

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
"Національний гірничий університет"

Електротехнічний  
(факультет)

Кафедра Електропривода  
(повна назва)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

дипломної роботи

магістра

(назва освітньо-кваліфікаційного рівня)

галузь знань 14 Електрична інженерія

(шифр і назва галузі знань)

спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

(освітня програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»)

освітній рівень магістр

(назва освітнього рівня)

Кваліфікація 2151.2 (Int) Інженер-електромеханік

(код і назва кваліфікації)

на тему: Закони частотного керування асинхронним  
електроприводом кривошипно-шатунних механізмів

Виконавець:

Студент 6 курсу, групи 141м-16-4

Захар'єв П.О.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка	Підпис
проекту	Казачковський М.М.		
розділів:			
Розділ 1	Казачковський М.М.		
Розділ 2	Казачковський М.М.		
Розділ 3	Казачковський М.М.		

Рецензент			
-----------	--	--	--

Нормоконтроль	Казачковський М.М.		
---------------	--------------------	--	--

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
"Національний гірничий університет"

---

---

ЗАТВЕРДЖЕНО:

завідувач кафедри

Електроприводу

(повна назва)

\_\_\_\_\_ Казачковський М.М.

(підпис)

(прізвище,  
ініціали)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 року

**ЗАВДАННЯ**

на виконання кваліфікаційної роботи магістра  
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код і назва спеціальності)

(освітня програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»)

студенту 141м-16-4  
(група)

Захар'єв П.О.  
(прізвище та ініціали)

Тема дипломної роботи Закони частотного керування асинхронним  
електроприводом кривошипно-шатунних механізмів

---

---

**1 ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ**

Наказ ректора ДВНЗ "НГУ" від \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

**2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ**

Об'єкт досліджень кривошипно-шатунний механізм з асинхронним  
електроприводом

Предмет досліджень закони частотного керування

Мета НДР розробити закон частотного керування асинхронним електроприводом  
кривошипного преса з метою зменшення енергетичних витрат

Вихідні дані для проведення роботи вихідні дані кривошипного преса  
(загальна технічна характеристика, кінематична схема, графік навантаження)

---

---

**3 ОЧІКУВАНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ**

Наукова новизна закон частотного керування асинхронним  
електроприводом

---

---

**Практична цінність** зменшення витрат електричної енергії, можливе зменшення матеріалів, підвищення надійності експлуатації обладнання

#### 4 ВИМОГИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

результати роботи повинні містити математичні залежності, рекомендації до застосування, схематичні рішення у вигляді структурних схем

#### 5 ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБІТ

Найменування етапів робіт	Строки виконання робіт (початок-кінець)
Дослідження кривошипно-шатунного механізму як елемента електромеханічної системи, визначення характеристик об'єкта досліджень	
Проведення попередніх розрахунків, теоретичне обґрунтування запропонованих рішень	
Математичне моделювання та перевірка запропонованих рішень, висновки за результатами роботи	

#### 6 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ

**Економічний ефект** скорочення витрат на електричну енергію

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Соціальний ефект** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

#### 7 ДОДАТКОВІ ВИМОГИ

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Завдання видав \_\_\_\_\_

(підпис)

(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

(підпис)

(прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: \_\_\_\_\_

Термін подання дипломної роботи до ЕК \_\_\_\_\_

## Реферат

Пояснювальна записка: 51 с., 4 табл., 21 мал., 19 джерел.

Об'єкт розробки: кривошипно-шатунний механізм (КШМ) з асинхронним електроприводом.

Мета дипломного проекту: розробити закон частотного керування асинхронним електроприводом КШМ на прикладі кривошипного преса з метою зменшення енергетичних витрат.

У вступі представлені сучасні тенденції розвитку електроприводів устаткування з кривошипно-шатунними механізмами.

У першій частині розглянуто кривошипно-шатунний механізм як елемент електромеханічної системи, наведено загальну характеристику устаткування з використанням КШМ, надано опис кривошипного пресу.

Розділ 2 присвячений теоретичним розрахункам енергетичних показників електроприводу кривошипного преса та обґрунтуванню закону частотного керування асинхронним електроприводом преса. Також в розділі зроблено аналіз особливостей електроприводів саме кривошипних пресів.

У розділі 3 розроблено математичну модель електроприводу, проведено моделювання його роботи та аналіз отриманих результатів.

За результатами роботи зроблено відповідні висновки та надано рекомендації що до використання частотного керування у електроприводі КШМ пресів.

КРИВОШИПНО-ШАТУННИЙ МЕХАНІЗМ, КРИВОШИПНИЙ ПРЕС,  
АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ЧАСТОТНЕ КЕРУВАННЯ,  
МОДЕЛЮВАННЯ.

## **Abstract**

Explanatory note: 51 pages, 4 tables, 21 figures, 19 reference sources.

Design object: crank-gear mechanism with induction motor drive.

The goal of diploma project: development of the control system for the induction motor electric drive of crank-gear press mechanism in order to reduce energy losses.

The tendencies of electric drives with crank gears are given in the introduction.

The 1<sup>st</sup> section describes the crank-gear mechanism as an element of electromechanical system; the general description of the equipment with crank gear is given. The crank-gear press is examined.

The 2<sup>nd</sup> section is devoted to theoretical calculations of crank-gear press electric drive's energetic performances. The control algorithm for the variable frequency electric drive of the press is suggested. The specific properties of crank-gear press and its electric drive is analyzed.

The mathematical model of electric drive is developed in the 3d section; the simulation is carried out and the results are analyzed.

The final part gives conclusions and recommendations regarding the application of electric drive for the crank-gear presses.

CRANK-GEAR MECHANISM, CRANK-GEAR PRESS,  
ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE, VARIABLE FREQUENCY DRIVE,  
SIMULATION

## ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА .....	7
1.1 Кривошипно-шатунний механізм як частина електромеханічної системи.....	7
1.2 Загальна характеристика устаткування з кривошипно-шатунним механізмом.....	16
1.3 Використання кривошипно-шатунного механізму на прикладі ковальського пресу .....	18
2 ОБГРУНТУВАННЯ ЗАКОНІВ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КРИВОШИПНО-ШАТУННИХ МЕХАНІЗМІВ НА ПРИКЛАДІ КОВАЛЬСЬКОГО ПРЕСУ .....	23
2.1 Характеристика електроприводу ковальського пресу з КШМ.....	23
2.2 Енергетика електроприводу ковальського пресу з КШМ.....	25
2.3 Система частотного керування швидкістю електропривода ковальського пресу з КШМ .....	28
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНІВ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КРИВОШИПНО-ШАТУННИХ МЕХАНІЗМІВ НА ПРИКЛАДІ КОВАЛЬСЬКОГО ПРЕСУ .....	30
4.1 Розробка математичної моделі.....	30
4.2 Моделювання роботи електропривода та аналіз результатів .....	36
4.3 Рекомендації до застосування закону частотного керування.....	47
ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	50

## ВСТУП

У сучасній промисловості для перетворення різних типів механічного руху (обертовий в поступальний і навпаки) використовується велика кількість механізмів з різноманітним принципом дії. Серед них достатньо велику частину займають пристрої з кривошипно-шатунним механізмом. Вони перетворюють обертовий рух валу двигуна у лінійне переміщення виконавчого органу. До таких механізмів відносяться: поршньові компресори та насоси, пільгер-стани, летючі ножиці, штангові насоси-гойдалки, ковальсько-пресове обладнання тощо.

Як правило електропривод таких механізмів нерегульований з асинхронним короткозамкненим двигуном. Там де використовується регульований за швидкістю електропривод, наприклад у пільгер-станах, за звичай використовувалась система тиристорний перетворювач з двигуном постійного струму незалежного збудження (ТП-ДПТ з НЗ). З розвитком перетворювальної техніки змінного струму, а саме перетворювачів частоти, у сучасних системах та знов встановлювальних пристроях система ТП-ДПТ майже не використовується. Її цілком витісняє система перетворювач частоти – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (ПЧ-АД с КЗР).

У більшості випадків використовується вольт-частотний закон керування (частотне або скалярне керування) швидкістю електричного двигуна. Але враховуючи особливості кривошипно-шатунного механізму та пристрою, в якому цей механізм використовується, не завжди доцільно використовувати саме просте частотне керування. Виникає необхідність застосовувати векторне керування моментом та швидкістю асинхронного двигуна. Саме таке рішення дозволяє більш ефективно використовувати всі властивості асинхронного двигуна та забезпечити роботу пристрою з кращими показниками.

В даній роботі розглядаються особливості кривошипно-шатунних механізмів та їх вплив на вибір закону керування швидкістю АД в системі ПЧ-АД на прикладі кривошипного пресу, здійснюється моделювання роботи такого механізму.

## 1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Кривошипно-шатунний механізм як частина електромеханічної системи

Кривошипно-шатунний механізм (КШМ) призначений для перетворення рівномірного обертового руху у прямолінійний нерівномірний рух. КШМ відноситься до класу механізмів у яких момент інерції  $J$  та момент статичного опору залежать від куту повороту ведучого валу  $J=f(\alpha)$ ,  $M_c=f(\alpha)$ . Також до таких механізмів можна віднести механізми у яких:

- центр ваги будь-якої ланки переміщується відносно центру обертання;
- передатне число між двигуном та робочою машиною змінюється під час руху (наприклад при використанні гідравлічних та електромагнітних муфт ковзання).

У разі використання КШМ рівняння руху електромеханічної системи має наступний вигляд [7]:

$$M_D - M_C(\alpha) = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}.$$

Розглянемо визначення моменту інерції КШМ у функції кута обертання  $J=f(\alpha)$  та визначення моменту статичного навантаження  $M_c=f(\alpha)$  зведених до валу кривошипа (двигуна).

Для визначення моменту інерції скористуємося кінематичною схемою, зображеної на рис. 1. Знаходження залежності  $J=f(\alpha)$  може бути здійснено як графоаналітичним способом з використанням плану швидкостей, так і аналітичним [7, 9]. Аналітичний спосіб більш складніший, але більш зручний і дозволяє швидко робити перерахунки при змінні вихідних даних. Також аналітичний спосіб більш зручний і для математичного моделювання електроприводів з КШМ.



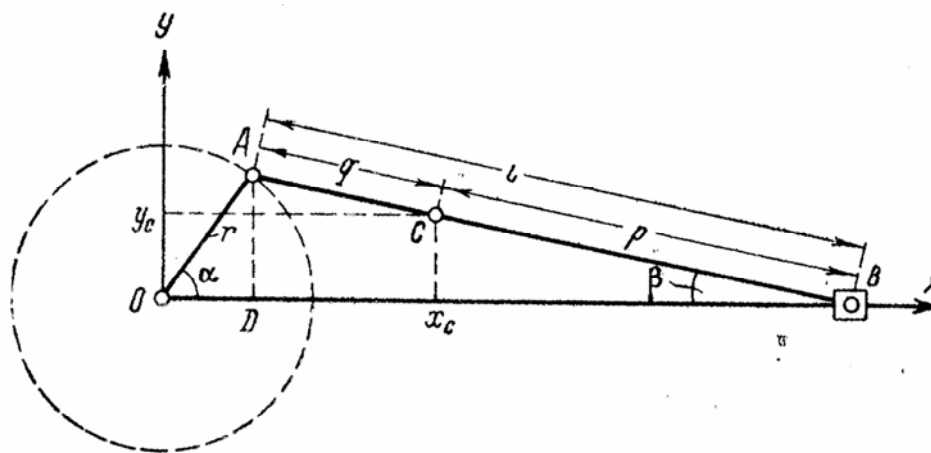


Рисунок 1 Кінематична схема кривошипно-шатунного механізму.

Окремі частини наведеного механізму здійснюють різні види руху: кривошип (ланка  $OA$ ) обертається навколо нерухомої вісі з центром у точці  $O$ , шатун (ланка  $AB$ ) здійснює складний обертально-поступовий рух у площині, повзун (ланка  $B$ ) – поступово-зворотний лінійний рух.

Введемо наступні позначення:

$J_{O1}$  - момент інерції частин, що обертаються навколо нерухомої вісі  $O$  (кривошип, вал двигуна та інш.);

$m_2$  - маса шатуна  $AB$ ;

$J_{C2}$  - момент інерції шатуна відносно вісі, що проходить через центр його ваги  $C$ ;

$m_3$  - маса ланки, що рухається зворотно-поступово (повзун, поршень та інш.);

$r$  - довжина кривошипа;

$l$  - довжина шатуна;

$q$  – відстань центру ваги шатуна від пальця кривошипа  $A$ ;

$\alpha$  - кут повороту кривошипа;

$\beta$  - кут між миттєвим напрямком шатуна  $AB$  та вісь  $x$ -в.

