунок кількості технологічних операцій, безперервну діагностику стану силових вузлів, а також синхронізацію темпу роботи з іншим обладнанням штампувального комплексу. Такі пристрої характеризуються високим рівнем

завадостійкості в умовах важкого виробництва, підвищеною експлуатаційною надійністю та гнучкістю налаштування через вбудовані інтерфейси та прикладні макроси.

Для зручності оператора широко використовуються інтерфейси людина-машина (НМІ). За допомогою сенсорних панелей оператор може запускати та зупиняти прес, задавати параметри циклу, переглядати повідомлення про помилки, контролювати навантаження, температуру двигуна, швидкість обертання та інші параметри. Це значно підвищує зручність експлуатації обладнання та скорочує час налаштування виробництва.

Інтеграція преса в автоматизовані виробничі лінії є важливим напрямком розвитку сучасного машинобудування. У таких системах прес працює спільно з роботами-маніпуляторами, транспортерами, пристроями подачі заготовок, системами технічного зору та автоматичними складами. Для обміну даними використовуються промислові мережі та протоколи зв'язку, що забезпечують швидку і надійну передачу інформації між усіма елементами комплексу.

Окрему увагу приділяють діагностиці та моніторингу стану обладнання. Сучасні системи автоматизації дозволяють постійно контролювати струм двигуна, температуру обмоток, рівень вібрації, навантаження на повзун, швидкість обертання та інші параметри. Це дає можливість своєчасно виявляти відхилення від нормального режиму роботи та виконувати профілактичне технічне обслуговування. Такий підхід значно підвищує надійність обладнання і зменшує витрати на ремонт.

Таким чином, вимоги до електроприводу та систем автоматизації кривошипних пресів є комплексними та охоплюють широкий спектр параметрів: від енергетичних і динамічних характеристик до функціональних можливостей керування та безпеки. Виконання цих вимог є необхідною умовою забезпечення ефективної, надійної, економічної та безпечної роботи пресового обладнання, а також підвищення конкурентоспроможності сучасного виробництва.

1.4 Обґрунтування модернізації електроприводу та автоматизації кривошипного преса

Сучасні умови промислового виробництва висувають підвищені вимоги до продуктивності, точності, енергоефективності та безпеки технологічного обладнання. Особливо це стосується ковальсько-пресових машин, які працюють у важких динамічних режимах, сприймають значні ударні навантаження та виконують відповідальні операції формоутворення металевих деталей. У зв'язку з цим питання модернізації електроприводу та автоматизації кривошипного преса є актуальним і технічно обґрунтованим напрямком підвищення ефективності виробництва.

Більшість кривошипних пресів, що на даний час експлуатуються на підприємствах, були спроектовані за традиційними схемами керування, які передбачають використання нерегульованих асинхронних електродвигунів, контакторно-релейної апаратури та обмежених засобів контролю. Такі системи мають ряд недоліків: високі пускові струми, значні механічні навантаження під час запуску, відсутність плавного регулювання швидкості, підвищене енергоспоживання, низька гнучкість налаштування та обмежені можливості інтеграції у сучасні автоматизовані виробничі комплекси. Крім того, зношеність морально застарілої апаратури часто призводить до зниження надійності роботи обладнання та збільшення витрат на технічне обслуговування.

Одним із основних напрямків модернізації є заміна існуючої системи електроприводу на сучасний регульований електропривод із використанням частотного перетворювача. Такий привід дозволяє забезпечити плавний пуск електродвигуна без значних кидків струму та ударних навантажень у механічній частині машини. Плавний розгін позитивно впливає на ресурс муфт, редукторів, підшипників, валів та інших елементів преса, а також зменшує навантаження на електромережу підприємства.

Живлення модернізованого електроприводу доцільно здійснювати від трифазної мережі змінного струму напругою 380 В частотою 50 Гц, що відповідає стандартним умовам промислового електропостачання. Кількість фаз – три. Така система живлення забезпечує стабільну роботу електродвигуна, високий коефіцієнт корисної дії та можливість застосування стандартного промислового обладнання.

Для сучасного кривошипного преса важливо забезпечити регулювання швидкості обертання приводу в широкому діапазоні. Рекомендований діапазон регулювання швидкості становить не менше 10:1. Це дозволяє змінювати швидкість руху повзуна залежно від етапу робочого циклу. Під час холостого ходу швидкість може бути підвищеною для скорочення часу циклу та збільшення продуктивності, а під час робочого ходу – зниженою для точнішого виконання штампування, зменшення ударних навантажень та зниження зносу інструменту.

Особливу увагу необхідно приділити вимогам до перехідних процесів. Розгін електроприводу повинен бути плавним, контрольованим та здійснюватися без перевищення допустимих струмів. Це дозволяє уникнути механічних ривків і перевантаження кінематичних вузлів преса. Гальмування також повинно бути керованим та плавним, із можливістю точної зупинки повзуна у верхньому вихідному положенні. Реалізація таких режимів можлива за допомогою сучасних частотних перетворювачів із функціями динамічного або рекуперативного гальмування.

Важливою складовою модернізації є автоматизація роботи кривошипного преса. У сучасних умовах прес повинен працювати не лише як окрема машина, а як високоефективний елемент автоматизованої виробничої системи. Для цього доцільно використовувати інтелектуальний перетворювач частоти (ПЧ) із розширеним програмним функціоналом та вбудованою логікою керування. Це дозволить забезпечити не лише енергоефективне регулювання швидкості, а й безпосереднє виконання алгоритмів керування, обробку сигналів від технологічних датчиків та координацію роботи всіх виконавчих механізмів преса [1-9,20,35-42].

Автоматизація преса на базі частотно-регульованого електроприводу повинна включати:

- плавний автоматичний запуск, реверс та динамічну зупинку електродвигуна;
- гнучке керування швидкістю роботи привода залежно від умов штампування;
- моніторинг положення повзуна через інтеграцію датчиків із входами ПЧ;
- координацію та узгодження роботи з вузлами муфти й гальма;
- автоматичне відпрацювання заданого робочого циклу преса;
- фіксацію та підрахунок кількості виконаних циклів;
- апаратне та програмне блокування роботи привода при виникненні несправностей;
- оперативну видачу аварійних повідомлень та захист двигуна від перевантажень;
- безперервний контроль теплового стану та моменту навантаження на валу;
- синхронізацію темпу роботи привода з автоматичними пристроями подачі заготовок.

Для зручності експлуатації та візуалізації процесів рекомендується підключення операторської панелі (HMI) безпосередньо до перетворювача частоти через промисловий інтерфейс передачі даних. За допомогою HMI-панелі оператор може гнучко задавати параметри роботи привода, вибирати режими керування, контролювати поточні графіки навантаження та переглядати журнал діагностичних повідомлень. Таке рішення значно спрощує обслуговування ковальсько-пресового обладнання, підвищує його надійність за рахунок зменшення кількості апаратних елементів логіки та скорочує час переналагодження при зміні штампової продукції.

Додатковою перевагою автоматизації є можливість реалізації систем моніторингу технічного стану преса. Контроль струму двигуна, температури, вібрації, кількості циклів та навантаження дозволяє своєчасно виявляти ознаки несправностей і проводити профілактичне технічне обслуговування. Такий підхід підвищує надійність обладнання та зменшує витрати на ремонт.

Модернізація електроприводу та автоматизація кривошипного преса також забезпечують економічний ефект. Зниження енергоспоживання, скорочення простоїв, зменшення зносу вузлів, підвищення продуктивності та якості продукції дозволяють скоротити собівартість виготовлення деталей і підвищити конкурентоспроможність підприємства.

Для модернізації обрано сучасний електромеханічний кривошипний прес моделі JL21-110, поширений на машинобудівних підприємствах України (рисунок 1.10).



Рисунок 1.8 - Електромеханічний кривошипний прес моделі JL21 - 110

Даний прес являє собою вертикальну станину, у верхній частині якої встановлено електродвигун, маховик, муфту-гальмо та кривошипний вал (див. рисунок. 1.9). Обертання двигуна передається через пасову передачу на маховик, а далі через муфту на кривошипний механізм. Повзун виконує зворотно-поступальний рух вверх-вниз.

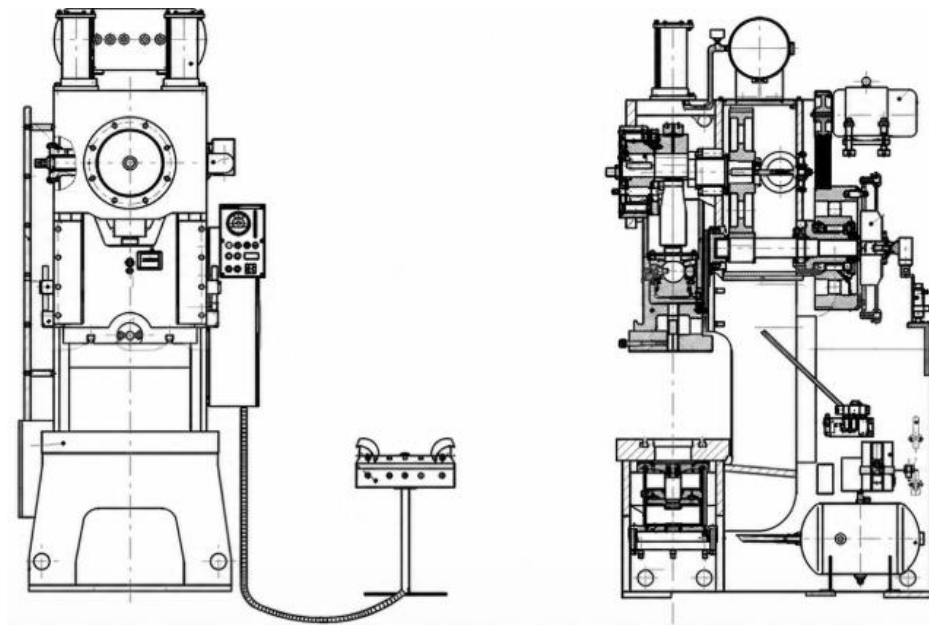


Рисунок 1.9 – Конструктивна схема кривошипного преса для модернізації

Прес JL21 - 110 має посилену зварну станину, коробчастий повзун із напрямними підвищеної точності, автоматичну систему циркуляційного мастила, електричне регулювання висоти штампа та гідравлічний захист від перевантаження. Основні технічні характеристики преса наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики механічного кривошипного преса

Параметр	Значення
Номінальне зусилля	1100 кН
Хід повзуна	160 мм
Кількість ходів	50 хв ⁻¹
Регульований діапазон	40–60 хв ⁻¹
Потужність двигуна	11 кВт
Напруга живлення	380 В
Маса преса	9340 кг

В існуючому пресі використовується електропривод на основі нерегульованого трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, який є простим, надійним та поширеним рішенням для промислового обладнання. До складу системи електроприводу входять електродвигун, магнітний пускач, теплове реле захисту, пасова передача, маховик, муфта включення та гальмівний механізм. Електродвигун забезпечує обертання маховика, який накопичує кінетичну енергію та передає її через муфту на кривошипний механізм преса під час робочого циклу.

Недоліком даної традиційної системи приводу є жорсткий прямий пуск двигуна, що супроводжується великими пусковими струмами та значним навантаженням на електромережу. Крім того, відсутність регулювання швидкості обертання призводить до обмеженої гнучкості роботи преса, а механічні удари під час запуску та зупинки негативно впливають на ресурс вузлів машини. Також характерним недоліком є підвищене споживання електроенергії та зниження загальної ефективності обладнання.

Для модернізації доцільно встановити частотний перетворювач, який забезпечить плавний пуск електродвигуна, регулювання частоти ходів преса та електронне гальмування. Це дозволить зменшити динамічні навантаження, підвищити точність роботи та збільшити строк служби механічних вузлів.

У стандартному виконанні керування пресом здійснюється кнопками «Пуск», «Стоп», «Аварійна зупинка», «Одиночний хід» і «Безперервний режим». Після модернізації система переводиться на базу сучасного перетворювача частоти (ПЧ) з вбудованим інтелектуальним модулем логіки. Керування доповнюється сенсорною панеллю оператора (HMI), що підключається безпосередньо до ПЧ, датчиком положення повзуна, а також датчиками контролю технологічної лінії («B1», «N1», «C1», «P1», «L»), сигнали від яких заводяться на дискретні та аналогові входи ПЧ. Це дозволяє реалізувати автоматичний підрахунок циклів, функцію електронного контролю перевантаження за моментом на валу двигуна та повністю автоматичний узгоджений режим роботи всієї лінії.

Таким чином, модернізація електроприводу та автоматизація кривошипного преса є технічно та економічно доцільним рішенням. Вона передбачає впровадження сучасного регульованого електроприводу з живленням від трифазної мережі 380 В, забезпечення діапазону регулювання швидкості не менше 10:1, плавного розгону та гальмування, комплексу інтегрованих електронних захистів, а також створення автоматизованої системи керування лінією безпосередньо на базі внутрішніх алгоритмів та обчислювальної потужності ПЧ. Реалізація зазначених заходів дозволить суттєво підвищити продуктивність, енергоефективність, безпечність і надійність роботи пресового обладнання.

Висновки до розділу 1

1. У результаті виконаного аналітичного огляду встановлено, що ковальсько-пресові машини займають важливе місце у сучасному машинобудуванні, металообробці та інших галузях промисловості. Використання обробки металів тиском дозволяє отримувати деталі із високими механічними властивостями, зокрема підвищеною міцністю, зносостійкістю та точністю геометричних розмірів. Крім того, даний метод забезпечує мінімальні втрати матеріалу, що є важливим фактором підвищення економічної ефективності виробництва, особливо в умовах сучасних вимог до ресурсозбереження та енергоефективності.

2. Проведений аналіз класифікації ковальсько-пресового обладнання показав, що існують механічні, гідравлічні, пневматичні та комбіновані преси, кожен із яких має свої особливості застосування, переваги та недоліки. Найбільшого поширення у промисловості набули механічні кривошипні преси, що пояснюється їх високою продуктивністю, відносною простотою конструкції, надійністю в експлуатації та можливістю інтеграції у автоматизовані виробничі лінії. Саме ці характеристики роблять їх оптимальним вибором для серійного та масового виробництва.

3. Показано, що основними вузлами кривошипного преса є електропривод, маховик, муфта-гальмо, кривошипно-шатунний механізм та повзун. Узгоджена

робота цих елементів забезпечує ефективне перетворення електричної енергії в механічну, а також накопичення і передачу енергії під час виконання технологічного процесу. Особливу роль відіграє маховик, який дозволяє згладжувати пікові навантаження та зменшувати вимоги до встановленої потужності електродвигуна.

4. Аналіз технологічного процесу роботи преса показав, що він має циклічний характер і включає послідовні етапи: подачу заготовки, холостий хід, робочий хід, зворотний хід та видалення готового виробу. Найбільш навантаженим етапом є робочий хід, під час якого виникають максимальні зусилля та динамічні навантаження на всі вузли машини. Саме цей етап визначає вимоги до міцності конструкції та параметрів електроприводу.

5. Визначено основні вимоги до електроприводу кривошипного преса. До них відносяться: висока перевантажувальна здатність, достатній пусковий момент, забезпечення плавного пуску та гальмування, можливість регулювання швидкості обертання, висока енергоефективність та надійність роботи в умовах змінного та ударного навантаження. Врахування цих вимог є обов'язковим при проєктуванні та модернізації електроприводу пресового обладнання.

6. Аналіз сучасних тенденцій розвитку пресового обладнання показав необхідність переходу від традиційних нерегульованих електроприводів до сучасних систем із частотним регулюванням. Використання перетворювачів частоти (ПЧ) дозволяє забезпечити плавний пуск, суттєве зменшення пускових струмів, регулювання швидкості в широкому діапазоні, а також реалізацію ефективних режимів електронного гальмування. Завдяки наявності у сучасних ПЧ потужних вбудованих функцій технологічної логіки та розвиненої периферії входів/виходів, це відкриває широкі можливості для створення гнучких та високоефективних автоматизованих систем керування пресовою лінією без залучення сторонніх апаратних контролерів.

7. Значну увагу приділено питанням автоматизації роботи преса. Встановлено, що сучасні кривошипні преси повинні оснащуватися датчиками положення

повзуна, системами контролю навантаження, температури та вібрації, а також засобами захисту від аварійних режимів. Використання світлових бар'єрів безпеки, систем аварійної зупинки та діагностики стану обладнання значно підвищує рівень безпеки та надійності роботи. Автоматизація також забезпечує стабільність технологічного процесу та підвищення якості готової продукції.

8. Для подальшого виконання дипломного проєкту як базове обладнання обрано сучасний механічний кривошипний прес YANGLI JL21-110. Даний прес найбільш повно відповідає вимогам модернізації, автоматизації та підвищення енергоефективності виробництва. Його конструкція передбачає використання сучасних технічних рішень, що дозволяє ефективно інтегрувати нові системи електроприводу та автоматичного керування.