Положення центру ваги  $C$  шатуна  $AB$  визначається співвідношенням  $\frac{q}{l}$ ,

що знаходиться за результатами розрахунків або експериментальних досліджень.

Загальна формула для визначення зведеного до валу кривошипа моменту інерції для КШМ, наведеного на рис. 1, має наступний вид:

$$J_{\text{ПР}} = J_{O1} + m_2 \frac{v_C^2}{\omega_1^2} + m_2 \rho_{C2}^2 \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} + m_3 \frac{v_B^2}{\omega_1^2},$$

де  $\omega_1$  – кутова швидкість обертання кривошипа;

$\omega_2$  – кутова швидкість шатуна відносно точки  $C$ ;

$v_C$  – лінійна швидкість центру ваги шатуна;

$v_B$  – лінійна швидкість центру ваги повзуна;

$\rho_{C2}$  – радіус інерції шатуна (відстань від центру обертання на якій розташована зосереджена вага шатуна).

Розглянемо складові наведеного вище рівняння. Складова  $J_{O1}$  є моментом інерції частин, що обертаються навколо однієї вісі. До таких елементів у КШМ

відносяться вали та кривошипи. Складова  $m_3 \frac{v_B^2}{\omega_1^2}$  визначає зведення моменту

інерції мас, що рухаються поступально (лінійно). У складі КШМ таким елементом є повзун. Елемент КШМ шатун здійснює складний рух, який можна розділити на два прості – обертальний та поступальний (лінійний). Складова

$m_2 \frac{v_C^2}{\omega_1^2}$  визначає зведений момент інерції шатуна як елемента, що рухається

поступально, а складова  $m_2 \rho_{C2}^2 \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2}$  - елемента, що рухається обертально.

Для аналітичного визначення складових вище наведеного виразу, а саме швидкостей  $\omega_2$ ,  $v_C$ ,  $v_B$ , введемо систему координат в якій вісь  $x$  співпадатиме з лінією руху повзуна  $B$ , вісь  $y$  проходитьиме через вісь обертання кривошипа, а початок координат співпадатиме з віссю обертання кривошипа.

Визначимо координати точки  $C$ :

$$J_{O1}$$

$$x_C = r \cos(\alpha) + q \cos(\beta),$$

$$y_C = (l - q) \sin(\beta) = p \sin(\beta).$$

Якщо для трикутника  $OAB$  використати теорему синусів:

$$\frac{r}{\sin(\beta)} = \frac{l}{\sin(\alpha)},$$

то можна визначити значення  $\sin(\beta)$  та  $\cos(\beta)$ :

$$\sin(\beta) = \frac{r}{l} \sin(\alpha),$$

$$\cos(\beta) = \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \sin^2(\alpha)}.$$

Якщо підставити отримані вирази в попередні тоді отримаємо наступне:

$$x_C = r \cos(\alpha) + q \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \sin^2(\alpha)},$$

$$y_C = (l - q) \sin(\beta) = p \frac{r}{l} \sin(\alpha).$$

Виконаємо диференціювання отриманих виразів за часом і знайдемо проекції лінійної швидкості точки  $C$  на вісі координатної системи:

$$v_{CX} = \frac{dx_C}{dt} = -r \sin(\alpha) \frac{d\alpha}{dt} - q \frac{\left(\frac{r}{l}\right)^2 \sin(\alpha) \cos(\alpha)}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \sin^2(\alpha)}} \frac{d\alpha}{dt},$$

$$v_{CY} = p \frac{r}{l} \cos(\alpha) \frac{d\alpha}{dt}.$$

Оскільки похідна від кута оберту за часом є швидкість обертання  $\frac{d\alpha}{dt} = \omega_1$ , а  $\sin(\alpha) \cos(\alpha) = \frac{1}{2} \sin(2\alpha)$ , то вище отримані вирази приймуть вигляд:

$$v_{CX} = -r\omega_1 \left[ \sin(\alpha) + \frac{1}{2} \frac{q}{l} \frac{\left(\frac{r}{l}\right) \sin(2\alpha)}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \sin^2(\alpha)}} \right],$$

$$v_{CY} = p\omega_1 \frac{r}{l} \cos(\alpha).$$

Швидкість точки  $C$  розрахуємо наступним чином:

$$v_C = \sqrt{(v_{CX})^2 + (v_{CY})^2}.$$

Швидкість руху повзуна можна знайти з попередніх виразів уважаючи що в них  $q=l$  та  $p=0$ :

$$v_B = v_{BX} = -r\omega_1 \left[ \sin(\alpha) + \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{r}{l}\right) \sin(2\alpha)}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \sin^2(\alpha)}} \right],$$

$$v_{BY} = 0.$$

Кутова швидкість шатуна  $AB$  дорівнює:

$$\omega_2 = \frac{\left(\frac{r}{l}\right) \cos(\alpha)}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \sin^2(\alpha)}} \omega_1.$$

Використовуючи наведені вирази можна знайти всі складові, що входять до складу формули розрахунку зведеного моменту інерції.

Якісні графіки, що показують як змінюється зведений момент інерції та його складові наведено на рис. 2. *Лінія 1* визначає постійну складову зведеного моменту інерції, яка відповідає елементам кінематичної схеми, що обертаються з постійною швидкістю (кривошип, вал двигуна, редуктора та інш.). *Лінія 2* характеризує складову, обумовлену масою шатуна, що рухається поступово. *Лінія 3* – складова, яка характеризує обертання шатуна навколо центру ваги. *Лінія 4* – складова, обумовлена поступово-зворотнім рухом повзуна. Відповідно *Лінія 5* – сумарна крива зведеного моменту інерції.

Аналіз вище наведених рівнянь показує, що значення складових зведеного моменту інерції КШМ значно залежить від геометричних розмірів КШМ.

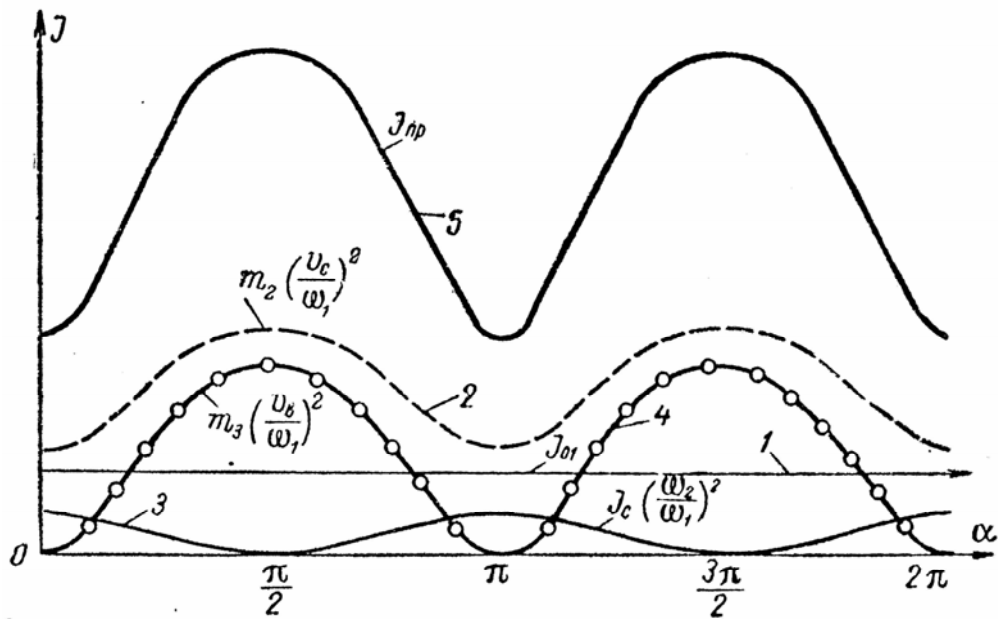


Рисунок 2 – Залежність зведеного моменту інерції КШМ та його складових від кута повороту КШМ

Для визначення моменту статичного навантаження розглянемо схему розподілу зусиль при роботі КШМ, яка показана на рис. 3. Для визначення статичного моменту на валу кривошипа  $O$  необхідно мати дані о величині дотичного зусилля  $T$ , прикладеного до пальця кривошипа в точці  $A$ .

Силу  $F$ , що діє за лінією руху повзуна можна розкласти на дві складові:  $F_{Ш}$  – направлену по лінії шатуна та  $F_{Н}$  - направлену перпендикулярно лінії руху повзуна. Сила, що діє по лінії шатуна дорівнює:

$$F_{Ш} = \frac{F}{\cos(\beta)}$$

Перенесемо зусилля  $F_{Ш}$  в точку  $A$  і розкладемо його на дві складові. Складова  $T$  є дотичною складовою і саме вона утворює момент статичного опору. Складова  $N$  є нормальною і врівноважується опором опір валу.

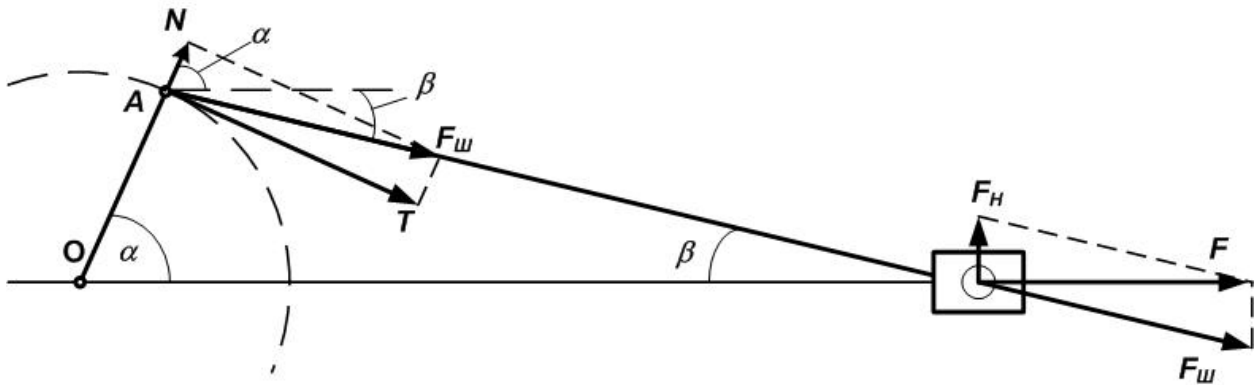


Рисунок 3 – Схема приведення статичних зусиль КШМ

Відповідно до рис. 3 дотична сила  $T$  визначається як:

$$T = F_{ш} \sin (\alpha + \beta), \text{ або}$$

$$T = F \frac{\sin (\alpha + \beta)}{\cos(\beta)}.$$

Статичний момент, зведений до валу двигуна, дорівнює:

$$M_C = \frac{Tr}{j} = \frac{Fr \sin (\alpha + \beta)}{j \cos(\beta)},$$

де  $j$  - передатне число між валом двигуна та валом кривошипа.

Підставимо у попередній вираз значення  $\sin (\alpha + \beta)$  та  $\cos (\beta)$ , які були отримані раніше, і отримаємо загальну формулу для визначення моменту статичного опору:

$$M_C = \frac{Fr}{j} \left[ \sin(\alpha) + \frac{r}{2l} \frac{\sin (2\alpha)}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \sin^2(\alpha)}} \right].$$

Як зазначено у [7] при розрахунках, які не потребують великої точності і при відношенні  $\frac{r}{l} < \frac{1}{5}$  кут  $\beta$  достатньо малий і його можна вважати таким, що дорівнює нулю  $\beta=0$ . При такому припущенні статичний момент на валу двигуна визначиться як:

$$M_C = \frac{Fr}{j} \sin(\alpha).$$

Загальний вигляд залежності моменту статичного опору від кута повороту наведено на рис. 4. Наведена форма статичного моменту носить загальний характер. Фактично крива моменту статичного опору може значно відрізнятись від наведеної і залежить від призначення та типу устаткування, де використано КШМ та параметрів самого КШМ.

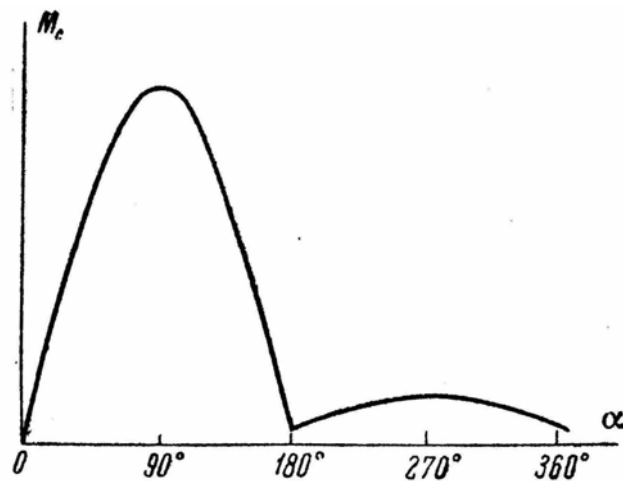


Рисунок 4 – Момент статичного опору в функції кута повороту

На рис. 5 наведені зведений момент інерції та момент статичного опору ткацького верстату АТ-120 [5], на рис. 6 момент статичного опору двоциліндрового насосу подвійної дії, а на рис. 10 - момент статичного опору ексцентрикового пресу зусиллям 600 тон.



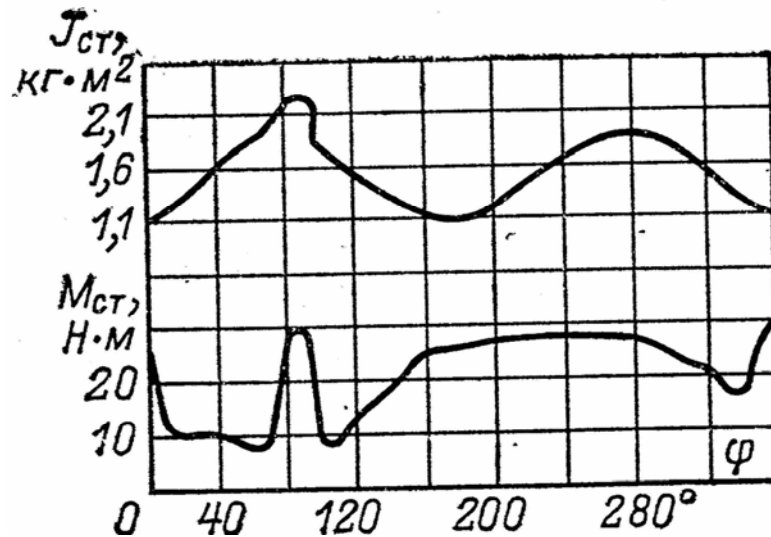


Рисунок 1.5 – Момент інерції та момент статичного опору ткацького верстату АТ-120

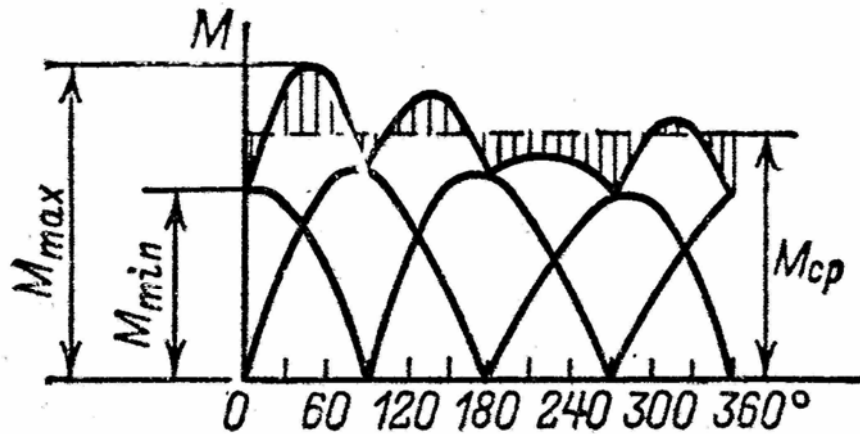


Рисунок 1.6 – Момент статичного опору двоциліндрового насосу подвійної дії

## 1.2 Загальна характеристика устаткування з кривошипно-шатунним механізмом

Механізми з кривошипно-шатунною системою в загалі можна охарактеризувати як механізми з циклічним знакозмінним навантаженням та циклічним моментом інерції. КШМ використовується там, де є необхідність перетворити обертовий рух в поступовий з нескладною, але достатньо простою та ефективною механічною системою. Промисловими механізмами у яких використовується КШМ є:

- штангові насоси-гойдалки;
- пільгер-стани (стани Холодної Прокатки Труб (ХПТ) та стани теплої прокатки);
- поршньові компресори та насоси;
- ковальські преси;
- ножиці для різки прокату у металургії;
- різні типу зштовхувачів;
- механізми відчинення-зачинення різних воріт, дверей, тощо.

За кількістю шатунів або повзунів КШМ можна поділити на:

- одно шатунні;
- багатшатунні (два і більше шатунів).

При роботі КШМ кривошип може робити повний оберт. І як правило вал кривошипа обертається у одному напрямку, наприклад у компресорів та насосів, пресів. Але існують КШМ у яких кривошип робить лише якусь частину оберту, наприклад у зштовхувачах, системах відкриття воріт [8]. Зазначені обставини впливають на наявність у електроприводах КШМ систем гальмування різних типів.

В багатьох КШМ використовується нерегульований електропривод з асинхронними короткозамкненими двигунами. Але існує достатньо механізмів, де використовується регульований електропривод з перетворювачами та двигунами як постійного, так і змінного струму, наприклад стани ХПТ. Останнім часом регульованих за швидкістю КШМ стає дедалі більше. Використання регульованого електроприводу надає нові властивості системам з КШМ, дозволяє регулювати їх продуктивність та енергетичну ефективність.

У деяких системах, де необхідно зменшити коливання швидкості в наслідок коливання навантаження, додатково використовують накопичувачі енергії – маховики. Наприклад у ковальсько-пресовому обладнанні. Також використовують врівноважуючи вагу, як у штангових насосах-гойдалках.

### 1.3 Використання кривошипно-шатунного механізму на прикладі ковальського пресу

Загальний вигляд ексцентрикового пресу з КШМ представлено на рис. 7 [8]. Прес встановлено на фундаменті 1. Прес складається з двох стійок 4, стола 2, траверси 7, механізму привода та блоку пневматичних подушок. Стіл преса має чотири вікна для розміщення блоків пневматичних подушок. На столі розташовані дві підштампові плити 3 з отворами для розміщення штовхачів пневматичних подушок. Траверса преса коробчастого перетину містить в собі механізм привода колеса. Операцію витяжки виконує повзун 6, який рухається у напрямляючих 5. Повзун 6 приводиться до руху електричним двигуном 10, що встановлений на траверсі, через триступеневу зубчасту передачу та ексцентриковий механізм (рис. 8). Вал двигуна через кліноременну передачу з'єднується з маховиком 9, який встановлено на окремій проміжній валу. Цей вал з'єднаний з редуктором через муфту зчеплення 12. Величина міжштампового простору регулюється окремим електричним двигуном невеликої потужності, укріпленим на повзуні. Прес має гідропневматичний запобіжник, який забезпечує зупинку преса при аварійних перевантаженнях.

Загальна технічна характеристика пресу наведена у табл. 1.

Таблиця 1 - Прес механічний ексцентриковий зусиллям 600 т.  
Загальна характеристика

Вихідні дані	
Зусилля при штампуванні, т	600
Вага повзуна з частинами, що відносяться до нього, т	37
Загальне передатне число між валами двигуна та ексцентрика	188
Кількість ходів повзуна за хвилину	7,4
Середнє ПВ, %	50
Загальний ККД, %	85

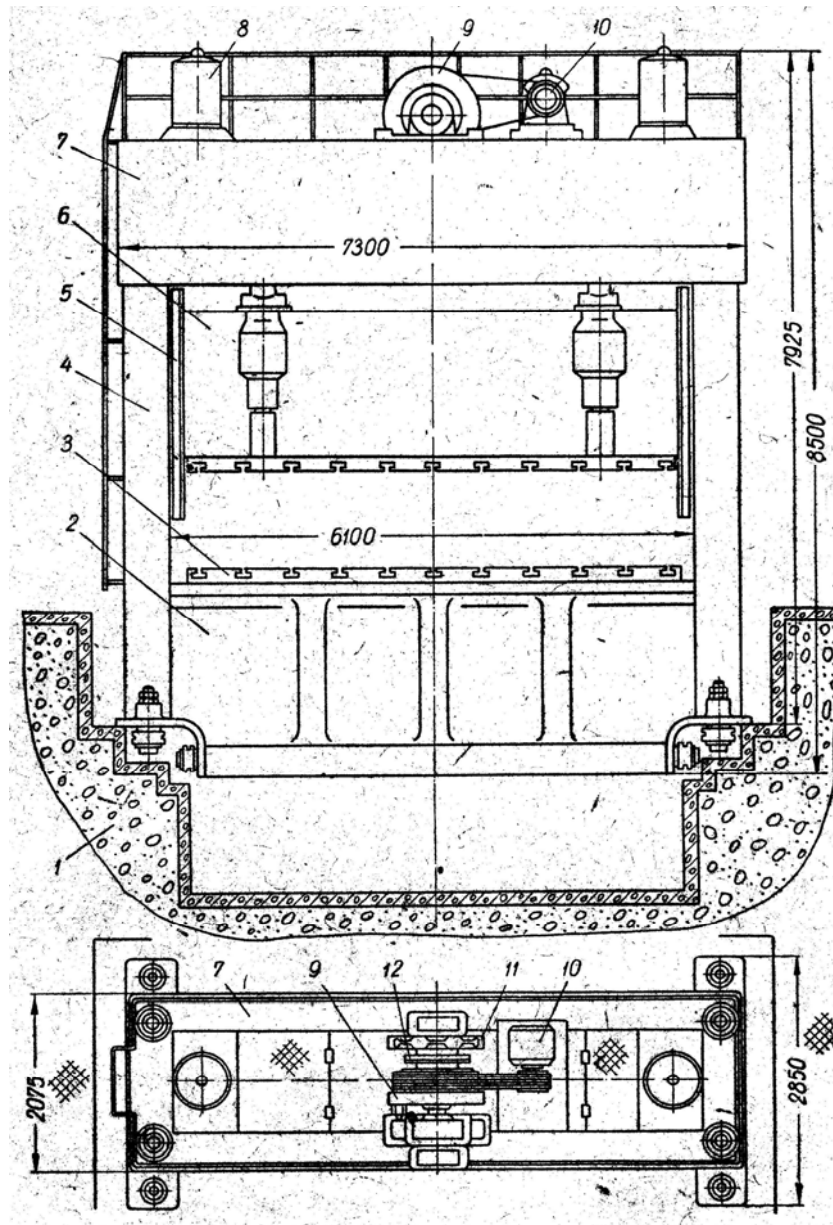


Рисунок 7 - Механічний ексцентриковий прес

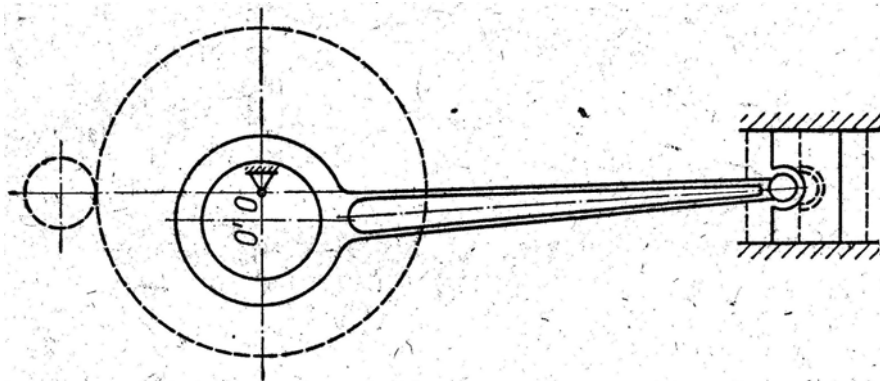


Рисунок 8 - Ексцентрикова передача преса

Прес має чотири шестеренних ексцентрикових механізми, які рухаються від одного двигуна. Привод правої та лівої сторін – симетричний. Кінематична схема (рис. 9) складається з: зубчастого колеса 1, яку розташовано на одному валу з маховиком; передачу П1 (зубчасті колеса 1 та 2) з передатним числом 3,22; передачу П2 (зубчасті колеса 3 та 4) з передатним числом 3,84; передачу П3 (зубчасті колеса 5 та 6) з передатним числом 5,5. З'єднання лівої та правої сторін виконується через зубчасте колесо 7. Передатне число за шківками двигуна та валу маховика складає 2,77.