9. Обраний прес має сучасну конструкцію та покращені технічні характеристики, зокрема: номінальне зусилля 1100 кН, хід повзуна 160 мм, кількість ходів 50 хв^{-1} , встановлену потужність електродвигуна 11 кВт, пневматичну муфту-гальмо, автоматичну систему мастила та систему захисту від перевантаження. Наявність цих характеристик забезпечує високу продуктивність, надійність та безпечність експлуатації обладнання.

10. Отримані результати аналітичного дослідження створюють необхідну основу для подальшого виконання дипломного проєкту. На їх основі буде здійснено обґрунтований вибір електродвигуна, розрахунок параметрів електроприводу, розробка системи автоматизованого керування та дослідження режимів роботи модернізованого преса. Проведений аналіз дозволяє зробити висновок про доцільність модернізації електроприводу та впровадження сучасних засобів автоматизації з метою підвищення ефективності, надійності та конкурентоспроможності виробництва.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА

2.1 Обґрунтування вибору електродвигуна кривошипного преса

Для виконання розрахунку використаємо технічні характеристики механічного кривошипного преса JL21 - 110, наведені у таблиці 1.1.

Робота кривошипного преса має циклічний характер і включає робочий та холостий ходи, а також період включення муфти. Відповідно до методик розрахунок потужності виконується через визначення повної роботи за цикл [10].

Визначення часу циклу.

Час одного циклу визначається за формулою:

$$t = \frac{60}{n \cdot p},$$

де n - число ходів пресу;

p - коефіцієнт використання числа ходів.

Звідси

$$t = \frac{60}{50 \cdot 0.5} = 2.4 \text{ с}$$

Визначення корисної роботи пресування. Згідно методики [10], корисна робота пресування визначається за формулою:

$$A_{\text{кор}} = 0.3 \cdot F_n \cdot S$$

$$A_{\text{кор}} = 0.3 \cdot 1100000 \cdot 0.16 = 52800 \text{ Дж}$$

де F_n - номінальне зусилля преса;

S - хід повзуна.

Визначення роботи холостого ходу. Робота холостого ходу визначається як частка від корисної роботи:

$$A_{\text{хх}} = 0.05 \cdot A_{\text{кор}}$$

$$A_{xx} = 0.05 \cdot 52800 = 2640 \text{ Дж}$$

Визначення роботи на включення муфти. Згідно методики:

$$A_m = 0.5 \cdot A_{кор}$$

$$A_m = 0.5 \cdot 52800 = 26400 \text{ Дж}$$

Визначення повної роботи за цикл. Повна робота за цикл визначається за формулою:

$$A = A_{кор} + A_{xx} + A_m$$

$$A = 52800 + 2640 + 26400 = 81840 \text{ Дж}$$

Визначення потужності електродвигуна

$$P = \frac{k \cdot A}{t \cdot \eta}$$

де k - коефіцієнт запасу.

η - ККД електроприводу.

Приймаємо попередні значення $\eta=0.8$, $k=1.25$. [10]

Тоді розрахункове значення потужності електродвигуна складе:

$$P = \frac{1.25 \cdot 81840}{2.4 \cdot 0.8} = 53.3 \text{ кВт}$$

Отримане значення потужності відповідає умовам, коли вся енергія циклу забезпечується безпосередньо електродвигуном. Проте для механічних кривошипних пресів це не відповідає реальному режиму роботи, оскільки значна частина енергії накопичується маховиком і використовується під час робочого ходу. [10]

Згідно методики [14], при наявності маховика фактична потужність електродвигуна визначається з урахуванням коефіцієнта використання маховика:

$$k_f = 0.2$$

З використанням цього коефіцієнту потрібна потужність електродвигуна складе:

$$P_n = 0.2N = 0.2 \cdot 53.3 = 10.7 \text{ кВт}$$

Визначення швидкості електродвигуна

Згідно з довідником [10] синхронна частота обертання асинхронного двигуна визначається за формулою:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}$$

де:

n_0 - синхронна частота обертання двигуна, об/хв;

f - частота мережі живлення, Гц;

p - число пар полюсів двигуна.

$$n_0 = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об / хв}$$

Для приводу преса обираємо асинхронний трифазний електродвигун з короткозамкненим ротором потужністю 11 кВт [10].

Висновки до розділу 2

1. У даному розділі було виконано розрахунок потужності електродвигуна для приводу механічного кривошипного преса на основі методики, що базується на визначенні повної роботи за цикл. Особливістю роботи преса є різко змінний характер навантаження, що зумовлено специфікою процесу штампування. Максимальні зусилля виникають лише в короткий момент робочого ходу, тоді як у решту часу прес працює з відносно малими навантаженнями. [10]

2. У процесі розрахунку було визначено складові енергетичного балансу преса. Зокрема, встановлено значення корисної роботи деформації, роботи холостого ходу та роботи, пов'язаної з включенням муфти. На основі цих величин було визначено повну роботу преса за один цикл, яка склала 81840 Дж. Далі, з

урахуванням тривалості циклу та коефіцієнта корисної дії приводу, було отримано розрахункову потужність електродвигуна, що, за відсутністю маховика, становить 53,3 кВт. [10]

3.Отримане значення є теоретичним і відповідає умовам, коли електродвигун безпосередньо покриває всю енергію робочого процесу. Однак у реальних умовах роботи механічного кривошипного преса значну роль відіграє маховик, який забезпечує накопичення енергії під час холостого ходу та її передачу в момент виконання робочого ходу. Це дозволяє істотно зменшити навантаження на електродвигун і вирівняти режим його роботи. [10]

4.З урахуванням впливу маховика було введено коефіцієнт використання маховика, що дало змогу скоригувати розрахункову потужність до рівня 11 кВт. Отримане значення узгоджується з практичними даними для пресів даного типу та підтверджує коректність застосованої методики. [10]

5.На підставі виконаного розрахунку було обрано стандартний асинхронний електродвигун потужністю 11 кВт. Такий двигун забезпечує необхідний рівень потужності, має достатній запас для роботи в умовах змінного навантаження та відповідає вимогам надійності й енергоефективності.

6.Проведені розрахунки підтвердили правильність вибору електродвигуна для приводу кривошипного преса. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого проектування системи електроприводу, вибору частотного перетворювача та розробки системи автоматичного керування.

З ВИБІР ТИПУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Вибір типу електродвигуна для приводу механічного кривошипного преса є одним із ключових етапів проєктування, оскільки від цього залежить надійність роботи обладнання, його енергоефективність та відповідність технологічним вимогам [4,11-14].

Кривошипні преси працюють у важкому повторно-короткочасному режимі з різко змінним навантаженням. Найбільше навантаження виникає під час робочого ходу, тоді як у період холостого ходу навантаження значно зменшується. Такий режим роботи вимагає від електродвигуна високої перевантажувальної здатності, достатнього пускового моменту та стійкості до динамічних навантажень.

У процесі аналізу були розглянуті можливі типи електродвигунів: двигуни постійного струму, синхронні та асинхронні двигуни.

Двигуни постійного струму мають добрі регульовальні характеристики, проте відзначаються складною конструкцією, необхідністю обслуговування колекторно-щіткового вузла та меншою надійністю у важких умовах експлуатації.

Синхронні двигуни характеризуються високим ККД та можливістю компенсації реактивної потужності, однак є складнішими в експлуатації та не забезпечують необхідної перевантажувальної здатності для пресового обладнання.

Найбільш доцільним рішенням є застосування асинхронного трифазного електродвигуна з короткозамкненим ротором, який має просту конструкцію, високу надійність, невибагливість в обслуговуванні та здатний працювати у важких умовах змінного навантаження.

На підставі виконаного у розділі 2 розрахунку визначено, що необхідна потужність електродвигуна становить близько 11 кВт. Тому для приводу преса обрано електродвигун фірми АВВ. В таблиці 3.1 наведено характеристики двигуна АВВ М3АА 132М - 4.

Таблиця 3.1 - Характеристики двигуна АВВ М3АА 132М - 4

АСИНХРОННИЙ ДВИГУН 4А132М4У3			2. МОДЕЛЬ
1. ХАРАКТЕРИСТИКИ			4А132М4У3
Параметр	Позначення	Значення	3. РОЗШИФРУВАННЯ ПОЗНАЧЕННЯ
Номинальна потужність	P_{2n}	11 кВт	4А – серія асинхронних двигунів четвертого покоління
Синхронна частота обертання	n_0	1500 об/хв	132 – висота осі обертання 132 мм
Номинальна частота обертання	n_n	1460 об/хв	М – установчий розмір корпусу (середня довжина станини)
Номинальна напруга	U_n	380/660 В	4 – кількість полюсів
Номинальний струм статора	I_{Tn}	22,5 А	У – кліматичне виконання для помірного клімату
Коефіцієнт корисної дії	η	88,4 %	3 – категорія розміщення (робота в закритих приміщеннях)
Коефіцієнт потужності	$\cos\phi$	0,84	
Кратність максимального моменту	M_{max}/M_n	2,3	
Кратність пускового моменту	M_{pn}/M_n	2,2	
Кратність пускового струму	I_p/I_n	7,0	
Момент інерції ротора	J	0,0349 кг·м ²	
Режим роботи	S	S1	
Ступінь захисту	IP	IP54	
Клас ізоляції	—	F	
Рівень шуму	L	75 дБ(А)	
Габаритні розміри (Д×Ш×В)	—	610×360×410 мм	
Маса двигуна	m	84 кг	



У зв'язку з відсутністю параметрів схеми заміщення двигуна М3АА 132М - 4, в якості прототипу вибираємо аналогічний електродвигун серії 4А132М4У3 [10], параметри якого наведені у таблиці 3.2:

Таблиця 3.2 - Технічні характеристики електродвигуна 4А132М4У3

Параметр	Позначення	Значення
Потужність	P	11 кВт
Напруга живлення	U	380 В
Частота мережі	f	50 Гц
Частота обертання	n	≈ 1460 об/хв
Коефіцієнт корисної дії	η	≈ 89 %

Параметр	Позначення	Значення
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi$	$\approx 0,84$
Клас енергоефективності	-	IE2 / IE3
Виконання	-	IM B3 (на лапах)

Обраний електродвигун відповідає вимогам приводу кривошипного преса. Він має достатній пусковий момент, що забезпечує надійний запуск механізму, а також здатний витримувати короточасні перевантаження, які виникають під час робочого ходу преса. Значення ККД та коефіцієнта потужності свідчать про достатньо високий рівень енергоефективності.

Для підвищення ефективності роботи електроприводу та забезпечення плавного регулювання швидкості доцільно застосувати частотний перетворювач. Його використання дозволяє зменшити пускові струми, забезпечити плавний розгін і гальмування, а також підвищити ресурс механічних вузлів преса.

З урахуванням важкого режиму роботи преса частотний перетворювач обирається із запасом по потужності. Для двигуна потужністю 11 кВт прийнято частотний перетворювач номінальною потужністю 15 кВт. Це забезпечує надійну роботу в умовах перевантажень, характерних для пресового обладнання.

Обираємо модель фірми ABB. Технічні характеристики наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Технічні характеристики ABB ACS580 - 01

Потужність	15 кВт
Номінальний вихідний струм	32А
Робоча напруга	380В

Для реалізації режиму швидкого та контрольованого гальмування передбачено використання гальмівного резистора, який підключається до частотного перетворювача. Це дозволяє ефективно відводити енергію під час

гальмування та забезпечує точну зупинку повзуна у верхньому положенні. Технічні характеристики резистора наведені в таблиці 3.4

Таблиця 3.4 - Технічні характеристики гальмівного опору ABB ACS580 - 01

Номінальна потужність	15 кВт
Опір	54 Ом
Вхідний струм	32 А
Вхідна напруга	380 В

Для захисту електроприводу від коротких замикань та перевантажень встановлюється автоматичний вимикач триполюсного виконання на номінальний струм 32 А з характеристикою типу С, що відповідає умовам пуску електродвигуна. Технічні характеристики автомата наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 - Технічні характеристики автомата ABB S203 - C32

Номінальний струм	32А
Кількість полюсів	1Р, 2Р, 3Р
Вимикальна здатність	6 кА

До складу силового обладнання електроприводу також входять:

- контактор для аварійного відключення двигуна серії ABB AF38. Технічні характеристики контактора наведені в таблиці 3.6:

Таблиця 3.6 - Технічні характеристики контактора ABB AF38

Номінальний струм	38А
Кількість полюсів	N0

- теплове реле для захисту від перевантаження та перегріву серії ABB TA25DU. Технічні характеристики реле наведені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 - Технічні характеристики реле ABB TA25DU

Тип захисту	Тепловий
Кількість полюсів	Три
Номінальна робоча напруга	400 В

- кабельні лінії живлення та підключення двигуна;
- система заземлення.

Для підключення електродвигуна приймається кабель перерізом $4 \times 4 \text{ мм}^2$, а для живлення частотного перетворювача - кабель перерізом $5 \times 6 \text{ мм}^2$, що забезпечує допустимі струмові навантаження та мінімальні втрати електроенергії.

Таким чином, у результаті виконаного вибору електродвигуна та силового обладнання сформовано сучасний електропривод кривошипного преса, який включає асинхронний двигун ABB M3AA 132M - 4 потужністю 11 кВт, частотний перетворювач 15 кВт, гальмівний резистор, автоматичний вимикач, апаратуру захисту та кабельну інфраструктуру. Запропоноване рішення забезпечує надійну, енергоефективну та безпечну роботу преса, а також створює основу для подальшої автоматизації виробничого процесу.

Висновки до розділу 3

1. У результаті виконаного аналізу та технічного обґрунтування було здійснено вибір типу електродвигуна та комплексу силового обладнання для електроприводу механічного кривошипного преса. Встановлено, що з урахуванням характеру навантаження, який відзначається значною нерівномірністю, ударними впливами та повторно-короткочасним режимом роботи, найбільш доцільним є

застосування асинхронного трифазного електродвигуна з короткозамкненим ротором.

2. На підставі розрахунків, виконаних у попередньому розділі, визначено необхідну потужність приводу, що становить 11 кВт. З урахуванням отриманих результатів та вимог до надійності, енергоефективності і довговічності роботи обрано електродвигун ABB M3AA 132M-4, який є сучасним промисловим рішенням та відповідає міжнародним стандартам якості. Даний двигун характеризується достатнім пусковим моментом, високим коефіцієнтом корисної дії, прийнятним коефіцієнтом потужності та здатністю працювати в умовах змінного навантаження, що повністю задовольняє вимоги приводу кривошипного преса.

3. Виконаний розрахунок необхідної частоти обертання показав, що для забезпечення заданої продуктивності преса (50 ходів за хвилину) доцільно застосовувати електродвигун із частотою обертання близько 1500 об/хв. Це забезпечується використанням чотириполюсного асинхронного двигуна з фактичною частотою обертання 1460 об/хв у поєднанні з передаточним механізмом, що має передаточне число близько 30. Таким чином, обраний двигун повністю узгоджується з кінематикою приводу преса.

4. З метою підвищення ефективності роботи електроприводу, зменшення пускових струмів та забезпечення плавного регулювання швидкості обертання обрано частотний перетворювач виробництва ABB типу ACS580 номінальною потужністю 15 кВт. Вибір перетворювача з запасом по потужності забезпечує стабільну роботу приводу в умовах перевантажень, характерних для пресового обладнання, а також підвищує його надійність.

5. Для реалізації керованого гальмування та забезпечення точної зупинки повзуна передбачено використання гальмівного резистора, що працює у складі частотного перетворювача. Це дозволяє ефективно відводити надлишкову енергію під час гальмування та запобігати перевантаженню електроприводу.

6.Також виконано вибір допоміжного силового обладнання, зокрема автоматичного вимикача, контактора та теплового реле виробництва АВВ, які забезпечують захист електродвигуна та елементів електроприводу від коротких замикань, перевантажень та аварійних режимів роботи. Обґрунтовано вибір кабельної продукції та системи заземлення, що відповідають вимогам безпечної експлуатації електроустановок.

7.Застосування обладнання одного виробника забезпечує сумісність усіх елементів системи, спрощує монтаж і налаштування, а також підвищує загальну надійність і довговічність електроприводу.

8.Таким чином, у результаті виконаного розділу сформовано технічно обґрунтоване рішення щодо вибору електродвигуна та силового обладнання для приводу кривошипного преса. Обране обладнання повністю відповідає умовам експлуатації, забезпечує необхідні технічні характеристики, енергоефективність і безпечність роботи, а також створює основу для подальшої реалізації системи автоматизованого керування.

4 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

4.1 Загальні положення

Аналіз функціонування електроприводу кривошипного преса потребує розробки комплексної математичної моделі асинхронного двигуна, що забезпечує високу точність відтворення електромагнітних та електромеханічних явищ. Використання такої моделі відкриває можливість детального дослідження динаміки системи, прогнозування пікових навантажень та оптимізації алгоритмів керування. В основу математичного опису покладено Т-подібну схему заміщення, параметри якої приведені до статора. Це дозволяє формалізувати зв'язки між векторами напруг, струмів і потокозчеплень, враховуючи специфіку циклічного навантаження пресового обладнання [2,15,16,27].