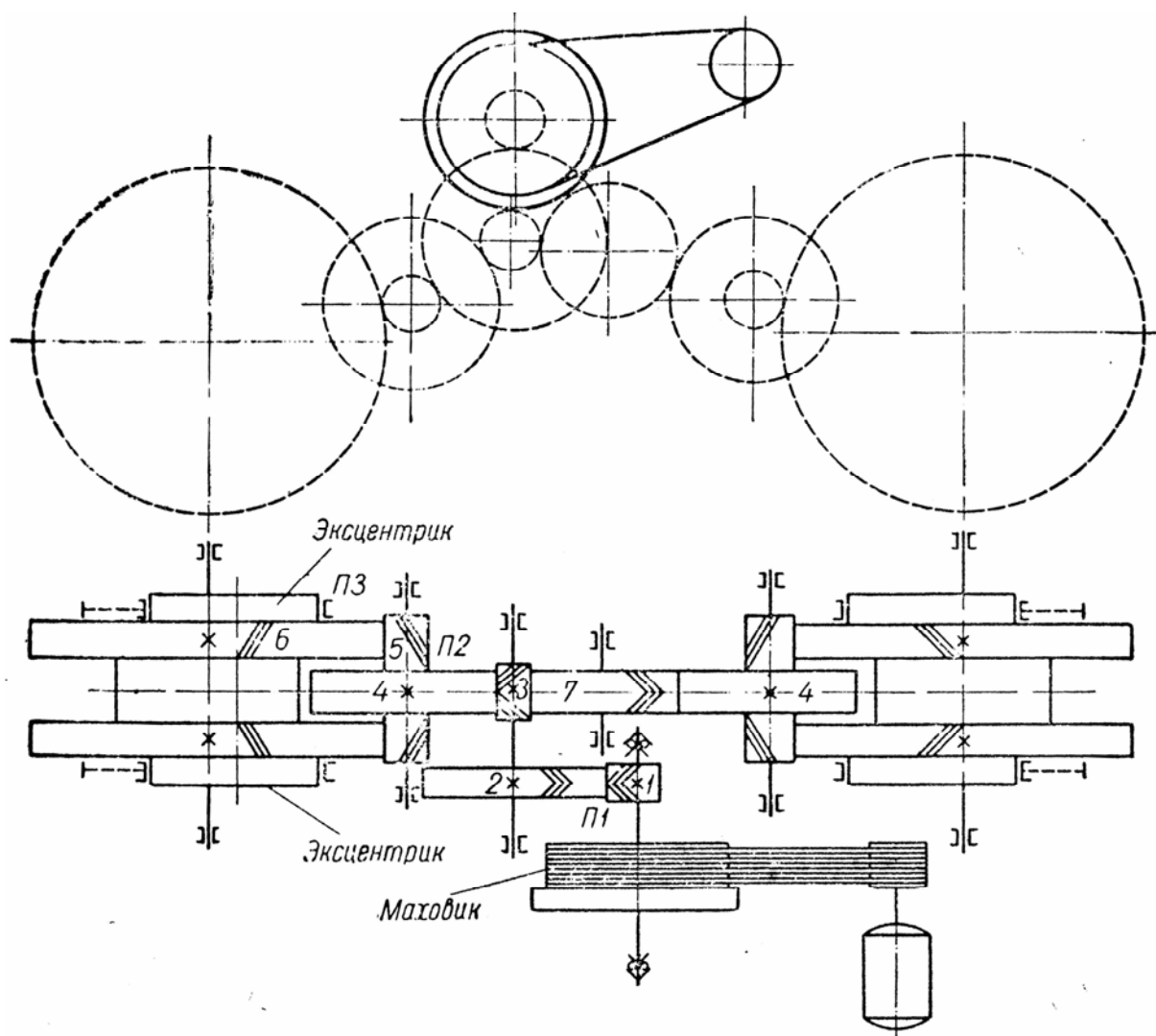


Рисунок 9 – Кінематична схема передач механічного ексцентрикового преса

Робота преса виглядає наступним чином. Перед операцією витяжки (пресування) головний двигун та маховик обертаються вхолосту. Після того як

заготовку покладено на стіл система двигун – маховик за допомогою муфти з'єднується з механізмом. Повзун, опускаючись виконує витяжку (пресування) заготовки, після чого піднімається у початкове положення За  $10^0$  до вихідного положення ексцентрика муфта вимикається і гальма зупиняють механізм. При цьому в циліндри пневматичних врівноважувачів  $\delta$  повзуна подається стисле повітря. Під час паузи з пресу достають готовий виріб та закладають нову заготовку.

На пресі встановлено асинхронний короткозамкнений двигун з підвищеним ковзанням типу 4AC250S4У3, дані якого представлені у розділі 3. По даних, зазначених у [8], побудовано залежність моменту статичного навантаження від кута повороту КШМ преса (рис. 10). Максимальний момент двигуна, виходячи з допустимого перевантаження у 2,2 рази, складає 830 Нм. Як видно з графіка моменту, моменту двигуна недостатньо для покриття всього навантаження. Тому на пресах з КШМ як правило встановлюють додатковий маховик. За рахунок кінетичної енергії маховика покривається все інше навантаження.

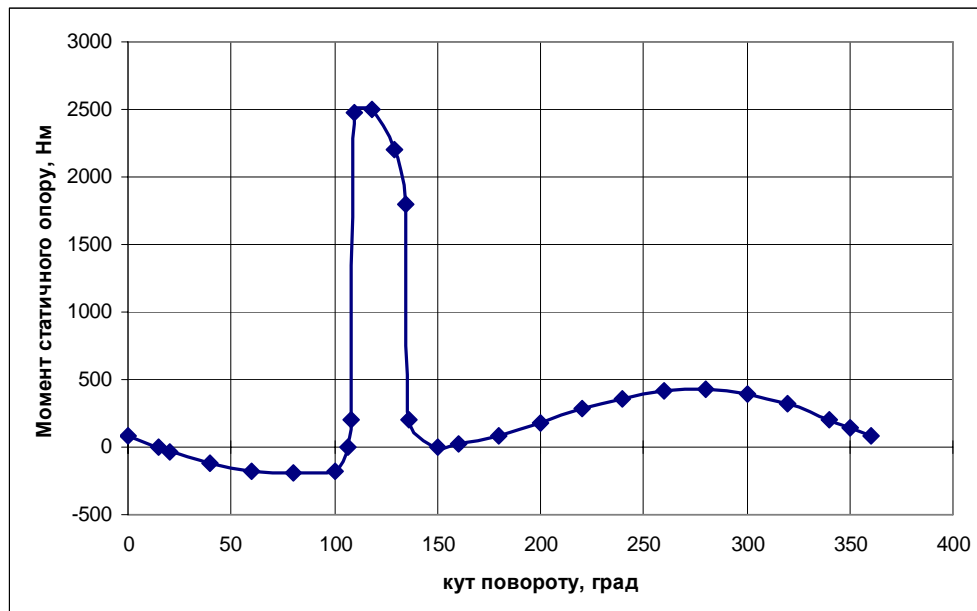


Рисунок 10 – Момент статичного опору ексцентрикового пресу 600 тон

Як визначено в [8] зведений момент інерції розподілений наступним чином:

- загальний зведений до валу двигуна момент інерції системи – 30,25 кгм<sup>2</sup>;
- момент інерції двигуна – 1 кгм<sup>2</sup>;
- момент інерції системи двигун-маховик – 27,75 кгм<sup>2</sup>;
- момент інерції інших елементів кінематичної ланки – 1,5 кгм<sup>2</sup>.

В нашому випадку ми маємо систему в якій за рахунок великого передатного числа від кривошипа до валу двигуна загальний момент інерції всіх складових кривошипа в порівнянні з моментом інерції маховика достатньо малий і складає трохи більше 5 %. Тому коливання моменту інерції не впливають на процеси в електромеханічній системі.

Визначимо час дії моменту статичного навантаження. У технічній характеристиці пресу вказано, що повзун здійснює 7,4 хода за 60 секунд (1 хв). Значить час одного ходу становить:

$$t_x = \frac{60}{7,4} = 8,1 \text{ с.}$$

За один хід кривошип здійснює один оберт, тобто повертається на  $360^\circ$ . Тому час дії моменту дорівнює:

$$t_M = t_x \frac{\varphi_M}{360} = 8,1 \frac{150 - 106}{360} = 1 \text{ с,}$$

де  $\varphi_M$  - кут дії моменту навантаження.

Таким чином, одна технологічна операція продовжується лише 1 секунду.

## **2. ОБГРУНТУВАННЯ ЗАКОНІВ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КРИВОШИПНО-ШАТУННИХ МЕХАНІЗМІВ НА ПРИКЛАДІ КОВАЛЬСЬКОГО ПРЕСУ**

### **2.1 Характеристика електроприводу ковальського пресу з КШМ**

Для електропривода головного вала преса, як правило, використовують асинхронні електродвигуни. При потужності двигуна до 75 кВт обирають асинхронні короткозамкнені двигуни, більше 75 кВт – асинхронні двигуни з фазним ротором. Інші типи двигунів майже не використовуються. При потужності двигуна вище 200 кВт і відсутності маховика можуть бути використані синхронні двигуни, що забезпечують сталу швидкість обертання при достатньо великому значенні зміни статичного моменту. Також у сучасних розробках можуть бути використані синхронні двигуни із збудженням від постійних магнітів та безпосереднім зв'язком валу двигуна з головним валом пресу.

Характерною особливістю ковальських пресів з КШМ є різкопіковий характер зміни навантаження. Пік навантаження може перевищувати критичний момент у рази та десятки разів. Але при цьому тривалість цього навантаження достатньо мала – від сотих доль секунди до 1-2 секунд. і відповідає незначній частині оберту вала кривошипа - до 60 градусів. Момент змінюється за гармонійним законом, як описано вище. Форма моменту зображена на рис 10.

Для того щоб за такий короткий проміжок часу двигун не зупинився на прес встановлюють додатково маховик. Таким чином збільшують запас кінетичної енергії, який витрачається на підтримання швидкості при навантаженні.

Оскільки в пресі використовується КШМ, частина зведеного до валу двигуна моменту інерції носить змінний характер у відповідності до матеріалу, викладеного вище. Але в порівнянні з повним моментом інерції, який в



основному складається з моменту інерції маховика, ця частина достатньо мала і складає 5-10 % від загального значення [15, 16]. Тому в розрахунках зведений момент інерції вважають величиною сталою.

В роботі електропривода пресу з КШМ можна виділити три етапи:

- розгін електродвигуна з маховиком до номінальної швидкості на холостому ході. Моментом навантаження є момент сил тертя;
- робота на холостому ході з усталеною швидкістю;
- відпрацювання імпульсу навантаження.

Процес пуску привода носить зтяжний характер, так як момент інерції достатньо великий. Для більшості пресів з КШМ зведений до валу двигуна момент інерції маховика в 20-70 разів більше за момент інерції двигуна [15, 16]. За таких умов при пуску виділяється багато тепла, що може призвести до перегрівання та виходу з ладу двигуна. Фактично час розгону не повинен перевищувати 8-10 с для асинхронних короткозамкнених двигунів нормальної серії та 15-18 с для двигунів з підвищеним ковзанням.

Робота на холостому ході відбувається після розгону або після відпрацювання чергового навантаження. В цьому режимі двигун навантажений лише силами тертя.

При відпрацюванні навантаження виникає падіння швидкості обертання двигуна і маховика. При цьому маховик віддає частину своєї енергії для утримання швидкості обертання. При конструюванні пресів та визначенні габаритів маховика виходять з середнього падіння швидкості 15-20% від номінальної. Розподіл роботи між двигуном та маховими масами при ударі навантаження залежить від нахилу механічної характеристики двигуна. Відносно м'яку характеристику мають асинхронні короткозамкнені двигуни з підвищеним ковзанням або асинхронні двигуни з фазним ротором. Причому в останніх необхідне ковзання може бути встановлено введенням в ротор додаткового опору необхідної величини.

Зниження швидкості під час накиду навантаження повинно бути таким, щоб махові маси віддали достатньо енергії для виконання роботи і щоб двигун

при цьому не був перевантажений при зниженій швидкості обертання. В той же час двигун повинен бути спроможним розвивати достатній момент для розгону і накопичення маховиком енергії. Саме для таких умов підходять асинхронні двигуна з підвищеним ковзанням. У яких критичне ковзання може сягати більше 50% [4, 6].

При дослідженнях встановлено, що накопичення та віддача кінетичної енергії на початкових етапах відбувається більш інтенсивно. Наприклад, при зниженні швидкості на 10% від номінальної робочої маховик віддає 19% запасу енергії, а при зниженні на половину майже 75% енергії. На практиці намагаються не припускати падіння швидкості двигуна та маховика більше ніж на 20-25%.

## 2.2 Енергетика електроприводу ковальського пресу з КШМ

Як було зазначено у попередньому розділі, в роботі електропривода пресу з КШМ можна виділити три етапи:

- розгін електродвигуна з маховиком до номінальної швидкості на холостому ході;
- робота на холостому ході з усталеною швидкістю;
- відпрацювання імпульсу навантаження.

Розглянемо визначення втрат енергії електропривода при його роботі в режимі безпосереднього живлення від мережі та від перетворювача частоти. За таких умов втрати енергії в електроприводі можна визначити наступним чином [10, 11, 14]. Втрати енергії при розгоні асинхронного нерегульованого електропривода з кз ротором від нульової швидкості до деякої швидкості  $\omega$  визначаються як:

$$\Delta A_P = J_{\Sigma} \frac{\omega^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) = J_{\Sigma} \frac{\omega^2}{2} + J_{\Sigma} \frac{\omega^2}{2} \frac{R_1}{R_2'}$$

де  $J_{\Sigma}$  - загальний зведений до валу електропривода момент інерції;

$R_1$  – опір обмотки статора двигуна,  $R'_2$  – зведений опір обмотки ротора.

В наведеному виразі складова  $J_{\Sigma} \frac{\omega^2}{2}$  відповідає втратам енергії в роторі,

а складова  $J_{\Sigma} \frac{\omega^2}{2} \frac{R_1}{R'_2}$  втратам енергії в статорі.

Для регульованого електроприводу з використанням перетворювача частоти (ПЧ) втрати енергії можуть бути визначені наступним чином:

$$\Delta A_{P\Pi\text{Ч}} = J_{\Sigma} \frac{\omega^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) \frac{2T_M}{t_P},$$

де  $t_P$  – час розгону до заданої швидкості;

$T_M$  – електромеханічна стала часу електропривода.

Для асинхронного двигуна  $T_M$  визначається за наступною формулою[ ]:

$$T_M = J_{\Sigma} \frac{\omega_H s_H}{M_H},$$

де  $s_H$  – номінальне ковзання двигуна;

$M_H$  – номінальний момент;

$\omega_H$  - номінальна швидкість двигуна.

Як видно з наведених формул при розгоні від датчика інтенсивності з використанням ПЧ можна значно знизити втрати електропривода при пуску. Враховуючи, що при інтенсивній роботі преса розгін відбувається не часто і час розгону практично не впливає на загальну тривалість роботи, час пуску можна дещо збільшити.

Втрати потужності та енергії в статорі та роторі трифазного АД можна також визначити через струми статора та ротора:

втрати потужності:

$$\Delta P = 3I_2'^2 R_2' + 3I_1^2 R_1 = M\omega_0 s \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right);$$

де  $I_1, I_2'$  – струм статора та зведений струм ротора;

$M$  – момент двигуна при відповідному ковзанні  $s$ ;

$\omega_0$  - швидкість ідеального холостого ходу двигуна.

втрати енергії:

$$\Delta A = \int_0^t (3I_2'^2 R_2' + 3I_1^2 R_1) dt = \int_0^t M\omega_0 s \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) dt,$$

де  $t$  – час дії навантаження.

Аналіз наведених формул показує, що для зменшення втрат при збільшенні навантаження необхідно тримати на одному рівні ковзання  $s$ . В такому випадку втрати будуть пропорційні лише моменту навантаження.

При безпосередньому живленні двигуна від мережі і накиді навантаження швидкість ідеального холостого ходу залишається незмінною оскільки частота напруги мережі незмінна. Але швидкість ротора зменшується під впливом навантаження, а ковзання збільшується. Втрати зростають.

Якщо використати перетворювач частоти для живлення двигуна і при накиді навантаження із зменшенням частоти обертання ротора зменшувати вихідну частоту живлячої двигун напруги, то можна значення ковзання утримувати на постійному рівні. Тобто різниця між швидкістю ідеального холостого ходу та швидкістю ротора буде постійна.

### 2.3 Система частотного керування швидкістю електропривода ковальського пресу з КШМ

Виходячи з аналізу енергетики електроприводу, проведеному в розділі 2.2, можна визначити наступні властивості системи керування електроприводом пресу з КШМ:

- плавне регулювання швидкості під час розгону електропривода;
- підтримання постійного ковзання під час виконання технологічної операції (пресування).

На рис. 11 наведено функціональну схему частотно керованого електропривода, яка реалізує необхідні вимоги. Розглянемо їх реалізацію.

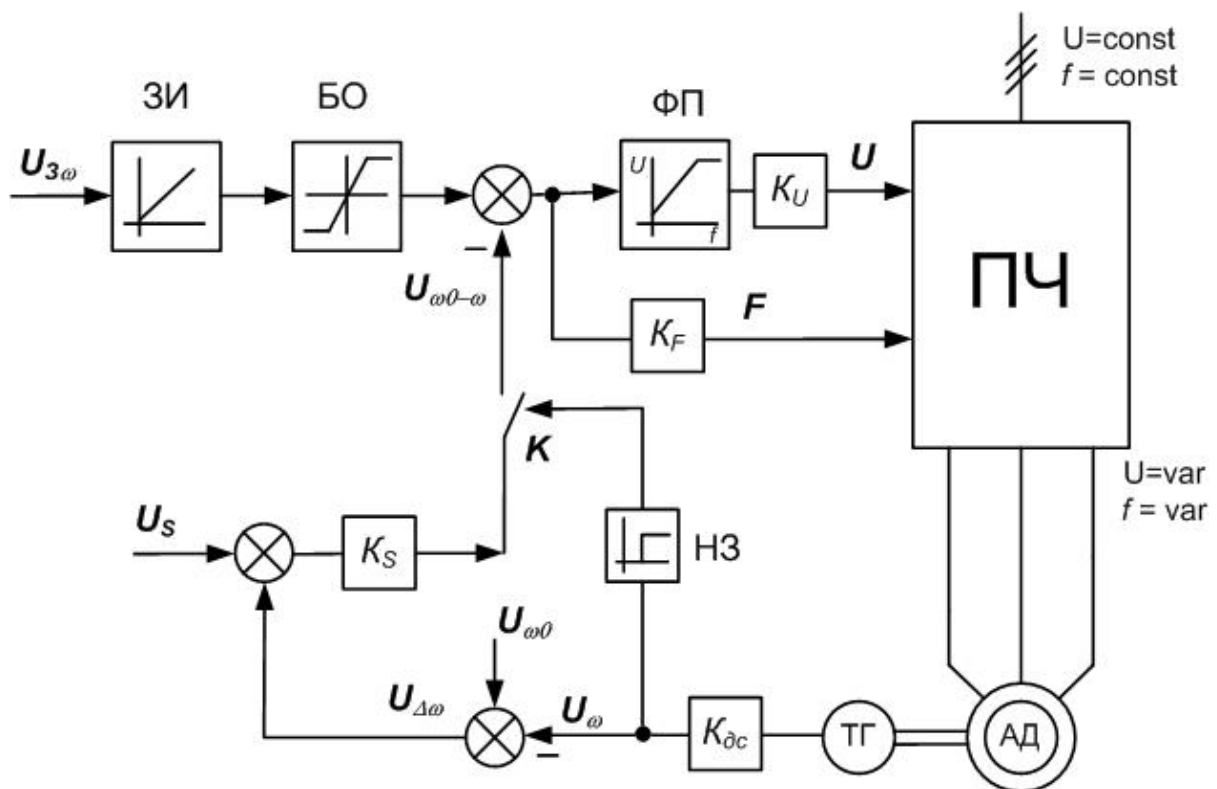


Рисунок 11 – Функціональна схема асинхронного електроприводу з частотним керуванням швидкості

Оскільки величина моменту навантаження пресу при виконанні технологічної операції не залежить від швидкості обертання і на інтервалі дії його можна вважати постійним, то для регулювання швидкості в таких

випадках використовують закон частотного керування  $U/f = const$  (при  $M_C = const$ ) [1, 9, 13]. Для плавної зміни вихідної частоти та напруги використовується задатчик інтенсивності  $ЗИ$ , вихід якого обмежується блоком обмеження  $БО$ . Вихід задавача інтенсивності подається в канали завдання напруги та частоти для перетворювача. Сигнал завдання в сигнал напруги перетворюється за допомогою функціонального перетворювача  $\PhiП$  та коефіцієнта підсилення  $K_U$ . Фактично  $\PhiП$  реалізує залежність напруги на виході перетворювача від заданої частоти  $F$ . Канал завдання частоти складається лише з пропорційного коефіцієнта, що визначає залежність між максимальним сигналом завдання та максимальною вихідною частотою.

Під час роботи пресу підтримання постійного ковзання необхідно лише під час штампування, в усіх інших режимах необхідності в цьому немає. Тому в запропонованій схемі реалізовано керування підключенням каналу керування ковзання. Підключення здійснюється ключем  $K$  під керування нелінійної ланки  $НЗ$ . Вихід  $НЗ$  встановлюється в одиницю в функції швидкості двигуна, після закінчення розгону. Канал підтримання ковзання працює наступним чином. Розраховується дійсне значення ковзання (сигнали напруги, пропорційний дійсному ковзанню):

$$U_{\Delta W} = U_{W0} - U_W ,$$

де  $U_{\Delta W}$  – напруга, пропорційна ковзанню,  $U_{W0}$  – напруга, пропорційна синхронній швидкості обертання,  $U_W$  – напруга, пропорційна дійсній швидкості обертання, вихід датчика швидкості.

Напруга, пропорційна ковзанню  $U_{\Delta W}$ , порівнюється з напругою, пропорційною, заданому ковзанню  $U_S$ . Різниця множиться на коефіцієнт датчика зворотного зв'язку за ковзанням  $K_S$ . Вихід датчика ковзання, при замкненому ключі  $K$ , порівнюється з сигналом завдання на напругу та частоту і різниця подається як саме сигнал завдання.

### 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНІВ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КРИВОШИПНО-ШАТУННИХ МЕХАНІЗМІВ НА ПРИКЛАДІ КОВАЛЬСЬКОГО ПРЕСУ

Дослідження режимів роботи електроприводу КШМ та законів частотного керування здійсимо на математичній моделі. Для проведення досліджень використаємо середовище *Simulink* математичного пакету MathLab. Для цього нам необхідно створити математичні моделі як двигуна, так і всіх необхідних додаткових елементів: навантаження, перетворювача, за датчиків тощо.

#### 3.1 Розробка математичної моделі

Для дослідження роботи асинхронного короткозамкненого двигуна (АД) при частотному керуванні підходить модель, яка може бути отримана представленням рівнянь АД в системі координат  $x$ - $y$ , пов'язаній дійсною віссю  $x$  з вектором напруги статора, яка обертається з синхронною швидкістю. Система координат  $x$ - $y$  є комплексною прямокутною системою координат, в якій вісь  $x$  дійсна, а вісь  $y$  – уявна та випереджає вісь  $x$  на  $90^\circ$ .

Вихідними рівняннями для побудови моделі будуть:

$$\bar{U}_s = \bar{I}_s R_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j\omega_c \bar{\Psi}_s,$$

$$\bar{U}_r = \bar{I}_r R_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_c - \omega Z)\bar{\Psi}_r.$$

$$\bar{\Psi}_s = \bar{I}_s L_s + \bar{I}_r L_m,$$

$$\bar{\Psi}_r = \bar{I}_s L_m + \bar{I}_r L_r,$$

де  $\bar{U}_s, \bar{I}_s, \bar{\Psi}_s$  – узагальнені вектори напруги, струму і потокозчеплення статора;  $\bar{U}_r, \bar{I}_r, \bar{\Psi}_r$  – узагальнені вектори напруги, струму і потокозчеплення статора ротора;  $R_s, R_r$  – активні опори статора і ротора;  $\omega_c$  – швидкість обертання системи координат;  $\omega$  – механічна швидкість обертання ротора;  $L_s, L_r, L_m$  – індуктивність статора, ротора і взаємна індуктивність статора і ротора відповідно;  $j = \sqrt{-1}$ ,  $Z$  – число пар полюсів.

Визначимо з рівнянь потокозчеплення струму статора і ротора.