4.2 Розрахунок номінальних даних двигуна

Для проведення розрахунків користуємось паспортними даними двигуна 4A132M4Y3, наведеними в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Паспортні дані двигуна 4A132M4Y3

Параметр	Значення
Тип двигуна	4A132M4Y3
Номінальна потужність P_2	11 кВт
Ковзання $S_{ном}$	0.028
Синхронна частота обертання	1500 об/хв
Перевантажувальна здатність	2.2
Момент інерції J_d	0.038 кг/м ²
ККД при 100% навантаженні	0.875
cosφ при 100% навантаженні	0,87
Індуктивний опір намагнічуючого контуру X_{mi}	3,2

Параметр	Значення
Активний опір статора R'_1	0,043
Індуктивний опір розсіювання статора X'_1	0,085
Активний опір ротора R''_2	0,032
Індуктивний опір ротора X''_2	0,13
Коефіцієнт короткого замикання	0,15

Кутова частота напруги статора:

$$\omega_{0n} = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \left(\frac{рад}{сек} \right) \quad (4.1)$$

Швидкість ідеального холостого ходу АД:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{2} = 157 \left(\frac{рад}{сек} \right) \quad (4.2)$$

Номінальна швидкість АД:

$$\omega_n = \omega_{xx} (1 - S_{ном}) = 157 \cdot (1 - 0.028) = 152.6 \left(\frac{рад}{сек} \right) \quad (4.3)$$

Номінальний робочий момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{11000}{152.6} = 72 (Н \cdot м) \quad (4.4)$$

Критичний момент АД (За максимальним навантаженням з каталогу):

$$M_k = \lambda \cdot M_n = 2.2 \cdot 72 = 158.4, Н \cdot м \quad (4.5)$$

Значення робочої фазної напруги:

$$U_{1nf} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220, В \quad (4.6)$$

Номінальне значення струму статора:

$$I_{1n} = \frac{P_{2n}}{3 \cdot \eta \cdot U_{1n} \cdot \cos \varphi} = \frac{11000}{3 \cdot 0.875 \cdot 220 \cdot 0.87} = 21.8, А \quad (4.7)$$

Амплітуда потокозчеплення намагнічування (холостого ходу):

$$\psi_{1xx} = \frac{U_H}{U_{0n}} = \frac{380}{314} = 1.2, B\delta \quad (4.8)$$

4.3 Перерахунок параметрів з Г - подібної схеми заміщення в Т - подібну

Модель двигуна на основі Г - подібної схеми заміщення (рис. 4.1) може бути приведена до Т - подібної структури (рис.4.2) [2,15,16,27].

Для зворотного перерахунку параметрів із Г - подібної схеми ми перетворимо в Т - подібну.

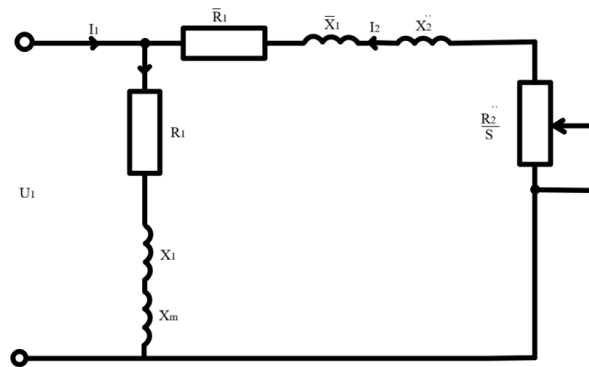


Рисунок 4.1 - Г - подібна схема заміщення асинхронного двигуна

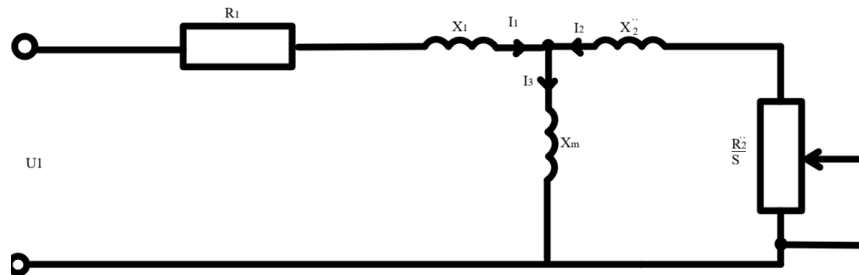


Рисунок 4.2 - Т - подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Коефіцієнт перерахунку:

$$C_1 = \frac{X_m + \sqrt{X_m^2 + 4X_m \cdot X_1'}}{2 \cdot X_m} = \frac{3.2 + \sqrt{3.2^2 + 4 \cdot 3.2 \cdot 0.085}}{2 \cdot 3.2} = 1.025 \quad (4.9)$$

Відносні параметри Т - подібної схеми:

$$\bar{X}_1 = \frac{X_1'}{C_1} = \frac{0.085}{1.025} = 0.082 \quad (4.10)$$

$$\bar{R}_1 = \frac{R_1'}{C_1} = \frac{0.043}{1.025} = 0.041 \quad (4.11)$$

$$\bar{X}_2 = \frac{X_2''}{C_1^2} = \frac{0.13}{1.025^2} = 0.12 \quad (4.12)$$

$$\bar{R}_2 = \frac{R_2''}{C_1^2} = \frac{0.032}{1.025^2} = 0.030 \quad (4.13)$$

Показники Т - подібної схеми у фізичних одиницях вимірювання:

$$X_1 = \bar{X}_1 \cdot \frac{U_{1\text{нф}}}{I_{1\text{н}}} = 0.082 \cdot \frac{220}{21.8} = 0.82, \text{Ом} \quad (4.14)$$

$$R_1 = \bar{R}_1 \cdot \frac{U_{1\text{нф}}}{I_{1\text{н}}} = 0.041 \cdot \frac{220}{21.8} = 0.41, \text{Ом} \quad (4.15)$$

$$X_2 = \bar{X}_2 \cdot \frac{U_{1\text{нф}}}{I_{1\text{н}}} = 0.12 \cdot \frac{220}{21.8} = 1.21, \text{Ом} \quad (4.16)$$

$$R_2 = \bar{R}_2 \cdot \frac{U_{1\text{нф}}}{I_{1\text{н}}} = 0.030 \cdot \frac{220}{21.8} = 0.3, \text{Ом} \quad (4.17)$$

$$X_m = \bar{X}_m \cdot \frac{U_{1\text{нф}}}{I_{1\text{н}}} = 3.2 \cdot \frac{220}{21.8} = 32.3, \text{Ом} \quad (4.18)$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{\omega_0} = \frac{0.82}{314} = 0.003, \text{Гн} \quad (4.19)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{X_2}{\omega_0} = \frac{1.21}{314} = 0.004, \text{Гн}$$

Індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{X_m}{\omega_0} = \frac{32.3}{314} = 0.103, \Gamma_H \quad (4.20)$$

Індуктивності статора і ротора:

$$\begin{aligned} L_1 &= L_{1\sigma} + L_m = 0.003 + 0.103 = 0.106, \Gamma_H \\ L_2 &= L_{2\sigma} + L_m = 0.004 + 0.103 = 0.107, \Gamma_H \end{aligned} \quad (4.21)$$

Обчислення значень параметрів: $\alpha, \alpha_1, \beta, \beta_1, \gamma, \gamma_1, \gamma_2, \sigma, \sigma_1$

$$\alpha = \frac{R'_2}{L_2} = \frac{0.52}{0.176} = 0.09 \text{ Ом} / \Gamma_H,$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0.71}{0.174} = 4 \text{ Ом} / \Gamma_H,$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right) = 0.174 \cdot \left(1 - \frac{(0.17)^2}{0.174 \cdot 0.176} \right) = 0.0097 \Gamma_H,$$

$$\sigma_1 = L_2 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right) = 0.176 \cdot \left(1 - \frac{(0.17)^2}{0.174 \cdot 0.176} \right) = 0.0099 \Gamma_H,$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{0.17}{0.176 \cdot 0.0097} = 99.5 \quad (4.20)$$

$$\beta_1 = \frac{L_m}{L_1 \cdot \sigma_1} = \frac{0.17}{0.174 \cdot 0.0099} = 98.6$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta = \frac{0.71}{0.0097} + 0.09 \cdot 0.17 \cdot 99.5 = 74.7 \text{ Ом} / \Gamma_H,$$

$$\gamma_1 = \frac{R'_2}{\sigma_1} + \alpha_1 \cdot L_m \cdot \beta_1 = \frac{0.52}{0.0099} + 4 \cdot 0.17 \cdot 98.6 = 119.5 \text{ Ом} / \Gamma_H.$$

Узагальнені результати розрахунку параметрів двигуна подано в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 - Параметри двигуна 4А132М4У3

$P_{2H}, \text{кВт}$	11	$R_1, \text{Ом}$	0.41
$\omega_{xx}, \text{рад/с}$	157	$R_2, \text{Ом}$	0.3
$\omega_H, \text{рад/с}$	152.6	$L_1, \text{Гн}$	0.106
$M_H, \text{Нм}$	72	$L_2, \text{Гн}$	0.107
$M_K, \text{Нм}$	158.4	$L_m, \text{Гн}$	0.103
λ	2.2	$\alpha_1, \text{Ом/Гн}$	4
$I_{\text{ном}}, \text{А}$	21.8	$\alpha, \text{Ом/Гн}$	0.09
$\psi_{1xx}, \text{Вб}$	1.2	$\beta, 1/\text{Гн}$	99.5
η	0,875	$\gamma, \text{Ом/Гн}$	74.7
$\cos \varphi$	0,87	$\sigma, \text{Гн}$	0.0097

4.4 Кінематичний розрахунок

Метою кінематичного розрахунку кривошипного преса є визначення загального передавального відношення від валу електродвигуна до кривошипного механізму преса; розподіл загального передавального відношення між окремими елементами приводу, що входять до складу кінематичного ланцюга; визначення конструктивних параметрів пасової передачі та механізму приводу преса; визначення частот обертання валів електроприводу та елементів кінематичного ланцюга, а також розрахунок приведенного моменту інерції системи електроприводу кривошипного преса.

Загальне передавальне число приводу знаходимо за формулою:

$$i = \frac{n_{d.ном}}{n_6},$$

де $n_6 = 50$ - частота обертання кривошипного вала преса, об/хв.

$$i = \frac{1460}{50} = 30$$

Згідно з технічним завданням виконаємо розрахунок сумарного моменту інерції електроприводу кривошипного преса, який включає момент інерції ротора електродвигуна та приведений момент інерції механічної частини преса.

Сумарний момент інерції визначається за виразом:

$$J_{\Sigma} = J_M = \frac{m}{2} R^2 = \frac{750}{2} \cdot 0.71^2 = 189 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J'_{\Sigma} = J_d + \frac{J_{\Sigma}}{i^2} = 0.038 + \frac{189}{30^2} = 0.248 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі було виконано розрахунок параметрів елементів електроприводу кривошипного преса на базі асинхронного електродвигуна АВВ М3АА 132М - 4. У результаті проведених досліджень та розрахунків отримано такі результати:

1. Обґрунтовано використання Т-подібної схеми заміщення, приведеної до сторони статора, для математичного опису електроприводу кривошипного преса.

2. Визначено основні номінальні параметри електродвигуна 4А132М4У3, зокрема:

- номінальну потужність;
- номінальну та синхронну швидкість обертання;
- номінальний і критичний моменти;
- коефіцієнт потужності;
- коефіцієнт корисної дії;
- перевантажувальну здатність двигуна.

3.Виконано розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна, а саме:

- активного опору статора;
- активного опору ротора;
- індуктивностей статора та ротора;
- індуктивності кола намагнічування.

4.Розраховано допоміжні коефіцієнти математичної моделі, які необхідні для формування системи диференціальних рівнянь асинхронного електроприводу.

5.Сформовано повний набір параметрів математичної моделі системи ПЧ - АД, що дозволяє виконати комп'ютерне моделювання електроприводу кривошипного преса у середовищах MATLAB/Simulink.

6.В результаті у четвертому розділі було сформовано математичну основу для подальшого синтезу системи автоматичного керування та дослідження динамічних режимів роботи електроприводу кривошипного преса.

5 ПРИНЦИП ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ І МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ПЧ-АД

5.1 Частотне керування в системі ПЧ – АД [15-29]

Частотне регулювання швидкості асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором є найбільш перспективним, оскільки дозволяє отримати всі необхідні для технології виробництва механічні характеристики в широкому діапазоні зміни швидкості і моменту при невеликих затратах електроенергії на перетворення та керування.

При частотному регулюванні швидкості асинхронного двигуна необхідно змінювати частоту f_1 і напругу U_1 живлення таким чином, щоб запобігти насиченню магнітної системи і забезпечити необхідну перевантажувальну здатність двигуна [15-29].

Загальний аналіз процесів у асинхронному електродвигуні дозволяє зробити висновок про те, що для забезпечення працездатності привода при частотному керуванні необхідно забезпечувати функціональний зв'язок між каналами керування напругою і частотою живлення статора.

Якщо магнітне коло машини не насичене і активним опором статора можна знехтувати, то АД в цьому випадку буде працювати при практично постійному коефіцієнті потужності, запасі статичної стійкості і абсолютному ковзанні.

Відомо, що момент АД залежить від квадрата магнітного потоку. Тоді співвідношення моментів при двох різних потоках буде відповідати пропорції:

$$\frac{M_1}{M_2} \sim \frac{\Phi_1^2}{\Phi_2^2} \quad (5.1)$$

Магнітний потік двигуна, при знехтуванні спадом напруги в обмотці статора, визначається наступним виразом:

$$\Phi = U_1 / (4,44 \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot f_1) \quad (5.2)$$

де f_1 , U_1 - частота і напруга живлення обмотки статора;

w_1 - кількість витків обмотки статора;

k_{w1} - обмотковий коефіцієнт.

Відношення напруг статора для двох різних частот f_{11} та f_{12} буде дорівнювати:

$$\frac{U_{11}}{U_{12}} = \frac{\Phi_1 f_{11}}{\Phi_2 f_{12}} \quad (5.3)$$

Підставляючи (5.1) в (5.3), одержимо загальний закон, сформульований Костенко М.П., який забезпечує необхідні умови роботи двигуна:

$$\frac{U_{11}}{U_{12}} = \frac{f_{11}}{f_{12}} \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} \quad (5.4)$$

Вираз (5.4) можна трактувати наступним чином: для забезпечення раціонального режиму роботи асинхронного двигуна при всіх значеннях частоти і навантаження, необхідно змінювати напругу пропорційно добутку відносної частоти на корінь квадратний з відносного моменту.

Сутністю закону Костенко, який можна застосовувати як у розімкнутих, так і у замкнутих системах керування, є зміна напруги (магнітного потоку) АД як у функції частоти, так і навантаження. Якщо навантаження зменшується, то магнітний потік можна також зменшити, зменшивши напругу, але зберігши при цьому запас статичної стійкості.

Якщо поставити вимогу, щоб перевантажувальна здатність АД в процесі частотного регулювання залишалася постійною, то критичний момент також повинен залишатися постійним. Тоді вираз (5.4) прийме наступний вигляд:

$$\frac{U_{11}}{U_{12}} = \frac{f_{11}}{f_{12}}. \quad (5.5)$$

Згідно (5.5) частота змінюється пропорційно величині напруги. Це забезпечує стаке значення критичного моменту і незмінний номінальний магнітний потік при широкому діапазоні керування швидкості практично від нуля і до максимальної. Найчастіше в якості максимальної виступає номінальна швидкість, якій відповідає номінальна напруга статора. Підвищення напруги вище номінальної обмежується електричною міцністю ізоляції обмотки.

Сімейство штучних механічних характеристик, які мають паралельні робочі ділянки показано на рисунку 5.1.

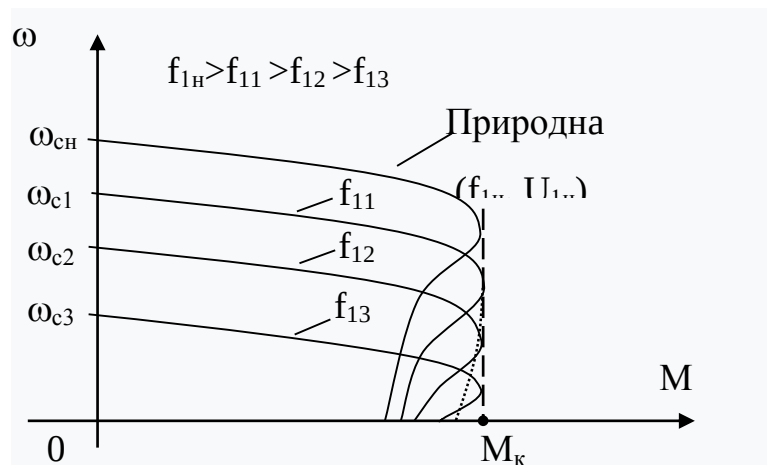


Рисунок 5.1 - Механічні характеристики при законі керування $U_1 / f_1 = \text{const}$

При низьких швидкостях спад напруги на активному опорі статора, яким нехтується при виводі закону керування, стає співставним з напругою живлення, що приводить до зменшення критичного моменту (лінія із крапок на рис. 5.1). Для виправлення цього недоліку на низьких швидкостях напругу потрібно зменшувати в меншій мірі, чим за законом (5.5) або за допомогою замкненої системи керування підтримувати незмінним співвідношення ЕРС статора та частоти, щоб не

змінювався магнітний потік. Крім того, при пуску двигуна, тобто при частоті, близькій до нульової, потрібне початкове значення напруги U_{10} для створення магнітного потоку і відповідно моменту двигуна. Для цього пуск починається з початкової частоти $f_{10} = 3 \dots 5$ Гц і відповідного значення початкової напруги U_{10} (див. рисунок 5.2). Значення U_{10} також може враховувати величину потрібного динамічного моменту для створення заданого прискорення електроприводу.

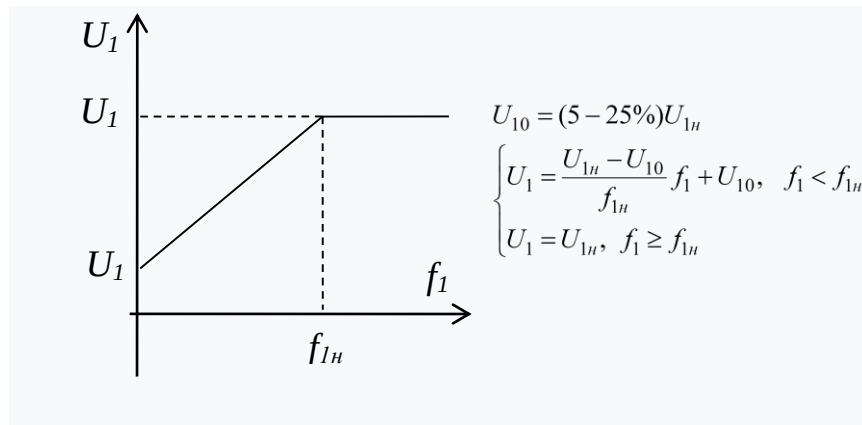


Рисунок 5.2. Формування початкових значень U_1 і f_1

Пристрій або частина програми, які формують в перетворювачі частоти залежність між U_1 і f_1 , називається функціональним перетворювачем (ФП).

Розглянутий спосіб частотного регулювання швидкості асинхронного двигуна є основним і називається “керування в першій зоні з постійним моментом двигуна”. Його перевагою є плавна зміна швидкості від нуля до максимальної (номінальної) при незмінній жорсткості механічної характеристики і перевантажувальної здатності двигуна. Діапазон регулювання становить $5 \dots 10$ для розімкнутих систем й 1000 і більше для замкнутих.

Перевагами частотного регулювання є великий діапазон зміни швидкості, обмеження величини пускових струмів, забезпечення плавності регулювання, можливість застосування замкненого керування до асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором з метою підвищення якості статичних і динамічних режимів.

Перетворювальними пристроями, за допомогою яких змінюється амплітуда і частота напруги живлення в асинхронному електроприводі є перетворювачі частоти (ПЧ), які поділяються на такі види:

1. ПЧ з проміжною ланкою постійного струму;
2. ПЧ з широтно - імпульсною модуляцією;
3. ПЧ з безпосереднім зв'язком з мережею.

Розглянемо докладніше принципи технічної реалізації, системи ПЧ - АД.

На рисунку 5.6 наведена функціональна схема системи ПЧ - АД з широтно - імпульсною модуляцією для електроприводу кривошипного преса.

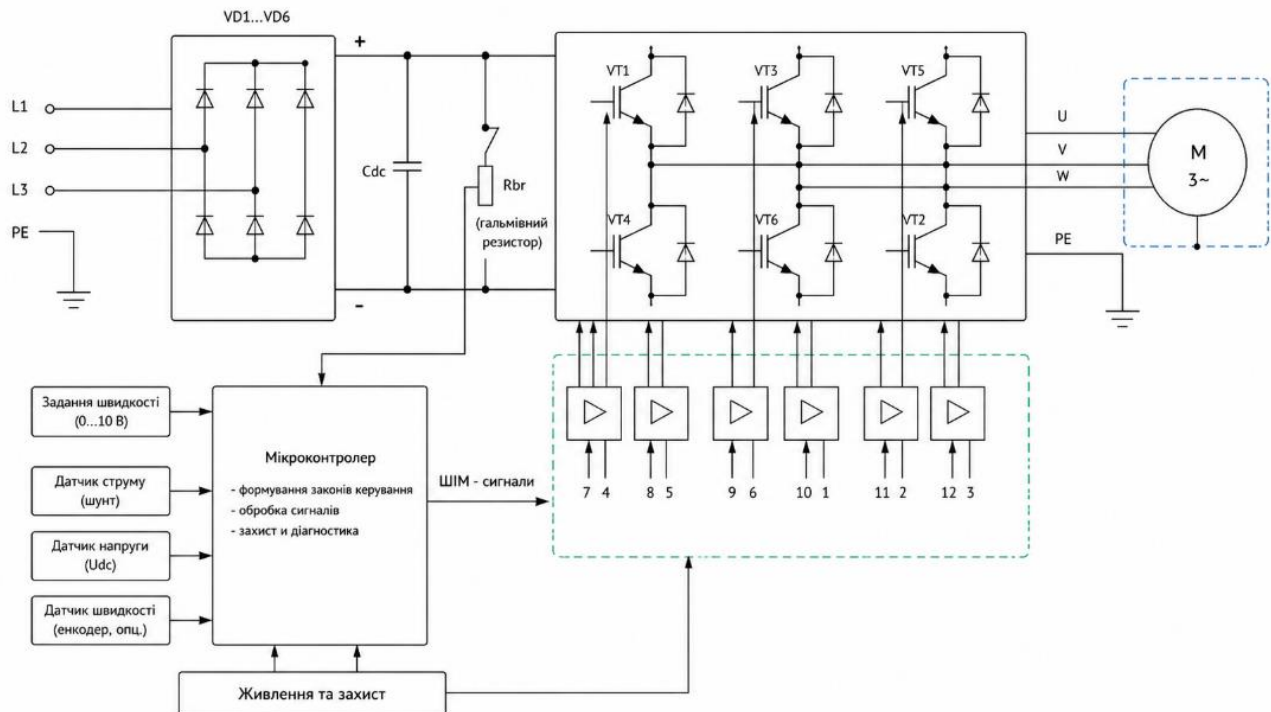


Рисунок 5.3 - Функціональна схема системи ПЧ - АД

Під час пуску двигуна частотний перетворювач одночасно змінює частоту f_1 та напругу U_1 , що подається на обмотки статора. При малих частотах значний вплив має активний опір обмоток двигуна, тому для забезпечення необхідного пускового моменту до напруги додається початкове значення U^{10} , яке становить приблизно 5–25 % від номінальної напруги $U_{1н}$.

У діапазоні від нуля до номінальної частоти $f_{1н}$ напруга збільшується пропорційно частоті за лінійним законом. Це дозволяє підтримувати магнітний потік двигуна практично сталим і забезпечувати роботу приводу в режимі сталого моменту.

Після досягнення номінальної частоти $f_{1н}$ напруга досягає номінального значення $U_{1н}$ і надалі залишається незмінною. Подальше збільшення частоти можливе лише за сталої напруги, тому двигун переходить у режим сталої потужності, а його момент поступово зменшується.

Для електроприводу кривошипного преса JL21 - 110 такий закон керування забезпечує плавний пуск, зменшення пускових струмів, стабільну роботу двигуна АВВ МЗАА 132М - 4 та зниження механічних навантажень на елементи приводу.

5.2 Математична модель системи ПЧ - АД

При уточненому дослідженні динаміки системи автоматичного керування використовується двофазна модель асинхронного двигуна в координатах статора а-б.

Динамічна модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором має вигляд [15-29]:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot p_n \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot (\psi_{2a} \cdot i_{1b} - \psi_{2b} \cdot i_{1a}) - M_c \right]; \quad (5.22)$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{1a}}{dt} &= -\frac{R_1}{\sigma} \cdot i_{1a} - \alpha \cdot \beta \cdot L_m \cdot i_{1a} + \alpha \cdot \beta \cdot \psi_{2a} + \beta \cdot \omega \cdot p_n \cdot \psi_{2b} + \frac{U_{1a}}{\sigma}; \\ \frac{di_{1b}}{dt} &= -\frac{R_1}{\sigma} \cdot i_{1b} - \alpha \cdot \beta \cdot L_m \cdot i_{1b} + \alpha \cdot \beta \cdot \psi_{2b} - \beta \cdot \omega \cdot p_n \cdot \psi_{2a} + \frac{U_{1b}}{\sigma}; \end{aligned} \quad (5.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{2a}}{dt} &= -\alpha \cdot \psi_{2a} - \omega \cdot p_n \cdot \psi_{2b} + \alpha \cdot L_m \cdot i_{1a}; \\ \frac{d\psi_{2b}}{dt} &= -\alpha \cdot \psi_{2b} + \omega \cdot p_n \cdot \psi_{2a} + \alpha \cdot L_m \cdot i_{1b}; \end{aligned} \quad (5.24)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{R_2}{L_2}, \beta = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_2}, \sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}, L_1 = L_m + L_{1\sigma}, L_2 = L_m + L_{2\sigma}. \quad (5.25)$$

У рівняннях позначені:

ω - кутова швидкість;

i_{1a}, i_{1b} - компоненти вектора струму статора;

ψ_{2a}, ψ_{2b} - компоненти вектора потокозчеплення ротора;

U_{1a}, U_{1b} - компоненти вектора напруги статора;

M_c - момент навантаження;

R_1, R_2 - активні опори статора і ротора;

L_1, L_2 - індуктивності статора і ротора;

L_m - індуктивність намагнічуючого контуру;

$L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ - індуктивності розсіювання статора і ротора;

p_n - число пар полюсів;

$$M = \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot (\psi_{2a} \cdot i_{1b} - \psi_{2b} \cdot i_{1a}) - \text{електромагнітний момент, що}$$

створюється двигуном.

При ШІМ вихідна напруга інвертора формується аналогічно схемам з міжфазовою комутацією шляхом дотримання певної послідовності роботи силових ключів. Але, при цьому, під час своєї роботи кожен ключ комутується з певною сталою частотою модуляції. Змінюючи шпаруватість імпульсів можна регулювати середнє значення амплітуди вихідної напруги інвертора при незмінній напрузі на вході АІ, а змінюючи частоту перемикання ключів – частоту вихідної напруги.

Структурна схема системи частотного керування на основі двофазної моделі АД показана на рисунку 5.7.

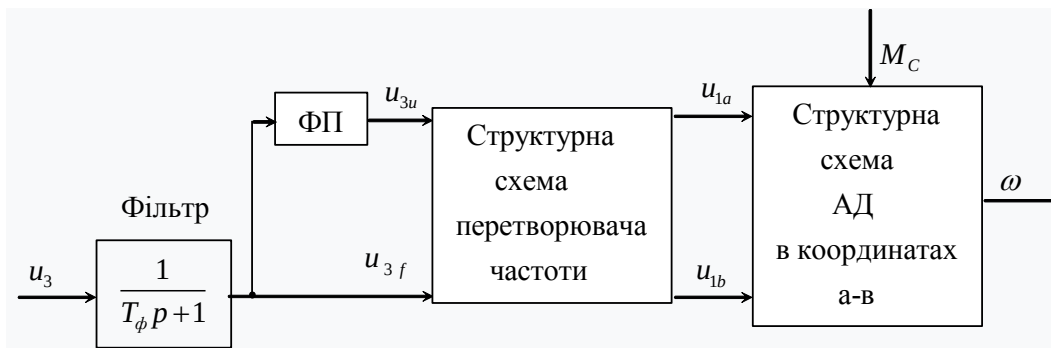


Рисунок 5.4 - Структурна схема частотного керування на основі двофазної моделі АД

Для забезпечення плавності пуску використовують аперіодичний фільтр (T_ϕ - стала часу фільтра). При моделюванні необхідно обмежувати величини u_{3u} і u_{3f} на рівні ± 10 В.

Висновки до розділу 5

1. Проведено аналіз принципів побудови частотно-регульованого асинхронного електроприводу кривошипного преса JL21 - 110 та обґрунтовано застосування системи ПЧ - АД для забезпечення регулювання швидкості.

2. Розглянуто структуру системи ПЧ-АД, до складу якої входять частотний перетворювач ABB ACS580 - 01 та асинхронний двигун ABB M3AA 132M - 4. Визначено основні принципи взаємодії елементів електроприводу та їх функції у процесі керування механізмом преса.

3. Побудовано функціональну схему електроприводу, яка відображає процес перетворення електричної енергії та передачі механічної енергії до робочого механізму кривошипного преса.

4. Розглянуто математичний опис асинхронного двигуна на основі двофазної моделі в системі координат а-в. Отримано систему рівнянь, яка дозволяє описувати

електромагнітні та механічні процеси, що відбуваються під час роботи електроприводу.

5. Проаналізовано принцип формування вихідної напруги частотного перетворювача за допомогою широтно-імпульсної модуляції, що забезпечує регулювання частоти та амплітуди живлячої напруги двигуна.

6. Розглянуто скалярний закон частотного керування $U/f = \text{const}$, який забезпечує підтримання магнітного потоку асинхронного двигуна практично сталим у всьому робочому діапазоні частот та дозволяє реалізувати стабільне регулювання швидкості.

7. Побудовано структурну схему частотного керування на основі двофазної моделі асинхронного двигуна, яка стала основою для подальшого створення комп'ютерної моделі електроприводу в середовищі MATLAB/Simulink.

8. Отримані результати підтверджують можливість використання розробленої математичної моделі для дослідження статичних і динамічних режимів роботи електроприводу кривошипного преса, що буде виконано у наступному розділі роботи.

6 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

6.1 Побудова моделі системи ПЧ - АД у MATLAB/Simulink

Для дослідження роботи електроприводу використовується середовище MATLAB/Simulink та бібліотека Simscape Electrical, яка дозволяє моделювати електромеханічні системи різного рівня складності (див. рисунки 6.1, 6.2, 6.3) [30-35].