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{\Psi}_s - \bar{I}_r L_m}{L_s},$$

$$\bar{I}_r = \frac{\bar{\Psi}_r - \bar{I}_s L_m}{L_r},$$

Виконаємо взаємну підстановку

$$\bar{I}_s = \frac{1}{L_s} \left( \bar{\Psi}_s - L_m \left[ \frac{\bar{\Psi}_r - \bar{I}_s L_m}{L_r} \right] \right)$$

Помножимо обидві частини рівняння на  $L_s L_r$ , і отримаємо наступний вираз:

$$\bar{I}_s = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\bar{\Psi}_s L_r - \bar{\Psi}_r L_m)$$

Аналогічно знайдемо струм ротора:

$$\bar{I}_r = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\bar{\Psi}_r L_s - \bar{\Psi}_s L_m)$$

Підставимо отримані рівняння для струму в перші два рівняння системи:



$$\bar{U}_s = R_s \left[ \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\bar{\Psi}_s L_r - \bar{\Psi}_r L_m) \right] + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j\omega_c \bar{\Psi}_s,$$

$$\bar{U}_r = R_r \left[ \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\bar{\Psi}_r L_s - \bar{\Psi}_s L_m) \right] + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_c - \omega Z) \bar{\Psi}_r.$$

Виконаємо заміну  $\frac{d}{dt} \rightarrow p$ , та попередньо представивши рівняння в формі Каші, отримаємо:

$$\bar{\Psi}_s = \frac{1}{p} \left[ \bar{U}_s - R_s \left( \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\bar{\Psi}_s L_r - \bar{\Psi}_r L_m) \right) - j\omega_c \bar{\Psi}_s \right],$$

$$\bar{\Psi}_r = \frac{1}{p} \left[ \bar{U}_r - R_r \left( \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\bar{\Psi}_r L_s - \bar{\Psi}_s L_m) \right) - j(\omega_c - \omega Z) \bar{\Psi}_r \right].$$

Розкладемо векторні рівняння за проекціями на осі  $x$ - $y$ :

$$\Psi_{sx} = \frac{1}{p} \left[ U_{sx} - R_s \left( \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\Psi_{sx} L_r - \Psi_{rx} L_m) \right) + \omega_c \Psi_{sy} \right]$$

$$\Psi_{sy} = \frac{1}{p} \left[ U_{sy} - R_s \left( \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\Psi_{sy} L_r - \bar{\Psi}_{ry} L_m) \right) - \omega_c \Psi_{sx} \right]$$

$$\Psi_{rx} = \frac{1}{p} \left[ U_{rx} - R_r \left( \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\Psi_{rx} L_s - \Psi_{sx} L_m) \right) + j(\omega_c - \omega Z) \Psi_{ry} \right]$$

$$\Psi_{ry} = \frac{1}{p} \left[ U_{ry} - R_r \left( \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (\Psi_{ry} L_s - \Psi_{sy} L_m) \right) - j(\omega_c - \omega Z) \Psi_{rx} \right]$$

Отримані вирази описують електромагнітні процеси в статорі і роторі. Для повноти опису додамо рівняння для моменту і рівняння механічного руху:

$$M = \frac{3}{2} Z \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} (\Psi_{sy} \Psi_{rx} - \Psi_{ry} \Psi_{sx})$$

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$$

Структурна схема моделі асинхронного двигуна для частотного керування при живленні від джерела напруги, побудована за наведеними рівняннями, представлена на рис. 12.

Для проведення розрахунків необхідно визначити параметри двигуна у абсолютних одиницях, а також розрахувати номінальні момент, струм, потокозчеплення. У табл. 2. наведені дані асинхронного короткозамкненого двигуна з підвищеним ковзанням [4, 6], який використовується у пресі, що розглядається.

Номінальний момент двигуна визначимо за формулою:

$$M_n = \frac{9,55 \cdot P_n}{n_0 \cdot (1 - s_n)}$$

де  $P_n$  – номінальна потужність електродвигуна; Вт;  $n_0$  – синхронна швидкість поля статора, об/хв;  $s_n$  – номінальне ковзання електродвигуна.

Номінальний фазний струм статора:

$$I_{\phi n} = \frac{P_n}{3 \cdot U_{\phi n} \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n}$$

де  $U_{\phi n}$  – номінальна фазна напруга двигуна; В;  $\eta_n$  – номінальний ККД двигуна;  $\cos \varphi_n$  – номінальний коефіцієнт потужності двигуна.

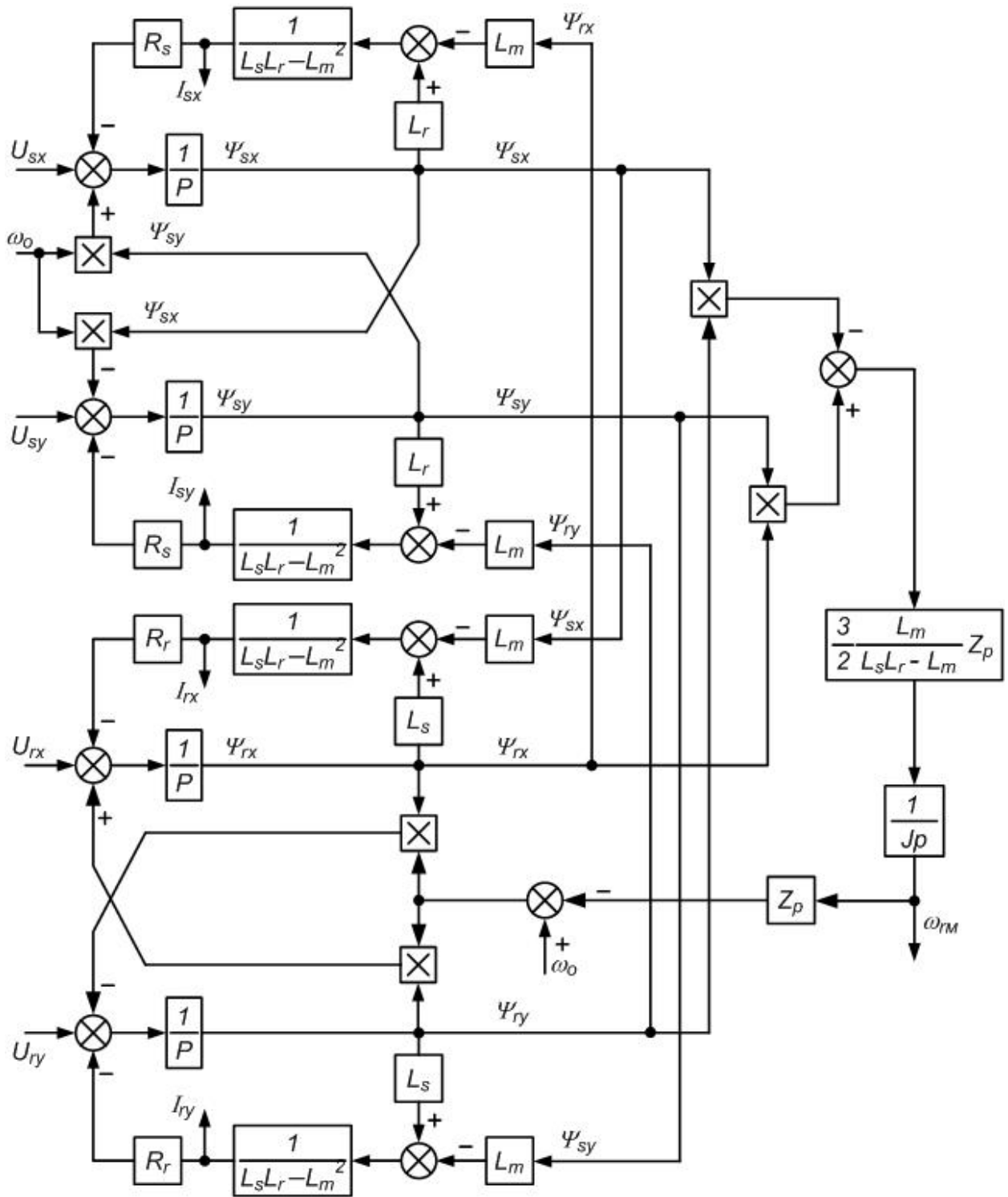


Рисунок 12 - Структурна схема асинхронного двигуна в системі координат  $x$ - $y$ , орієнтованій за вектором напруги статора

Номінальне потокозчеплення двигуна:

$$\Psi_H = \frac{M_H}{1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\phi H} \cdot Z_p \cdot K_r}$$

Таблиця 2 – Вихідні дані асинхронного двигуна

Тип двигуна	4AC250S4Y3
Номінальна потужність $P_n$ , кВт	56
Номінальна фазна напруга $U_{\phi n}$ , В	220
Номінальний ККД $\eta_n$	0,875
Номінальний $\cos \varphi_n$	0,92
Момент інерції $J$ , кг*м <sup>2</sup>	1,0
Число пар полюсів $Z_p$	3
Номінальне ковзання $s_n$	0,063
Критичне ковзання $s_K$	0,62
Активний опір статора $R_s^*$ , в.о.	0,02
Зведений активний опір ротора $R_r^*$ , в.о.	0,068
Індуктивний опір статора $X_s^*$ , в.о.	0,072
Зведений індуктивний опір ротора $X_r^*$ , в.о.	0,068
Індуктивний опір повітряного зазору $X_\mu^*$ , в.о.	3,6
Кратність пускового моменту $M_{\Pi}^*$ , в.о.	2,0
Кратність максимального моменту $M_{KP}^*$ , в.о.	2,2

Для переводу опорів з відносних одиниць в абсолютні скористаємося виразом:

$$Z = Z^* \cdot Z_B = Z^* \cdot \frac{U_{\phi n}}{I_{\phi n}}$$

де  $Z_B = \frac{U_{\phi n}}{I_{\phi n}}$  – базовий опір; Ом;  $Z^*$  – опір у відносних одиницях;  $Z$  –

шуканий опір, Ом.

Індуктивність розсіювання обмотки статора:

$$L_{s\sigma} = X_s / \omega_o,$$

де  $\omega_o = 2\pi f$  – кутова частота живлячої мережі, рад/с;  $f = 50$  Гц – номінальна частота живлячої мережі.

Індуктивність розсіювання обмотки ротора:

$$L_{r\sigma} = X'_r / \omega_0 .$$

Максимальна взаємна індуктивність між обмотками статора и ротора:

$$L_m = X_\mu / \omega_0 .$$

Повна індуктивність обмотки статора:

$$L_{1s} = L_{s\sigma} + L_m$$

Повна індуктивність обмотки ротора:

$$L_r = L_{r\sigma} + L_m .$$

Розраховані параметри двигуна зведені до табл. 3

Таблиця 3 – Дані двигуна 4AC250S4У3

Активний опір статора $R_s$ , Ом	0,04
Зведений активний опір ротора $R_r$ , Ом	0,142
Індуктивність обмотки статора $L_s$ , Гн	0,0244
Індуктивність обмотки ротора $L_r$ , Гн	0,0244
Індуктивність намагнічування $L_m$ , Гн	0,0239
Номінальний момент $M_n$ , Нм	380,5
Номінальний фазний струм $I_{\phi n}$ , А	105,4
Номінальне потокозчеплення $\Psi_n$ , Вб	0,866
Номінальна частота обертання $\omega_n$ , рад/с	147,8

### 3.2 Моделювання роботи електропривода та аналіз результатів

Модель двигуна в *Simulink*, яка побудована за приведеною вище структурною схемою, представлена на рис.13. Модель всієї системи електропривода та системи стабілізації ковзання на рис. 14.