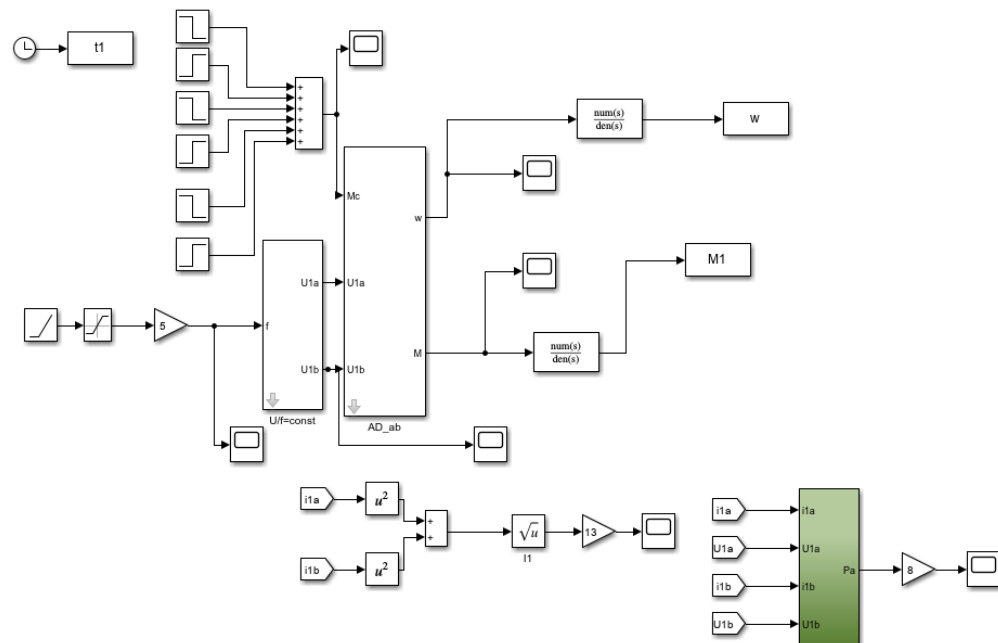


Рисунок 6.1 - Модель Simulink

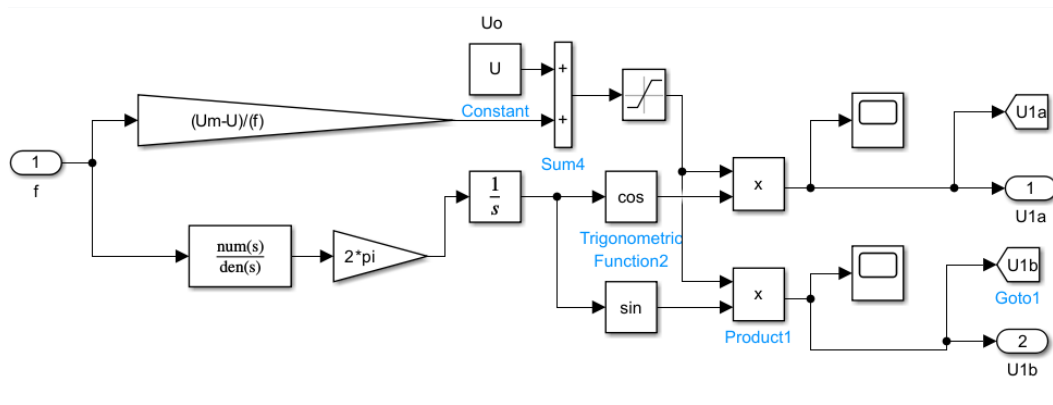


Рисунок 6.2 - Розкрита модель ПЧ

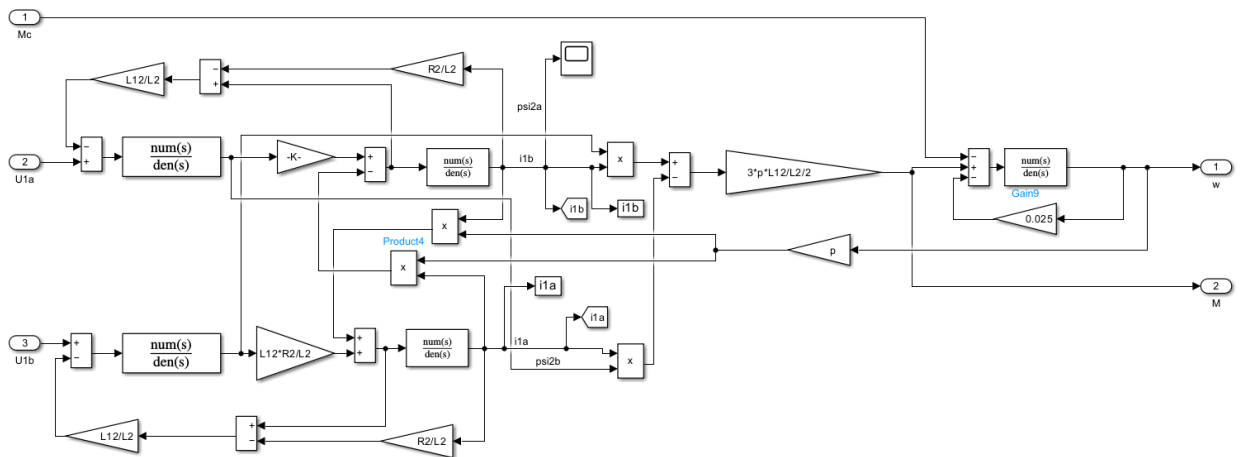


Рисунок 6.3 - Розкрита модель АД

Структурна модель системи складається з наступних компонентів:

- джерела живлення;
- частотного перетворювача;
- асинхронного двигуна;
- механічного навантаження;
- вимірювальних блоків.

У моделі використовуються параметри аналога асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу АВВ М3АА 132М - 4 (див. табл. 4.1, 4.2).

Застосовано базовий скалярний принцип регулювання $U/f=\text{const}$. Даний закон керування забезпечує підтримання магнітного потоку двигуна практично сталим

при зміні частоти живлення. Завдяки цьому забезпечується стабільний електромагнітний момент у робочому діапазоні швидкостей.

Система моделювання враховує:

- інерційність електроприводу;
- зміну моменту навантаження;
- електромагнітні процеси двигуна;
- динаміку механічної частини;
- перехідні режими роботи.

Механічне навантаження у моделі реалізовано у вигляді ступінчастого змінного моменту з інтервалом 1 с, що імітує циклічний характер роботи кривошипного преса. У момент робочого ходу навантаження різко збільшується, що дозволяє оцінити реакцію системи ПЧ-АД на короточасні перевантаження [17-23].

У моделі також враховується вплив моменту інерції маховика. Це дозволяє дослідити:

- процес накопичення енергії;
- процес віддачі енергії;
- зміну швидкості під час робочого циклу;
- компенсацію пікових навантажень.

Під час роботи системи частотний перетворювач формує трифазну напругу змінної частоти, яка подається на статор асинхронного двигуна. Регулювання частоти дозволяє змінювати швидкість обертання двигуна відповідно до режиму роботи преса. Під час проведення моделювання додатково було виконано дослідження впливу сталої механічного часу системи T_m (за рахунок зміни моменту інерції маховика) на динамічні характеристики електроприводу. У процесі аналізу використовувались значення некомпенсованої сталої часу перетворювача $T_u = 0.01$ с.

Для аналізу роботи електроприводу використовуються блоки вимірювання, які дозволяють отримати графіки кутової швидкості ротора, електромагнітного

моменту, напруги статора, потокозчеплення та механічної потужності двигуна. Дослідження зазначених параметрів дає можливість оцінити характер перехідних процесів під час пуску, розгону та виходу системи на усталений режим роботи. Крім того, аналіз отриманих залежностей дозволяє визначити вплив механічної сталої часу на динамічні характеристики електроприводу та оцінити його роботу при змінному навантаженні, характерному для кривошипного преса.

Графіки перехідних процесів представлені на рисунках 6.4 - 6.9.

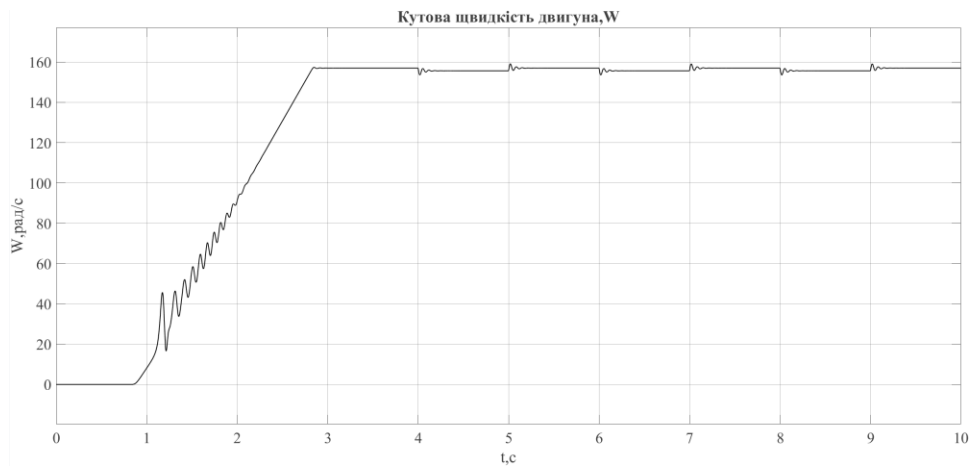


Рисунок 6.4 - Графік перехідного процесу кутової швидкості двигуна

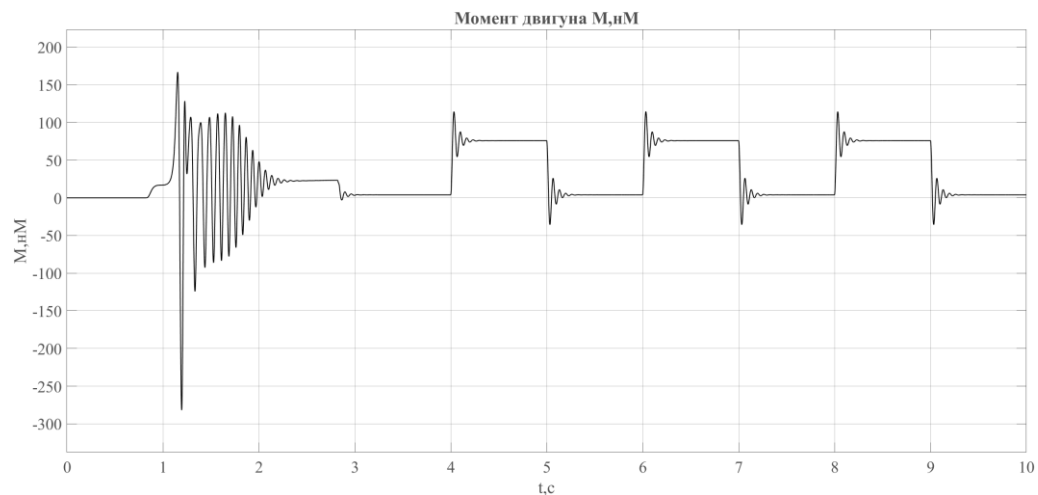


Рисунок 6.5 - Графік перехідного процесу моменту двигуна

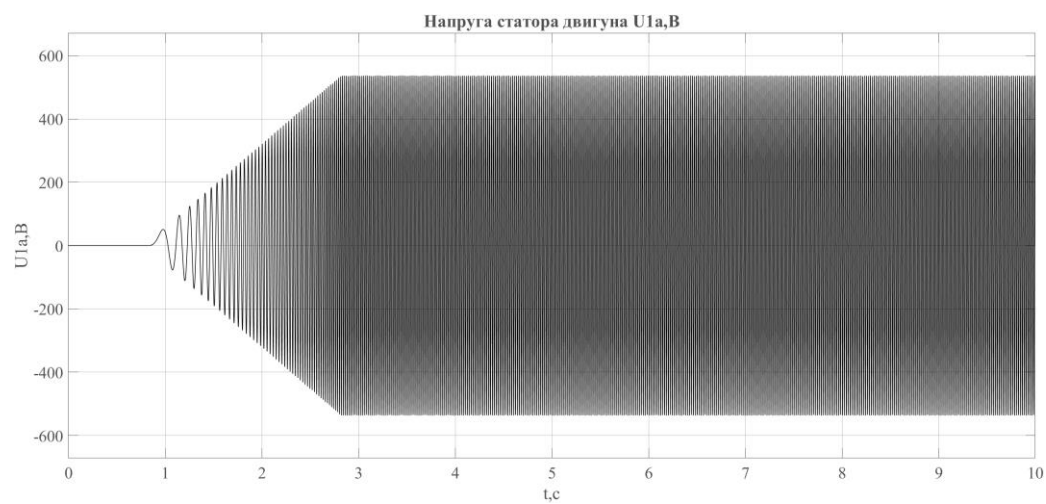


Рисунок 6.6 - Графік перехідного процесу напруги статора двигуна

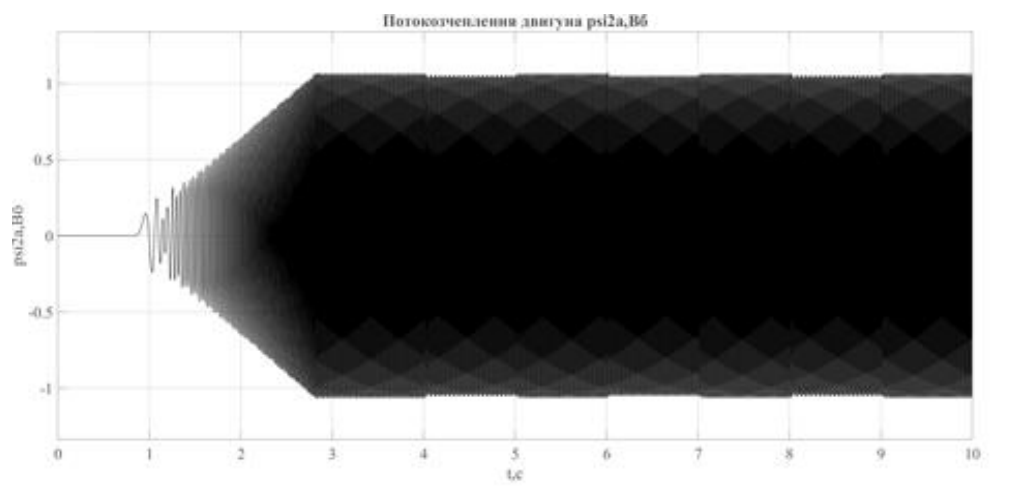


Рисунок 6.7 - Графік перехідного процесу потокозчеплення двигуна

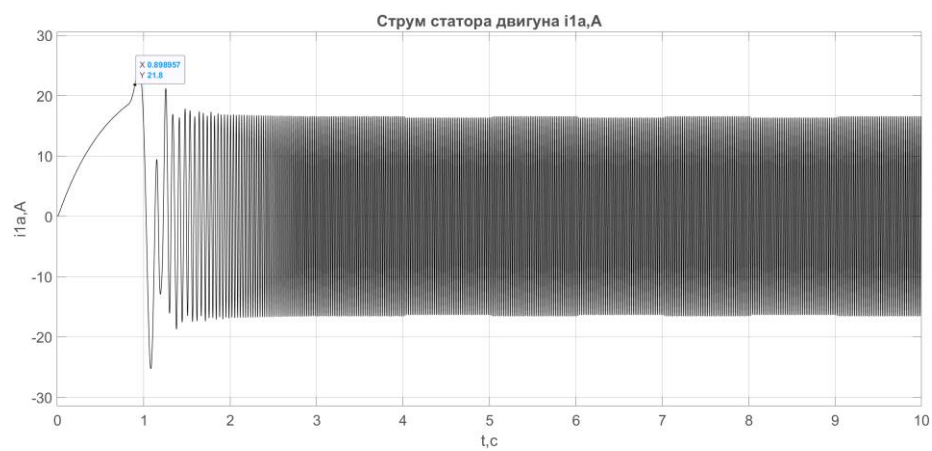


Рисунок 6.8 - Графік перехідного процесу струму статора двигуна

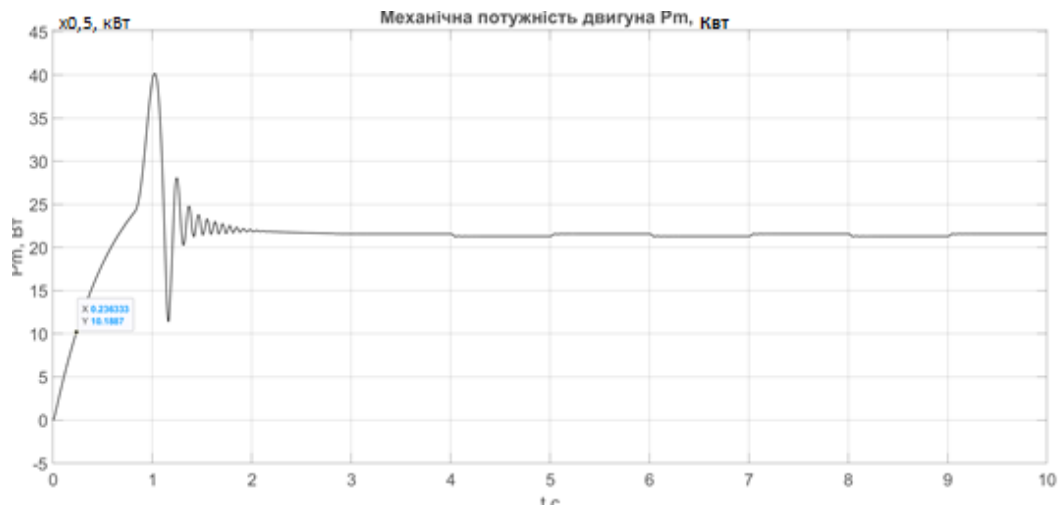


Рисунок 6.9 - Графік перехідного процесу механічної потужності привода

Побудована модель дозволяє наблизити умови моделювання до реальної роботи пресового обладнання та отримати достовірні результати дослідження.

6.3 Аналіз результатів моделювання

За результатами моделювання системи ПЧ - АД було проведено дослідження основних електромеханічних процесів, які виникають під час пуску та роботи електроприводу кривошипного преса JL21 - 110 [7,5,17-19,20-23].

Аналіз графіка кутової швидкості двигуна показує, що після подачі керуючого сигналу швидкість поступово зростає та виходить на усталене значення без значних коливань. Отриманий характер перехідного процесу свідчить про достатню стійкість системи та відсутність коливальних режимів.

Графік електромагнітного моменту демонструє формування пускового моменту, необхідного для розгону двигуна та подолання моменту навантаження. У процесі виходу на усталений режим значення моменту зменшується та стабілізується відповідно до механічного навантаження на валу двигуна.

Аналіз напруги статора підтверджує реалізацію закону частотного керування $U/f=\text{const}$. Під час зміни частоти живлення відбувається відповідна зміна напруги, що забезпечує підтримання магнітного потоку двигуна практично сталим у всьому робочому діапазоні.

З графіка потокозчеплення видно, що після завершення перехідного процесу значення магнітного потоку стабілізується та підтримується на необхідному рівні. Це підтверджує правильність вибору скалярного закону керування для досліджуваної системи електроприводу.

Графік механічної потужності показує зміну енергетичних показників двигуна під час розгону та переходу до усталеного режиму. Максимальні значення потужності спостерігаються в період інтенсивного прискорення, після чого потужність стабілізується відповідно до навантаження механізму преса.

Додатково було проведено дослідження впливу механічної сталої часу T_m на динамічні характеристики системи. Встановлено, що зі зменшенням значення T_m скорочується тривалість перехідного процесу та підвищується швидкодія електроприводу. Збільшення T_m навпаки, забезпечує більш плавний характер зміни швидкості та моменту, проте збільшує час виходу системи на усталений режим.

Отримані результати підтверджують працездатність розробленої моделі системи ПЧ - АД та можливість її використання для дослідження режимів роботи електроприводу кривошипного преса JL21 - 110.

Також були проведені дослідження роботи електроприводу при частоті 25 Гц з існуючим маховиком та на номінальній частоті 50 Гц зі збільшеним маховиком. Результати представлені в Додатку Б.

Висновки до розділу 6

1. У шостому розділі було виконано моделювання системи частотно-регульованого асинхронного електроприводу кривошипного преса JL21 - 110 у середовищі MATLAB/Simulink.

2. Побудовано структурну модель системи ПЧ - АД, до складу якої входять трифазне джерело живлення, частотний перетворювач АВВ ACS580 - 01, асинхронний двигун АВВ М3АА 132М - 4 та механічне навантаження преса.

3. Для дослідження електроприводу використано двофазну нелінійну математичну модель АД, яка описує електромеханічні процеси під час розгону та гальмування двигуна.

4. Виконано розрахунок основних параметрів електроприводу, зокрема номінальної кутової швидкості та електромагнітного моменту двигуна.

5. У моделі реалізовано скалярний закон частотного керування ($U/f = \text{const}$), що дозволяє підтримувати магнітний потік двигуна сталим у процесі регулювання швидкості.

6. За результатами моделювання встановлено, що система забезпечує плавний пуск двигуна, зниження пускових струмів та стабільну роботу електроприводу при змінному навантаженні.

7. У процесі моделювання було досліджено вплив моменту інерції маховика на перехідні процеси робочого циклу. Встановлено, що, з одного боку, зменшення моменту інерції забезпечує підвищення швидкодії електроприводу, але, з іншого боку, збільшення моменту інерції сприяє більш плавному протіканню перехідних процесів та зниженню динамічних навантажень на механічну систему преса.

8. Проведене моделювання підтвердило ефективність застосування системи ПЧ - АД для електроприводу кривошипного преса та відповідність розробленої системи сучасним вимогам енергоефективності та надійності.

7 АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КРИВОШИПНОГО ПРЕСУ

7.1 Загальна характеристика системи автоматизації

Автоматизація кривошипного преса JL21 - 110 спрямована на підвищення продуктивності, надійності та безпеки штампувального процесу. Головними завданнями є стабілізація роботи обладнання, автоматизація подачі заготовок і мінімізація впливу людського фактора на виробництво [20,35-41].

У цій роботі для керування приводом преса застосовано систему частотно-регульованого електроприводу, до складу якої входить перетворювач частоти ABB ACS580 - 01 та асинхронний двигун ABB M3AA 132M - 4 потужністю 11 кВт. Використання частотного перетворювача дозволяє забезпечити плавний пуск двигуна, знизити пускові струми, оптимізувати енергетичні показники та підвищити загальну надійність обладнання.

Особливістю роботи кривошипного преса є циклічність навантаження, за якої максимальний момент на валу двигуна припадає на фазу робочого ходу повзуна. Відтак, система керування має гарантувати стабільну роботу електроприводу в умовах змінного навантаження та під час виконання повторюваних технологічних циклів.

Для підвищення ефективності преса система передбачає автоматизовану подачу заготовок (металевої смуги), контроль наявності матеріалу та рівня його натягу, а також систему захисту оператора за допомогою світлової завіси безпеки. Застосування цих технічних рішень дозволяє автоматизувати роботу пресового обладнання та забезпечити належні.

7.2 Автоматизація роботи кривошипного преса

Автоматизація кривошипного преса JL21 - 110 забезпечується інтеграцією системи автоматичної подачі заготовок та комплексу засобів безпеки. Процес

функціонує циклічно і базується на послідовному виконанні етапів подачі, підготовки та штампування матеріалу [5,7,20,42].

До складу системи входять розмотувач, правильний пристрій, механізм натягу стрічки, серво-подавач, кривошипний прес та світлова завіса. Координація роботи обладнання здійснюється за допомогою датчиків положення та централізованої системи керування (див. рисунки. 7.1, 7.2).

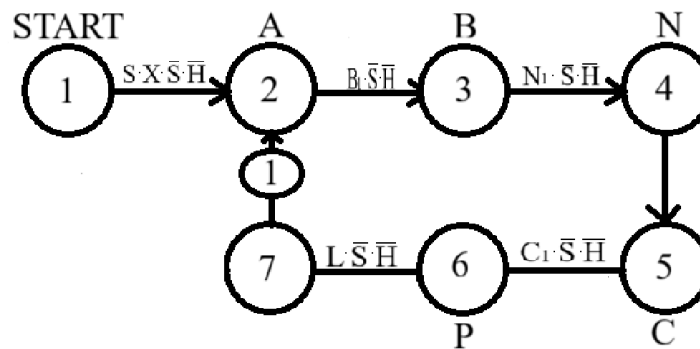


Рисунок 7.1 - Графоперехід системи автоматизованої подачі заготовок

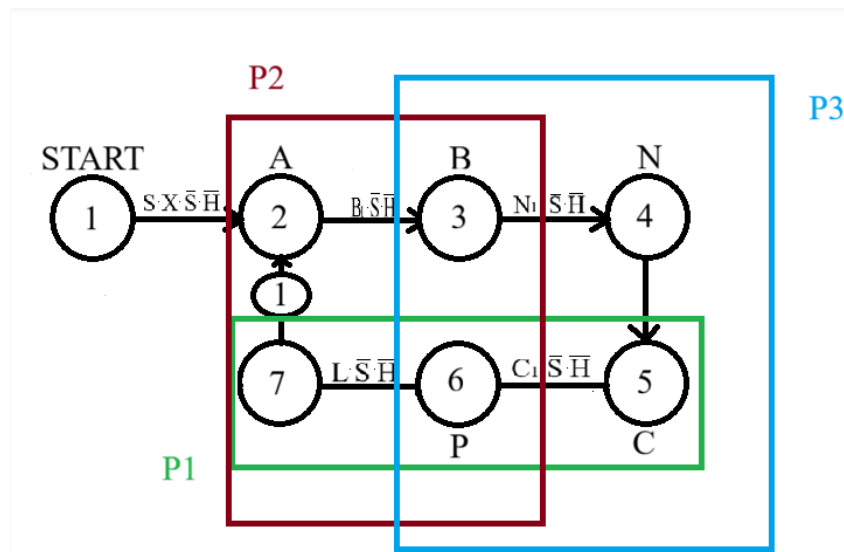


Рисунок 7.2 - Графоперехід системи автоматизованої подачі заготовок на RS-тригерах

Структура логіки роботи

$$\begin{aligned}
 Sp_1 &= C_1 \cdot \overline{S} \cdot \overline{H} \cdot p_3 \cdot \overline{p_2} \\
 Sp_2 &= S_1 \cdot X \cdot \overline{S} \cdot \overline{H} \cdot \overline{p_1} \cdot \overline{p_3} + P_1 \cdot \overline{S} \cdot \overline{H} \cdot p_1 \cdot p_2 \\
 Sp_3 &= B_1 \cdot \overline{S} \cdot \overline{H} \cdot p_1 \cdot \overline{p_2} \\
 \\
 Rp_1 &= 1 \cdot \overline{p_3} \cdot p_2 \\
 Rp_2 &= N_1 \cdot \overline{S} \cdot \overline{H} \cdot \overline{p_1} \cdot p_2 \\
 Rp_3 &= L \cdot \overline{S} \cdot \overline{H} \cdot p_2 \cdot p_1 \\
 \\
 A &= \overline{p_1} \cdot p_2 \cdot \overline{p_3} \\
 B &= \overline{p_1} \cdot p_2 \cdot p_3 \\
 N &= \overline{p_1} \cdot \overline{p_2} \cdot p_3 \\
 C &= p_1 \cdot \overline{p_2} \cdot p_3 \\
 P &= p_1 \cdot p_2 \cdot p_3
 \end{aligned}$$

Після натискання кнопки «START» система перевіряє дотримання умов запуску:

1. Наявність заготовки в системі подачі;
2. Відсутність сигналу від кнопки «STOP»;
3. Відсутність перекриття світлового бар'єра завіси безпеки.

Після успішного проходження всіх перевірок запускається асинхронний двигун АВВ М3АА 132М - 4, що активує розмотувальний пристрій. Цей пристрій подає металеву стрічку до рихтувального апарата.

Коли стрічка проходить першу контрольну точку, спрацьовує датчик «В1», який ініціює ввімкнення рихтувального апарата. По завершенні рихтування активується датчик «N1», що подає команду на запуск механізму натягу.

Досягнення заданого рівня натягу фіксується датчиком «С1», сигнал від якого запускає роботу серво-подавача. Останній переміщує заготовку в робочу зону преса та забезпечує її прецизійне позиціонування.

Після завершення подачі датчик «Р1» подає сигнал готовності до штампування. Кривошипний прес виконує робочий цикл, завершуючи обробку заготовки. Після завершення штампування формується сигнал «L», що підтверджує закінчення технологічного циклу. Отримавши його, система повертається у вихідний стан і розпочинає новий цикл подачі заготовки.

Схема системи автоматизованої подачі заготовок показана на рисунку 7.2.

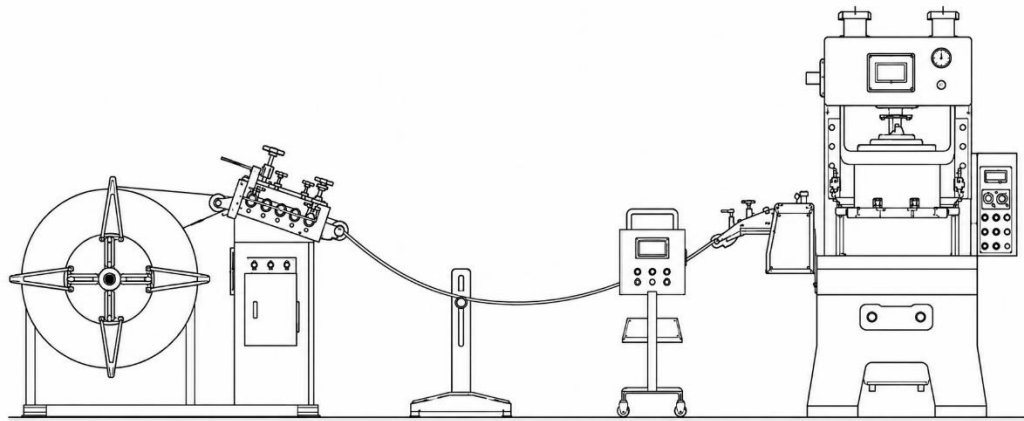


Рисунок 7.2 - Автоматизована подача заготовок

Для гарантування безпеки оператора застосовується світлова завіса (див. рисунок 7.3), що постійно контролює небезпечну зону преса. У разі перетину світлового бар'єра система миттєво блокує роботу обладнання та переводить прес у безпечний стан.

Впровадження автоматичної подачі заготовок у поєднанні зі світловою завісою дозволяє підвищити продуктивність, забезпечити стабільність технологічного процесу та мінімізувати ризик виникнення аварійних ситуацій.

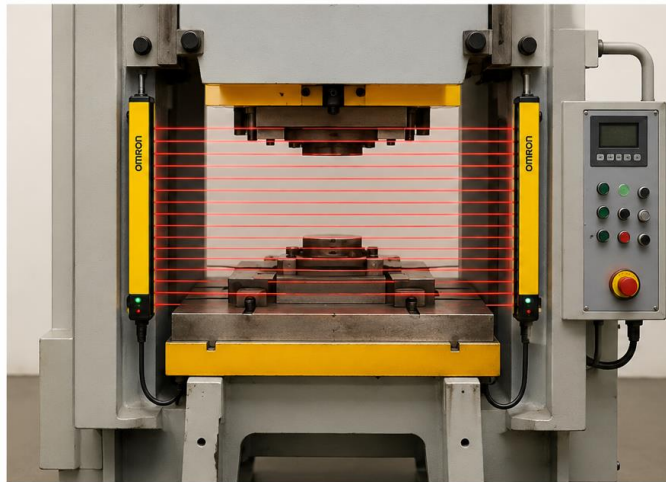


Рисунок 7.3 - Світлова завіса безпеки

Висновки до розділу 7

1. У даному розділі проаналізовано автоматизацію електроприводу кривошипного преса моделі JL21 - 110. Система базується на частотно-регульованому приводі типу ПЧ-АД із використанням перетворювача частоти ABB ACS580 - 01 та асинхронного двигуна ABB M3AA 132M - 4 потужністю 11 кВт.

2. З метою збільшення продуктивності преса розроблено алгоритм роботи системи автоматичної подачі заготовок. До її складу входять розмотувальний пристрій, рихтувальний апарат, механізм натягу стрічки та серво-подавач.

3. Створено алгоритм автоматизованого керування пресом, що забезпечує послідовне виконання етапів подачі, підготовки та штампування заготовки, а також автоматичне циклічне повторення процесу. Цей алгоритм передбачає, що запуск преса можливий лише за наявності заготовки, відсутності натиснення кнопки «STOP» та цілісності світлових бар'єрів.

4. З метою підвищення безпеки експлуатації пресового обладнання в систему інтегровано світлову завісу, що контролює доступ до небезпечної зони та блокує роботу преса у разі перетину світлового бар'єра.

5. Розробка графо-перехідної схеми алгоритму дала змогу чітко визначити послідовність роботи всіх вузлів системи та встановити логічні умови переходу між етапами технологічного циклу.

6. Запропонована система автоматизації сприяє підвищенню продуктивності праці, стабілізації технологічного процесу, мінімізації людського фактора та забезпечує високий рівень безпеки оператора під час роботи на кривошипному пресі JL21 - 110.

8 РОЗРОБКА СХЕМИ КЕРУВАННЯ ТА СИЛОВОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

8.1 Загальна структура системи керування

Система керування кривошипним пресом JL21 - 110 побудована на основі частотно - регульованого асинхронного електроприводу. Основною задачею системи є забезпечення стабільної та безпечної роботи пресового обладнання в автоматизованому режимі [5,7,18,20-22,25,28,36,40].

До складу системи входять:

- Автоматичний вимикач ABB S203 - C32.
- Контактор ABB AF38.
- Частотний перетворювач ABB ACS580 - 01.
- Гальмівний резистор.
- Асинхронний двигун ABB M3AA 132M - 4.
- Система подачі стрічкового матеріалу.
- Завіса безпеки.

Система забезпечує плавне регулювання швидкості електродвигуна, обмеження пускових струмів, захист обладнання від аварійних режимів роботи та підвищення енергоефективності виробництва.

8.2 Силова схема перетворювального пристрою

Живлення перетворювача здійснюється від трифазної мережі 380 В, 50 Гц через автоматичний вимикач QF1 та контактор KM1 на вхід частотного перетворювача ABB ACS580 - 01 (див. рисунок 8.1)

Відповідно до технічної документації ABB [11,12,13,14], підключення мережі виконується до клем L1, L2, L3, а підключення електродвигуна здійснюється через

вихідні клеми U, V, W (T1/U, T2/V, T3/W). Гальмівний резистор за необхідності підключається до клем R- та R+/UDC+(див. рисунок 8.1).



Рисунок 8.1 - Схема підключень електроприводу

Силовая схема забезпечує:

- Захист від коротких замикань та перевантажень;
- Дистанційне керування приводом;
- Плавний пуск та зупинку двигуна;
- Регулювання швидкості обертання;
- Можливість швидкого електродинамічного гальмування.

Для реалізації системи електроприводу обрано частотний перетворювач ABB ACS580 – 01 [12 - 14].

Таблиця 8.1 - Характеристики ПЧ

Параметр	Значення
Тип перетворювача	ABB ACS580-01-033A-4
Серія	ACS580
Виробник	ABB
ЕАН код	6438177459262

Параметр	Значення
Номинальна потужність	15 кВт
Підключення на вході	Трифазне
Напруга на вході	3×380 В
Підключення на виході	Трифазне
Напруга на виході	3×380 В
Максимальне перевантаження (1 хв)	150 %
Номинальний струм	32 А
Максимальна вихідна частота	500 Гц
Ступінь захисту	IP20
ЕМС-фільтр	Вбудований
Скалярний режим керування U/f	Є
Векторне керування без енкодера	Є
Векторне керування з енкодером	Н
Позначення	Значення
ACS580	Серія універсальних частотних перетворювачів АВВ
01	Виконання для настінного монтажу
033А	Максимальний тривалий вихідний струм 33 А
4	Діапазон напруги живлення 380 - 480 В

8.3 Частотний перетворювач АВВ ACS580 - 01. Призначення та принцип роботи

Частотний перетворювач АВВ ACS580 - 01 [12-14] належить до серії універсальних приводів загального призначення та призначений для плавного регулювання швидкості асинхронних електродвигунів шляхом зміни частоти та амплітуди вихідної напруги.

Застосування перетворювача дозволяє:

- Зменшити пускові струми;
- Знизити механічні навантаження на обладнання;
- Підвищити енергоефективність електроприводу;
- Забезпечити плавний розгін та гальмування;
- Реалізувати автоматизоване керування технологічним процесом.