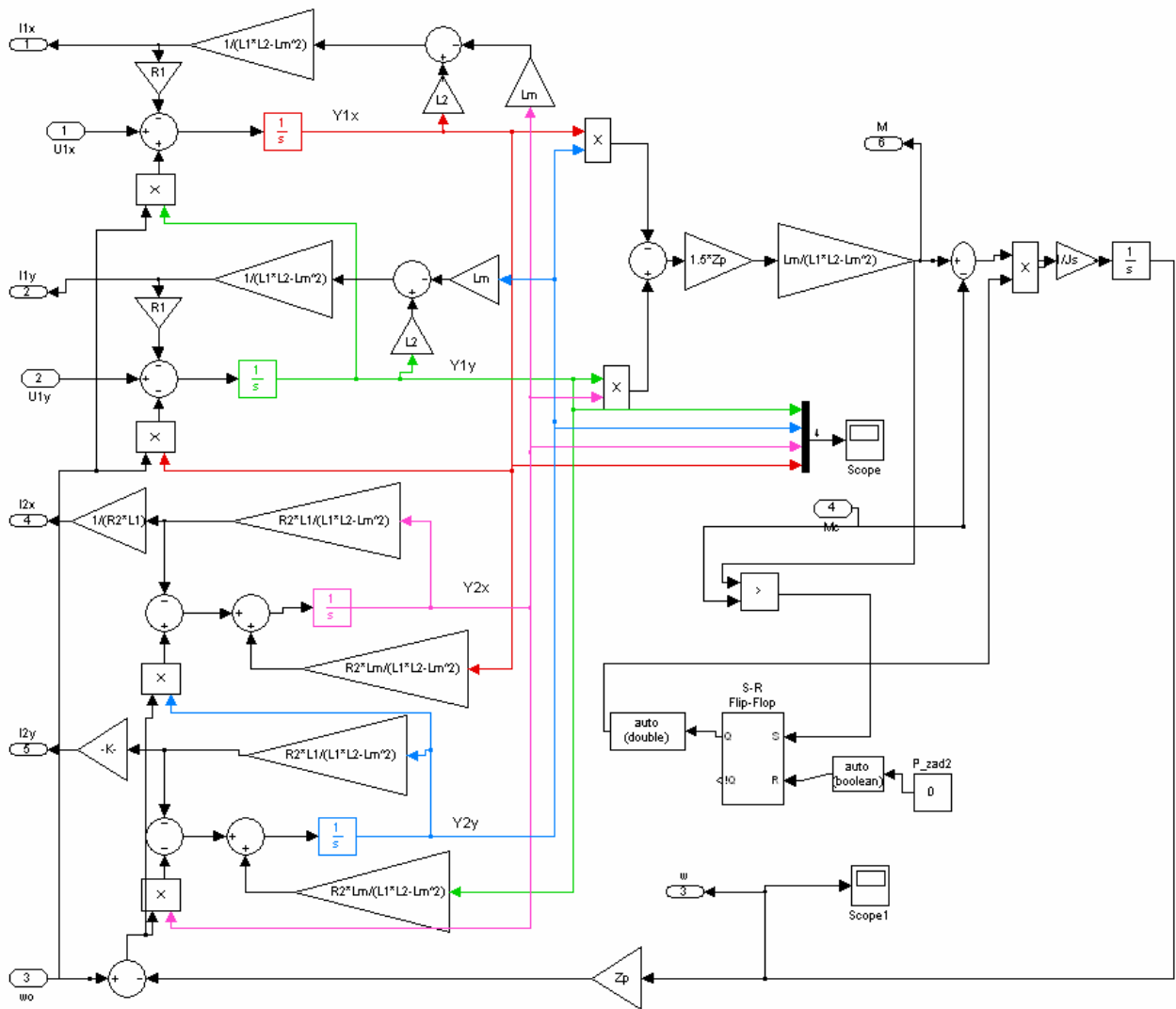


Рисунок 13 – Модель двигуна

Робота моделі в режимі частотного керування проходить наступним чином. Пуск двигуна здійснюється від за датчика інтенсивності *Ramp*, вихід якого обмежено на рівні максимального завдання. Далі вихід з блоків обмеження подається на вхід блоків *Uf*, *Ku*, *Kw*, які перетворюють вхідний сигнал завдання на сигнал напруги та частоти у відповідності до заданого співвідношення *Uf*. Саме співвідношення задається в блоці *Uf* каналу формування напруги. Перетворювач частоти вважається без інерційною ланкою. Сингали напруги та частоти подаються на відповідні входи блоку *AD*, в якому реалізовано модель двигуна у відповідності до структурної схеми, наведеної раніше. На вхід *Mc* подано сигнал моменту з блоку *Mc=f(y)*, який реалізує залежність моменту від часу (або кута повороту). Аналогічно

реалізовано введення значення зведеного моменту інерції системи на вхід  $Jct$ . З виходу блоку  $AD$  виводяться сигнали складових струмів статора та ротора за відповідними осями системи координат  $x$ - $y$ , момент та швидкість двигуна.

При досягненні номінальної швидкості через затримку часу підключається зворотній зв'язок за ковзанням. Від буде підключений доки система працює в циклічному режимі після розгону. Після зупинки зворотній зв'язок відключається і включиться тільки після наступного розгону. Включення здійснюється блоком  $RS$ -тригера  $RS Trig$ .

Оскільки характер роботи пресу циклічний, при моделюванні досліджувались два режими роботи:

- розгін АД з маховиком до номінальної швидкості;
- накид навантаження.

Дослідження проводились для двох випадків:

- живлення АД безпосередньо від мережі;
- живлення АД від перетворювача частоти.

При дослідженні знімалися наступні змінні електропривода:

- задана синхронна швидкість обертання  $W_{zad}$  та дійсна швидкість обертання ротора  $W$  (позначення відповідають позначенням на графіках);
- діючий фазний струм статора  $I_s$  та діючий фазний струм ротора  $I_r$ ;
- момент двигуна  $Md$ .

Оскільки модель двигуна побудована в системі координат  $x$ - $y$ , а за для розрахунку енергетичних втрат необхідні фазні значення струму, значення струмів в системі  $x$ - $y$  були перераховані в фазні значення за наступними формулами:

$$I_{s\phi} = \frac{\sqrt{I_{SX}^2 + I_{SY}^2}}{\sqrt{2}}, \quad I_{r\phi} = \frac{\sqrt{I_{RX}^2 + I_{RY}^2}}{\sqrt{2}}.$$

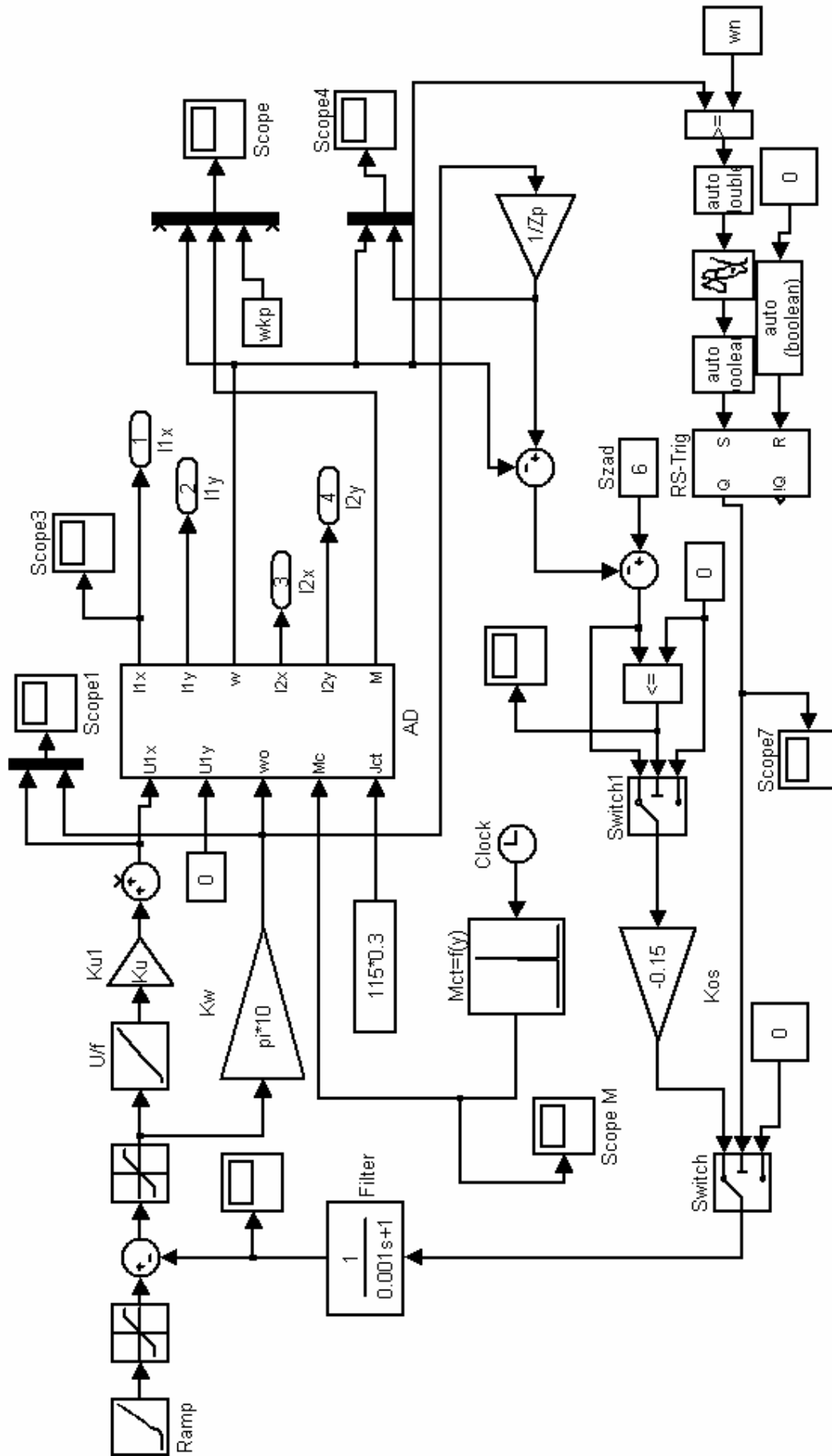


Рисунок 14 – Модель електропривода



На рис. 15 показані зазначені змінні при прямому пуску. Розгін відбувся за 9 секунд. При пуску струми сягнули значень більше ніж шестикратного значення по відношенню до номінального. Пусковий момент має значні коливання великої амплітуди, максимальна кратність середнього значення склала більшу 2,2.

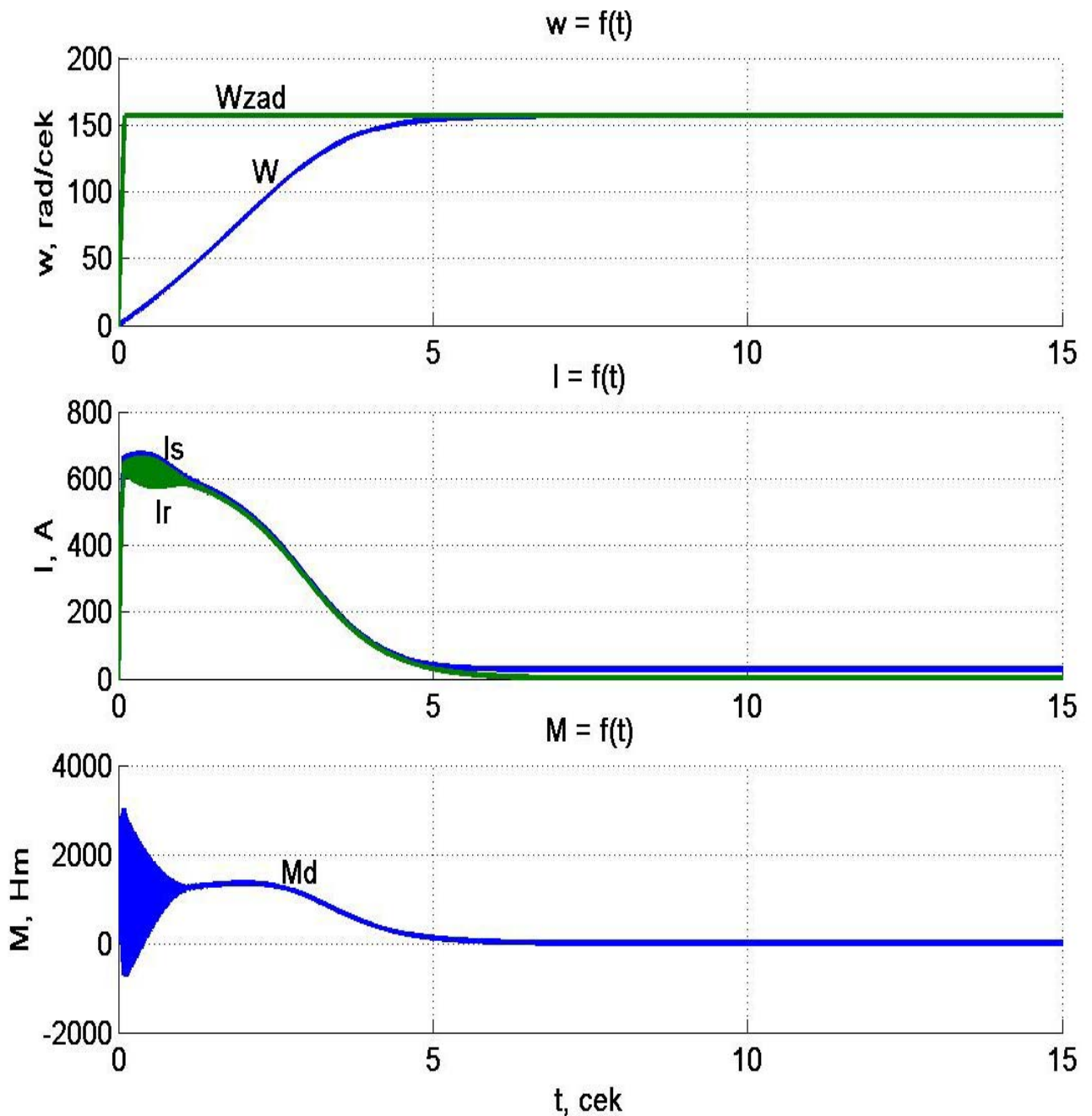


Рисунок 15 – Розгін електропривода у режимі прямого пуску

На рис. 16 показані змінні при пуску від за датчика інтенсивності при живленні від ПЧ. Розгін відбувся за 14 секунд. При пуску струми сягнули значення 1,5 по відношенню до номінального, 150 А. Максимальний момент склав 550 Нм при номінальному 380 Нм (кратність 1,45). Коливання моменту спостерігаються тільки на початковому етапі.