Принцип роботи частотного перетворювача складається з трьох основних етапів:

- Випрямлення трифазної напруги мережі 380 В у напругу постійного струму.
- Фільтрація напруги в проміжному колі постійного струму.
- Формування трифазної напруги необхідної частоти та амплітуди за допомогою інвертора на IGBT - транзисторах.

Частотний перетворювач забезпечує скалярне керування U/f та векторне керування двигуном залежно від вибраного режиму роботи.

Після завершення монтажу силових та сигнальних кабелів виконується процедура першого запуску через панель керування ACS580.

Перший запуск здійснюється за допомогою вбудованого майстра налаштування, який автоматично проводить користувача через основні етапи конфігурації приводу.

Під час налаштування необхідно:

- Вибрати мову інтерфейсу;
- Встановити регіональні налаштування;
- Ввести паспортні дані двигуна;
- Вибрати режим керування;
- Налаштувати параметри розгону та гальмування;
- Перевірити напрямок обертання двигуна.

Після завершення майстра налаштування привід готовий до роботи в автоматичному режимі.

Інтерфейси керування та функції безпеки.

Перетворювач ABB ACS580 - 01 оснащений широким набором інтерфейсів керування:

- Аналогові входи та виходи;
- Цифрові входи та виходи;
- Релейні виходи;
- Вбудований інтерфейс Modbus RTU;
- Функція Safe Torque Off (STO).
- Стандартні сигнали керування включають:
- Команду «Пуск/Стоп»;
- Вибір напрямку обертання;
- Завдання швидкості;
- Контроль аварійних станів;
- Передачу технологічних параметрів через мережу Modbus RTU.
- Функція STO (Safe Torque Off) забезпечує безпечне відключення крутного моменту двигуна та використовується у системах аварійної зупинки обладнання.

Типові несправності та захисні функції перетворювача:

Для підвищення надійності роботи приводу в ACS580 реалізовано систему діагностики несправностей.

Основними аварійними повідомленнями є:

- Перевантаження по струму;
- Коротке замикання;
- Витік на землю;
- Втрата вхідної фази;
- Втрата вихідної фази;
- Перенапруга проміжного кола;
- Знижена напруга проміжного кола;

- Помилки STO;
- Втрата зв'язку Modbus RTU.

При виникненні аварійного режиму привід автоматично зупиняє двигун та видає повідомлення на панель керування [18,20-22,25,28,36,40].

Рекомендації фірми АВВ щодо монтажу та підключення [11-14]:

- Кабелі двигуна повинні бути екранованими;
- Екран кабелю необхідно заземлювати з боку двигуна;
- Силові та сигнальні кабелі прокладаються окремо;
- Корпус приводу повинен бути надійно заземлений;
- Необхідно забезпечити вільний простір для охолодження приводу.

Для двигуна потужністю 11 кВт рекомендується використання мідних силових кабелів перерізом не менше 10 мм² та дотримання вимог електромагнітної сумісності.

Висновки до розділу 8

1.Розроблено схему керування електроприводом кривошипного преса JL21 - 110 на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором та частотного перетворювача АВВ ACS580 - 01.

2.Сформовано силову схему підключення електропривода, яка включає автоматичний вимикач, контактор, частотний перетворювач, асинхронний двигун, гальмівний резистор та кола захисного заземлення. Розроблена схема відповідає рекомендаціям виробника АВВ щодо підключення приводу ACS580 - 01.

3.Виконано аналіз технічних характеристик частотного перетворювача АВВ ACS580 - 01, розглянуто його номінальні і аварійні режими роботи, конструктивні особливості, основні параметри та можливості застосування в системах автоматизованого електропривода промислового обладнання.

4.Розглянуто процедуру введення приводу в експлуатацію, порядок виконання початкового налаштування та основні параметри конфігурації, необхідні для коректної роботи електропривода в складі пресового обладнання.

7.Проаналізовано можливості реалізації функцій безпеки та діагностики, зокрема функцію безпечного відключення крутного моменту STO (Safe Torque Off), засоби захисту від коротких замикань, перевантажень, втрати фаз та інших аварійних режимів роботи.

8.Встановлено, що використання частотного перетворювача ABB ACS580-01 дозволяє знизити пускові струми, зменшити механічні навантаження на елементи приводу, підвищити надійність роботи обладнання та забезпечити більш ефективне використання електричної енергії.

9.Розроблена система електропривода забезпечує необхідні показники діапазону регулювання швидкості, плавності пуску та зупинки, а також створює умови для подальшої інтеграції преса JL21 - 110 до сучасних автоматизованих виробничих комплексів.

Таким чином, виконана розробка силової схеми та вибір частотного перетворювача ABB ACS580-01 підтверджують доцільність використання частотно-регульованого електропривода для кривошипного преса JL21 - 110 та забезпечують підвищення ефективності, надійності й безпеки його експлуатації.

ВИСНОВКИ

У дипломному проекті вирішено актуальне науково-практичне завдання з модернізації електроприводу та комплексної автоматизації механічного кривошипного преса моделі JL21 – 110.

Основними результатами роботи є такі:

1. Обґрунтовано доцільність модернізації базової релейно-контактної системи керування преса. Перехід від традиційного нерегульованого асинхронного привода до регульованої системи ПЧ-АД дозволив усунути жорсткий прямий пуск, знизити пускові струми та динамічні удари в кінематичних вузлах.

2. Виконано енергетичний розрахунок циклу штампування преса із номінальним зусиллям 1100 кН та ходом повзуна 160 мм. Визначено повну роботу за один цикл штампування, яка становить 81840 Дж. Завдяки врахуванню накопиченої кінетичної енергії маховика масою 750 кг із коефіцієнтом використання маховик $k_f=0.2$, фактична розрахункова потужність привода була знижена до 11 кВт .

3. Здійснено вибір силового електрообладнання: для оновленого привода обрано трифазний асинхронний двигун АВВ М3АА 132М-4 номінальною потужністю 11 кВт та інтелектуальний промисловий перетворювач частоти АВВ ACS580-01 із запасом по потужності (на 15 кВт, вихідний струм 32 А) для надійної роботи в повторно-короткочасних режимах з ударним навантаженням.

4. Спроектовано систему автоматизації без залучення сторонніх ПЛК. Весь алгоритм логічного керування та координації суміжних пристроїв лінії листового штампування (розмотувального пристрою, рихтувального апарата, механізму натягу стрічки та серво-подавача) реалізовано безпосередньо на базі вбудованого обчислювального модуля логіки ПЧ через конфігурацію його дискретних/аналогових входів і виходів під датчики.

5. Розроблено та оптимізовано за допомогою графо-переходів алгоритм безпечного запуску та блокування преса. Створена логіка забезпечує апаратне та

програмне переривання циклу роботи привода у разі виникнення аварії, перегріву обмоток двигуна, неготовності силових модулів ПЧ, некоректного початкового положення повзуна або спрацювання світлової завіси безпеки (через захисну функцію STO перетворювача).

6. У середовищі MATLAB/Simulink побудовано імітаційну модель системи частотно-регульованого привода преса, де виконано перерахунок параметрів двигуна-прототипу 4A132M4У3 в Т-подібну схему заміщення. Дослідження статичних та динамічних режимів підтвердило високу точність регулювання частоти ходів повзуна (в діапазоні $40\text{--}60 \text{ хв}^{-1}$ з глибиною регулювання не менше 10:1) та плавність процесів електронного гальмування.

7. Отримані в ході виконання бакалаврської роботи результати свідчать про перспективність застосування для кривошипного преса регульованого електропривода за системою ПЧ-АД, його високі якісні показники, а також підтверджують актуальність обраної теми.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Складанний М. С. Технологічне обладнання (ковальсько-пресові машини) : метод. Вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи / М. С. Складанний ; М-во освіти і науки України, Київ. Нац. Ун-т буд-ва і архітектури. – Київ : КНУБА, 2014. – 36 с.. 13. Плєснецов Ю. О.
2. Плєснецов Ю. О. Ковальсько-штампувальне обладнання. Механічні преси : навч. Посібник / Ю. О. Плєснецов, В. О. Маковей ; Нац. Техн. Ун-т "Харків. Політехн. Ін-т", Нац. Техн. Ун-т України "Київ. Політехн. Ін-т". – Харків : НТУ "ХПІ", 2014. – 236 с..
3. Halicioglu, R., Dulger, L. C., & Bozdana, A. T. (2016). Mechanisms, classifications, and applications of servo presses: A review with comparisons. *Journal of Engineering Manufacture*, 230(7), 1177–1194. (p. 1).
4. Петренко О. П . Ковальсько-штампувальне виробництво та обладнання сучасності: ретроспективний бібліографічний показник / уклад. О. П. Петренко ; Наукова бібліотека ТНТУ. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 62 с..
5. Вініченко Д. О., Кузнєцов О. В. Дослідження динаміки кривошипного преса JL21-110 при реалізації частотного гальмування привода. Тези доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 16–18 травня 2023 р.). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. С. 42–44.. Сучасні проблеми автоматики та електроприводаСПАЕ-2023.
6. В. А. Тітов, О. А. Марченко, О. В. Поліщук. Обладнання ковальсько-штампувальних цехів: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт та самостійної роботи з дисципліни / уклад.: В. А. Тітов, О. А. Марченко, О. В. Поліщук; Тернопіль. Нац. Техн. Ун-т ім. І. Пулюя. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 44 с. (ст. 2). Обладнання ковальсько-штампувальних цехів.
7. Crank Press JL21-110: Operation, Installation and Maintenance Manual . Yangzhou, 2018. 124 p. (p. 2). Yangli Group Corporation. URL:

- <https://primapressmachine.com/wp-content/uploads/2023/10/JH21-Using-Manual.pdf>.
8. AIDA Engineering Press Systems, Mechanical Press Fundamentals. AIDA. URL: <https://www.aida-global.com/technical-resources/>.
 9. Іструменти і обладнання для обробки металу. URL: https://kvrc.in.ua/ua/about_us.
 10. Асинхронні двигуни серії 4А, А.Є.Кравчик, М.М.Шлаф, В.І.Афонін, Е.А.Соболенська.. Асинхронні двигуни серії 4А Довідник / А.Є.Кравчик, М.М.Шлаф, В.І.Афонін, Е.А.Соболенська.
 11. Низьковольтне силове обладнання захисту та комутації ABB: Технічний каталог автоматичних вимикачів серії S200 та контакторів AF / ABB Group. 2023. 184 с. URL: abb.com (дата звернення: 11.06.2026). (pp.. ABB. URL: <https://voltline.ua/oborudovanie-nizkogo-napryazheniya/>).
 12. ABB. Перетворювачі частоти серії ACS580 для загальнопромислових застосувань: генеральний каталог продукції / ABB Drives. Гельсінкі. Перетворювачі частоти серії ACS580 для загальнопромислових застосувань: генеральний каталог продукції / ABB Drives. Гельсінкі: ABB, 2024. 112 с..
 13. ABB. Перетворювач частоти ABB ACS580-01 (0.75 до 250 кВт): Керівництво по монтажу та експлуатації / ABB Drives. Гельсінкі. Перетворювач частоти ABB ACS580-01 (0.75 до 250 кВт): Керівництво по монтажу та експлуатації / ABB Drives. Гельсінкі: ABB, 2021. 340 с. URL: abb.com (дата звернення: 11.06.2026). (pp. 2, 6).
 14. СИСТЕМАКС. URL: <https://systemax.ua/ua/avtomatika/chastotnie-preobrazovateli/acs580/acs580-01-032a-4.html>.
 15. М. Г. Попович, В. І. Кострицький та ін. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод (Теорія і практика) / М.Г.Попович, В.І. Кострицький та ін. Навч. Посібник з грифом МОН України. – К.: КНУТД. 2008. - 408 с.
 16. Попович М. Г., Печеник М. В., Лозинський О. Ю. Теорія електроприводу: підручник / за ред. М. Г. Поповича. 2-ге вид., перероб. Та доп. Київ: Каравела, 2018. 512 с. (р. 1).

- 17.Хьюз А., Друрі Б. Електропривод та системи керування: базовий курс для інженерів / пер. З англ. О. В. Кузнєцова. 412 с. Київ: Інтертехніка, 2019.
- 18.Вулфсон С. Динаміка кривошипно-шатунних виконавчих механізмів штампувальних пресів/ пер. З англ. За ред. М. В. Червоного. Кропивницький: ЦНТУ, 2021. 288 с.
- 19.Львівська Політехніка. Енергоефективність та динаміка асинхронних приводів циклічної дії: колективна монографія / за заг. Ред. О. Ю. Лозинського. Львів: , 2022. 316 с.ї
- 20.ТНТУ. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології в ковальсько-пресовому виробництві: підручник / за ред. В. А. Тітова. Тернопіль, 2024. 412 с.
- 21.Гол. Ред. Колегія: М. Ф. Дмитриченко Та Ін. Енциклопедія машинобудування, Київ: Техніка, 2020. Т. 3: Ковальсько-штампувальне обладнання та автоматизація. 620 с. : у 5 т. Т. 5.
- 22.Уклад. Червоний М. В. Кінематичний, силовий і енергетичний розрахунок кривошипного преса: методичні вказівки до виконання курсових та дипломних робіт; Центральноукраїнський національний технічний університет. Кропивницький: ЦНТУ, 2019, 48 с. (ст. 2)
- 23.Енергоефективність швидкісних режимів електромеханічних систем із маховиковим накопичувачем. : наукові праці полтавського національного технічного університету. Полтава, 2020. // Енергоефективність швидкісних режимів електромеханічних систем із маховиковим накопичувачем. URL: nupr.edu.ua (дата звернення: 11.06.2026). (pp. 2, 6).
- 24.Analysis of peak loads on variable frequency drives in heavy flywheel machinery applications: preprint / Engineering Research Council. London: ERC. –2025.
- 25.Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни “Системи керування електроприводами ” для студентів денної форми навчання зі спеціальності “Електромеханічні системи автоматизації та електроприводу - Київ НТУУ “КПІ” 2002 – 48 с

- 26.Червоний М. В. Дослідження динамічних процесів у частотно-регульованих асинхронних приводах циклічної дії. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2021. № 4 (297). С. 89–94. (р. 5)
- 27.Математичне моделювання перехідних процесів у асинхронному електроприводі з частотним регулюванням. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2022. Том 33 (72), № 3. С. 114–120. (с. 2, 5)
- 28.Синтез систем підпорядкованого регулювання координат асинхронних частотно-керованих приводів. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. Покровськ, 2019. № 1 (21). С. 67–75. (рр. 2, 5)
- 29.Тітов В. А. [Рецензія]. Монографія «Енергоефективні системи частотно-регульованих приводів для важкого машинобудування» (авт. М. В. Червоний, 2021). Технічні науки та технології. 2022. № 2 (28). С. 204–206.
- 30.Dynamic Modeling of State-Transitions for Safety Automation in Industrial Press Machines. IEEE Transactions on Industry Applications. 2023. Vol. 59, No. 4. Pp. 4112–4121. (рр. 2, 5)
- 31.За Ред. М. Г. Поповича. Довідник інженера-електромеханіка: Т. 2: Регульовані асинхронні електроприводи.Київ: Каравела, 2018, 544 с. : у 3 т. Т. 2.
- 32.Three-Phase Induction Motor Block in Reference Frames: Simulink User Guide / MathWorks Documentation. 2024. URL: mathworks.com (Last accessed: 11.06.2026).
- 33.Three-Phase Induction Motor Block in Reference Frames: Simulink User Guide / MathWorks. 2024. URL: mathworks.com (Last accessed: 11.06.2026). (рр. 2, 6) // Three-Phase Induction Motor Block in Reference Frames: Simulink User Guide. . URL: mathworks.com (Last accessed: 11.06.2026). (рр. 2, 6).
- 34.Лозинський О. Ю., Марущак Я. Ю. Синтез контурів регулювання швидкості ЧРАП за умов ударного навантаження. Сучасні проблеми електропривода: монографія / за ред. М. Г. Поповича. Київ: Каравела, 2020. Розд. 4.3. С. 145–168.

35. Автоматизована система керування лінією листового штампування на базі інтелектуального частотного перетворювача; заявник Центральноукраїнський національний технічний університет. № u202104321 ; заявл. 12.07.2021 ; опубл. 15.02.2022, Бюл. № 7. 6 с. : пат. Пат. 151402 Україна : МПК B21D 43/00. № G05B 19/00 ; заявл. 12.07.2021 ; опубл. 15.02.2022. 6 с.
36. Тітов В. А., Поліщук О. В. Математичне моделювання взаємодії повзуна преса JL21-110 з пристроями автоматичної подачі стрічки: препринт. Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакіуля НАН України. Київ: ІНМ, 2023. 32 с. (Препринт / НАН України, ІНМ ; 2023-02)..
37. ДСТУ EN ISO 16092-2:2022. Безпека ковальсько-пресового обладнання. Преси механічні. Вимоги безпеки. На заміну (EN ISO 16092-2:2020, IDT; ISO 16092-2:2019, IDT) ; чинний від 01.01.2023. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 48 с.
38. Автоматизований асинхронний електропривод у промисловості: бібліографічний покажчик наукових праць (2015–2025) / уклад. Л. М. Іванова ; Науково-технічна бібліотека КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: НТБ КПІ, 2025. 84 с.
39. Automation of Auxiliary Forging Operations. Handbook of Metal Forming Automation / ed. by J. Groves. New York: Mechanical Engineering Press, 2018. Chap. 7. Pp. 215–245.
40. ДСТУ EN 61800-3:2018. Системи промислової автоматизації та інтеграція. Системи електроприводів силові регульовані. Частина 3. Вимоги до електромагнітної сумісності. На заміну (EN 61800-3:2004; A1:2012, IDT; IEC 61800-3:2004; A1:2011, IDT) ; чинний від 01.07.2019. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 74 с.
41. Печеник М. В. Навчальний посібник «Автоматизація ковальсько-пресових ліній» (авт. О. В. Кузнецов, 2021). Електромеханіка. 2022. Вип. 4. С. 112–114.
42. Decoiler and Straightener Machine Combined Systems (JL-Series): Technical Specifications / Yangli Forging Machinery. 2021. URL: yangli.com (дата звернення: 11.06.2026).

- 43.Про охорону праці: Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII // Відомості Верховної Ради України. 1992. № 49. Стаття 668. (Редакція від 01.01.2026). URL: rada.gov.ua (дата звернення: 11.06.2026). (Для розділу БЖД / Охорона праці).
- 44.Правила охорони праці під час ковальсько-пресових робіт: НПАОП 28.4-1.39-13 / Затверджено Наказом Міністерства надзвичайних ситуацій України № 114 від 12.02.2013. [Зі змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства № 211 від 18.01.2021]. URL: rada.gov.ua (дата звернення: 11.06.2026). (Головний профільний документ з техніки безпеки на кривошипних пресах).

ДОДАТОК А
КРЕСЛЕННЯ

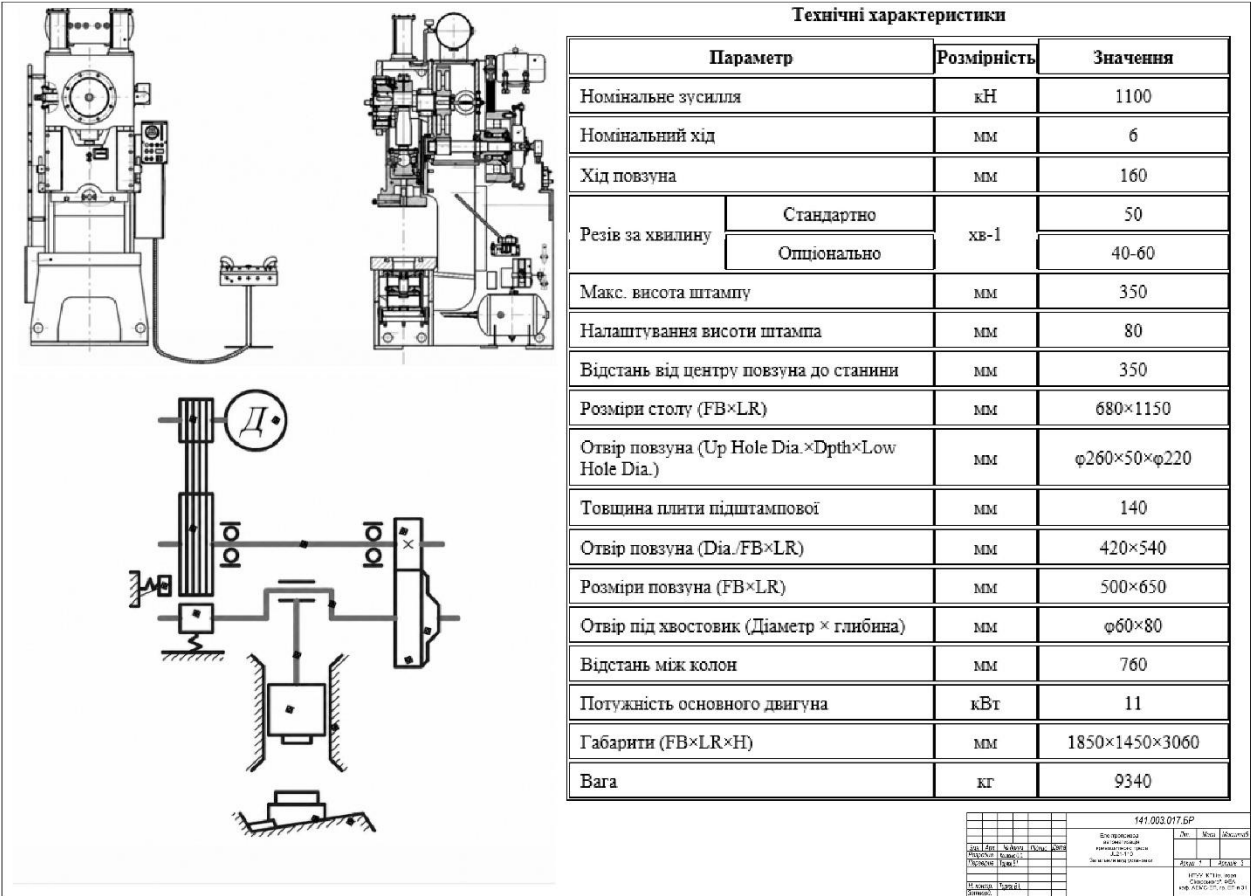


Рисунок А1.1 – Загальний вид

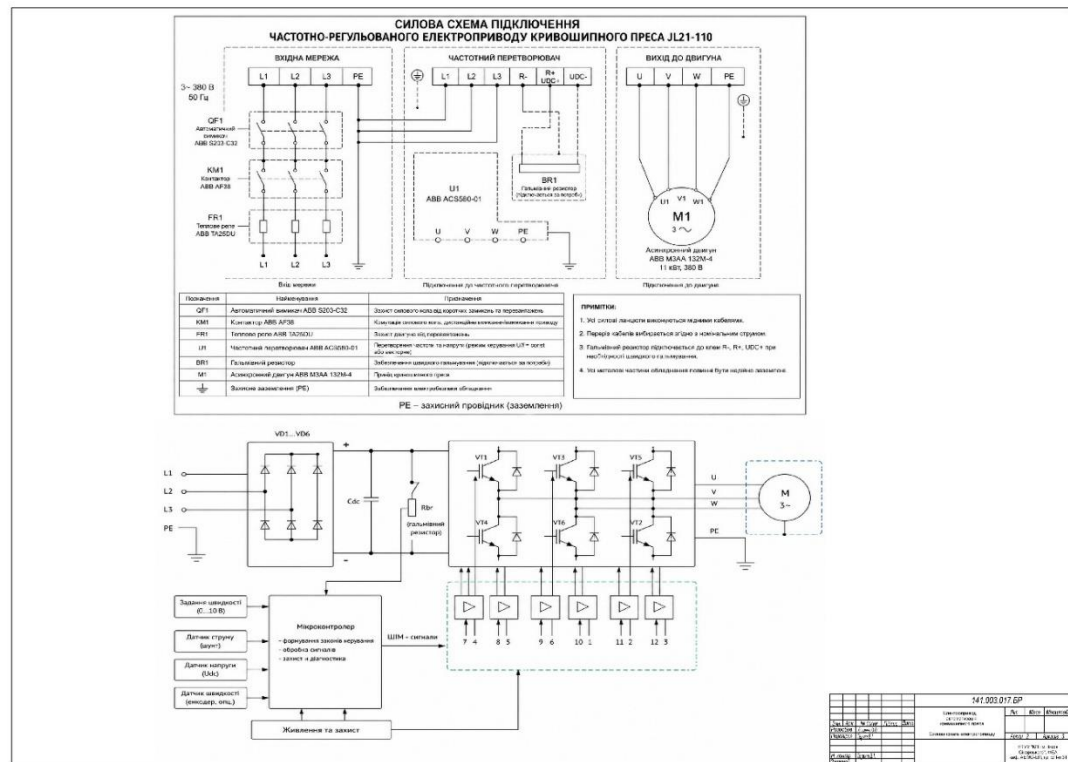


Рисунок А1.2 – Силова схема

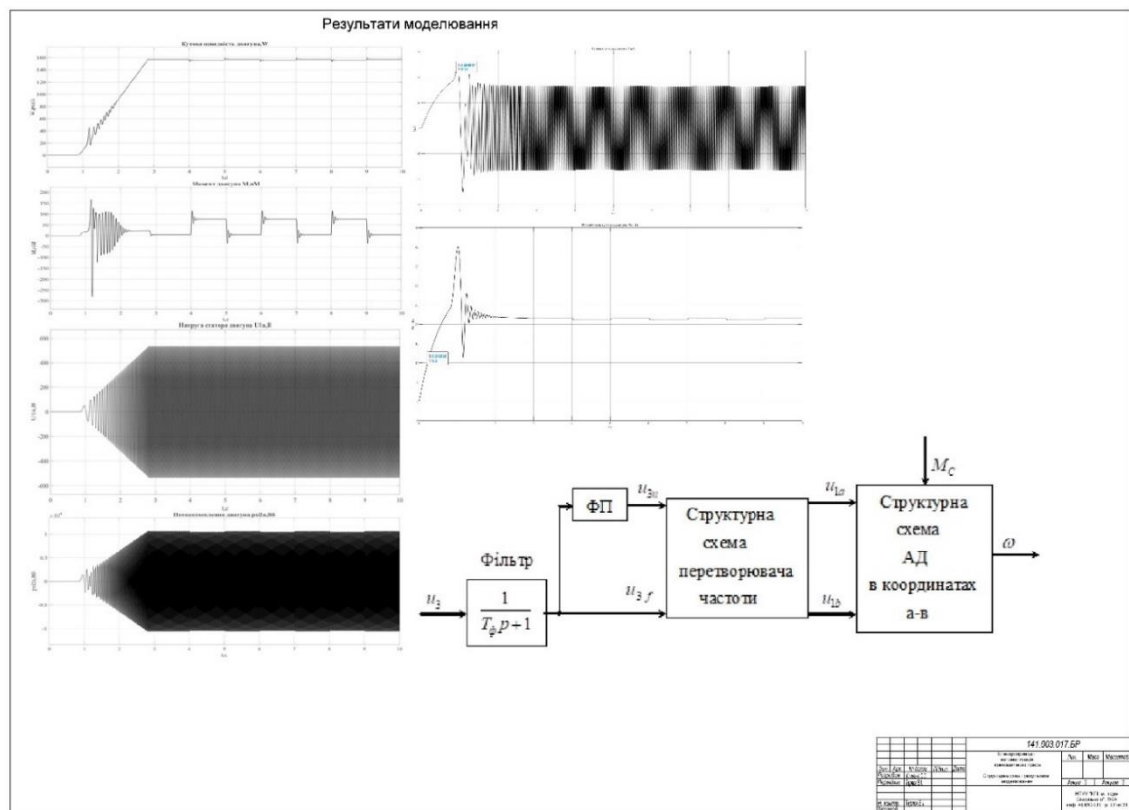
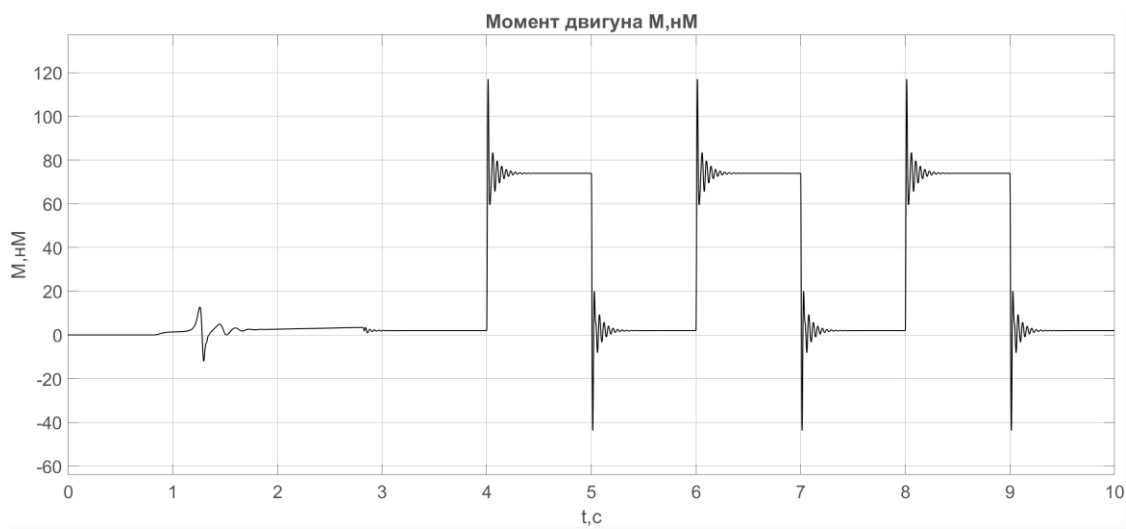
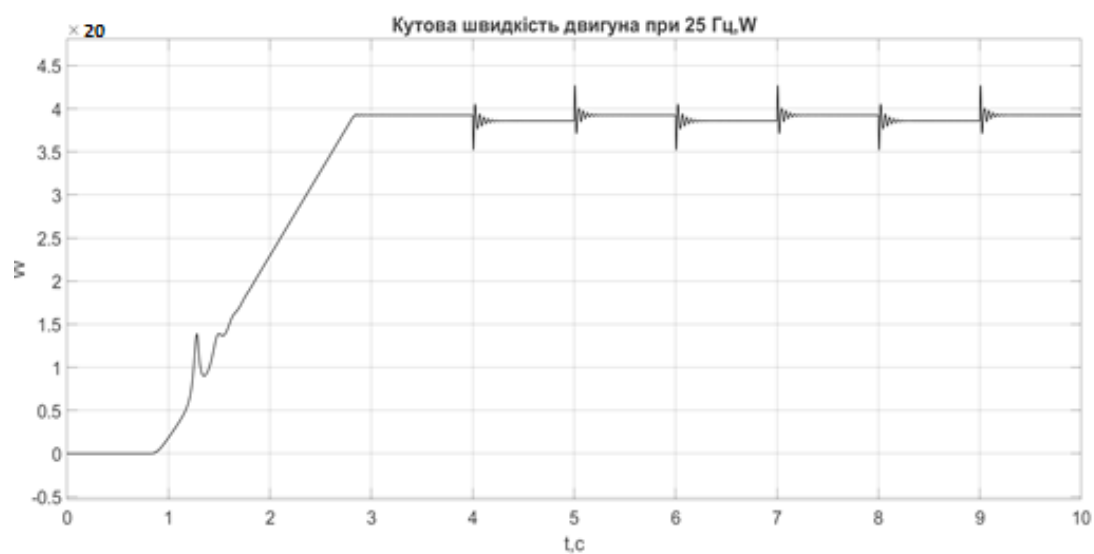
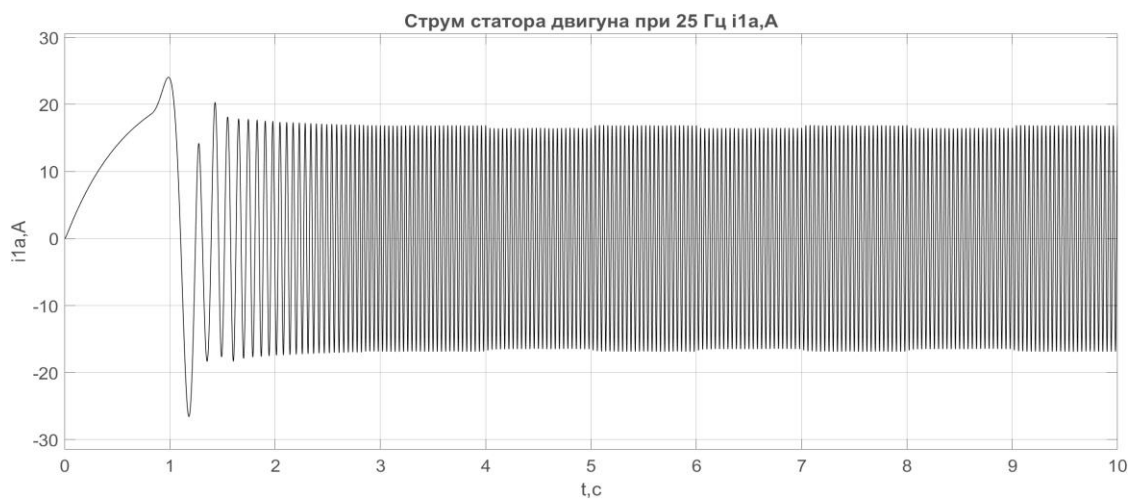


Рисунок А1.3 – Структурна схема та результати моделювання

ДОДАТОК Б

Графіки моделювання при частоті 25 Гц



Графіки моделювання зі збільшеним у 10 разів маховиком при частоті 50 Гц