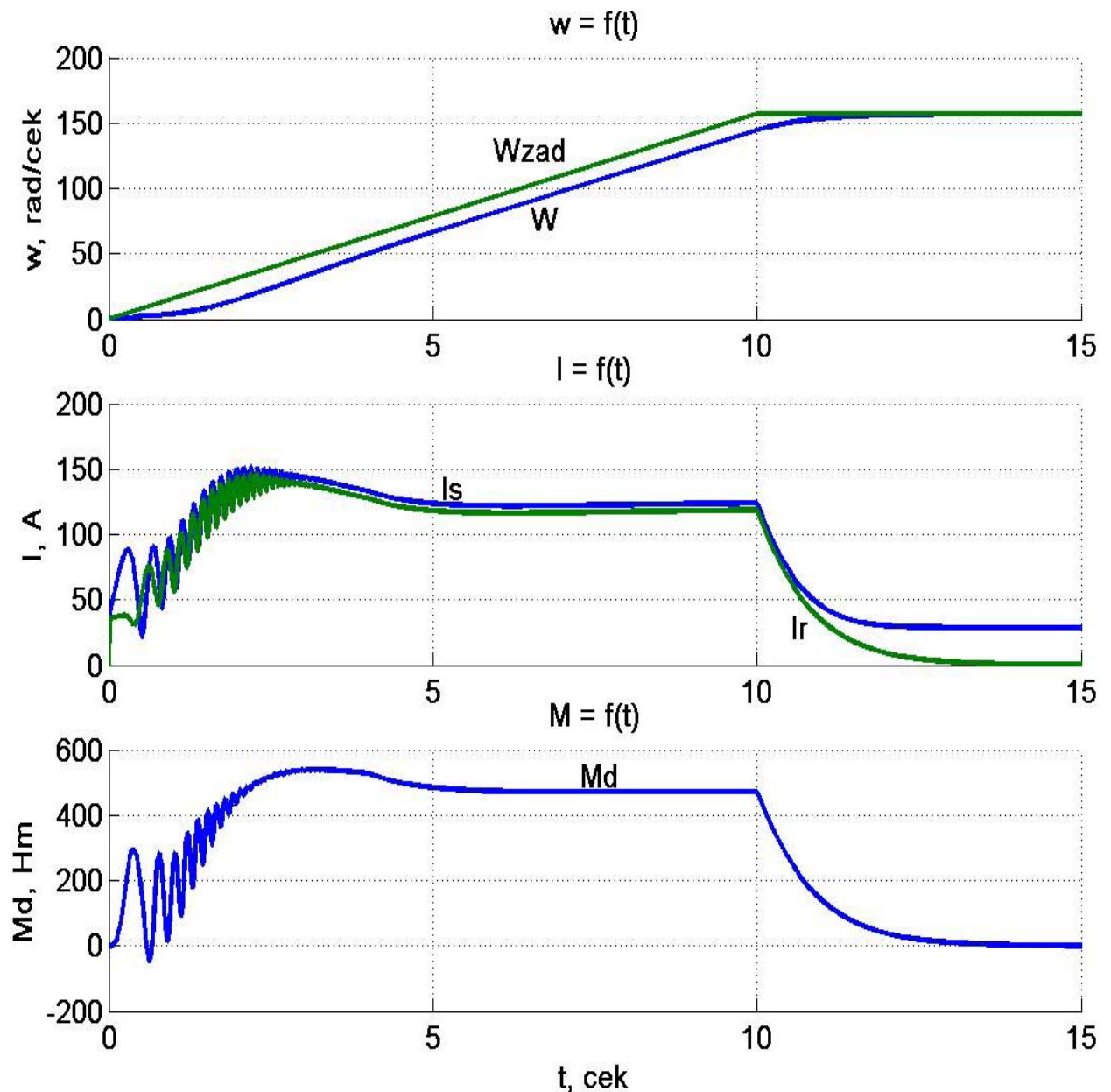


Рисунок 16 – Розгін електропривода при частотному керуванні від задатчика інтенсивності

Рис. 17 відображає відпрацювання накиду навантаження при прямому живленні від мережі. Навантаження відповідає рис. 10 в інтервалі від  $100^0$  до  $150^0$ , на інших інтервалах навантаження прийнято рівним 0. Навантаження діє 1с відповідно до розрахунку у розділі 1.3. Стала швидкість складала 157 рад/с (при відсутності будь-якого навантаження).

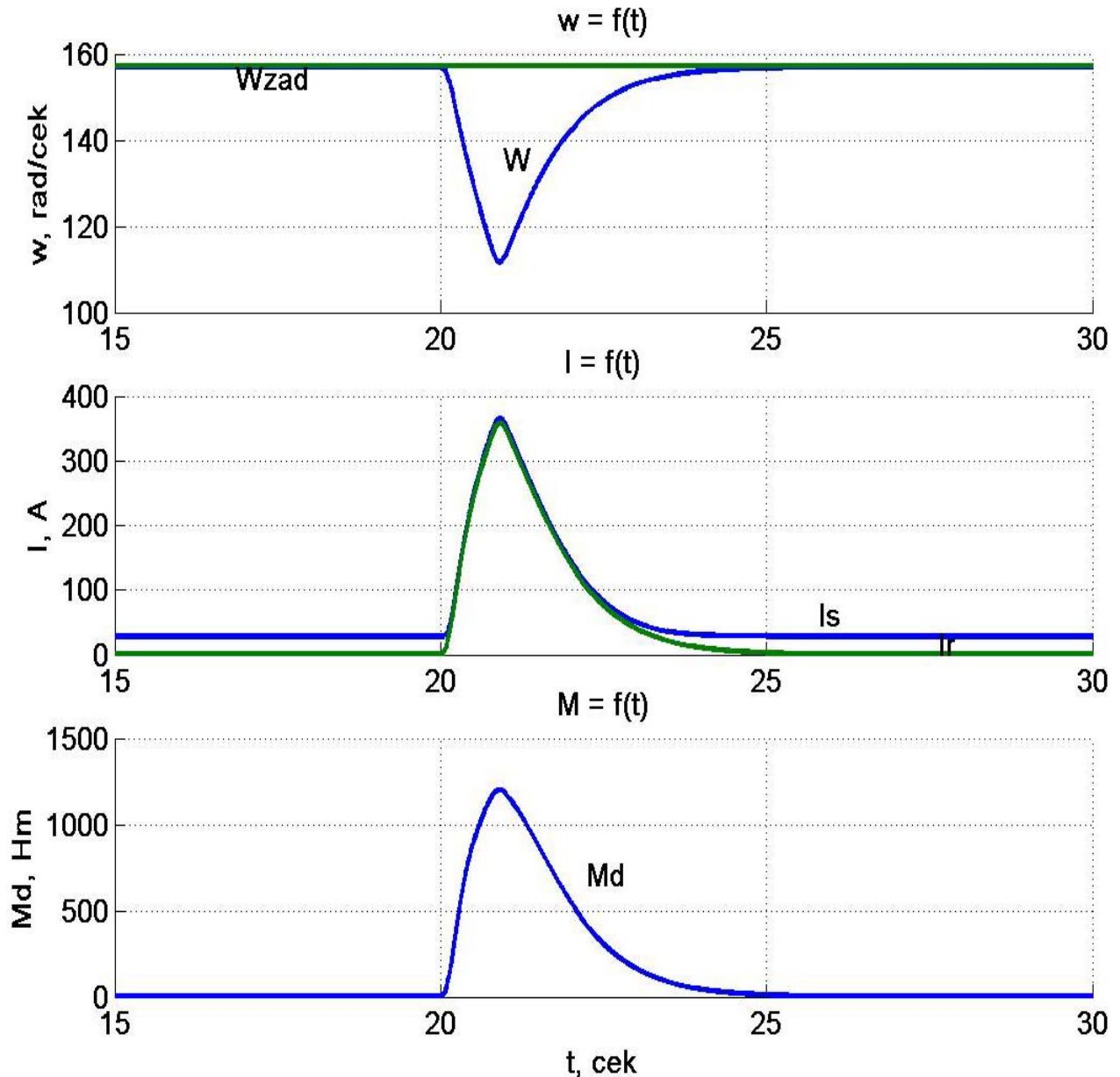


Рисунок 17 – Відпрацювання навантаження (технологічна операція) в режимі живлення від мережі

При накиді навантаження швидкість впала до 111,5 рад/с. При цьому струми сягнули значення в 360 ампер, момент більше 1000 Нм. Повне відновлення швидкості відбулося за 4 секунди.

При живленні від ПЧ і включеній системі підтримання ковзання швидкість при навантаженні впала до 100 рад/с (рис. 18). Максимальний струм склав 150 ампер, а момент 150 Нм. Як можна побачити з графіка швидкості системі стабілізації ковзання доволі точно підтримує задане ковзання. Час встановлення швидкості склав 7 секунд.

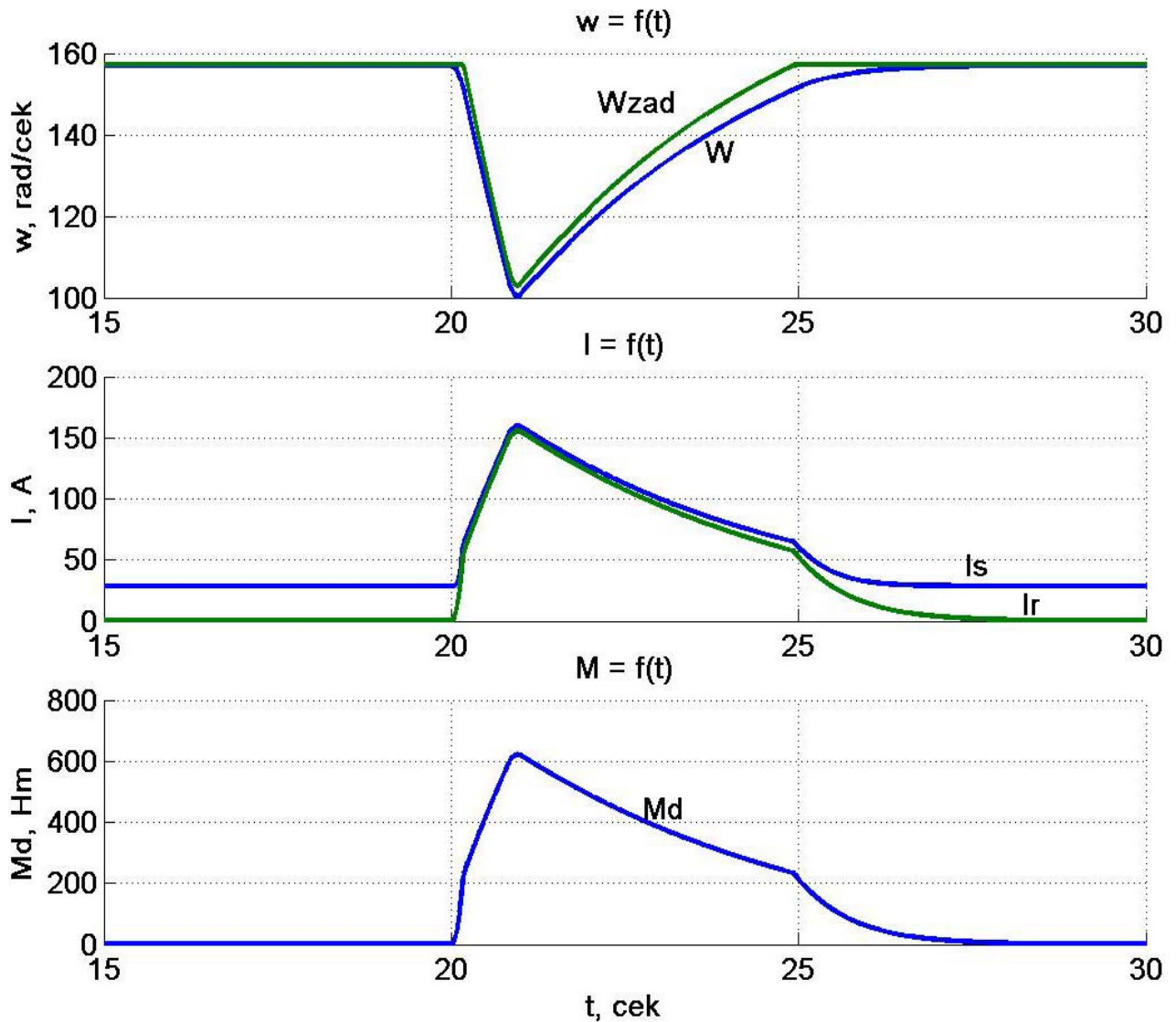


Рисунок 18 – Відпрацювання навантаження (технологічна операція) в режимі живлення від ПЧ ( $J_{\Sigma} = 30,25 \text{ кгм}^2$ )

На наступному графіку (рис. 19) показано попередній режим, але при зменшеному на 20% загальному зведеному моменту інерції. Значення моменту інерції склало  $J_{\Sigma} = 24,2 \text{ кгм}^2$ . При цьому швидкість впала до 88 рад/с, струму

сягнули значень 180 ампер, а момент 710 Нм. Час відновлення швидкості склав 7 секунд.

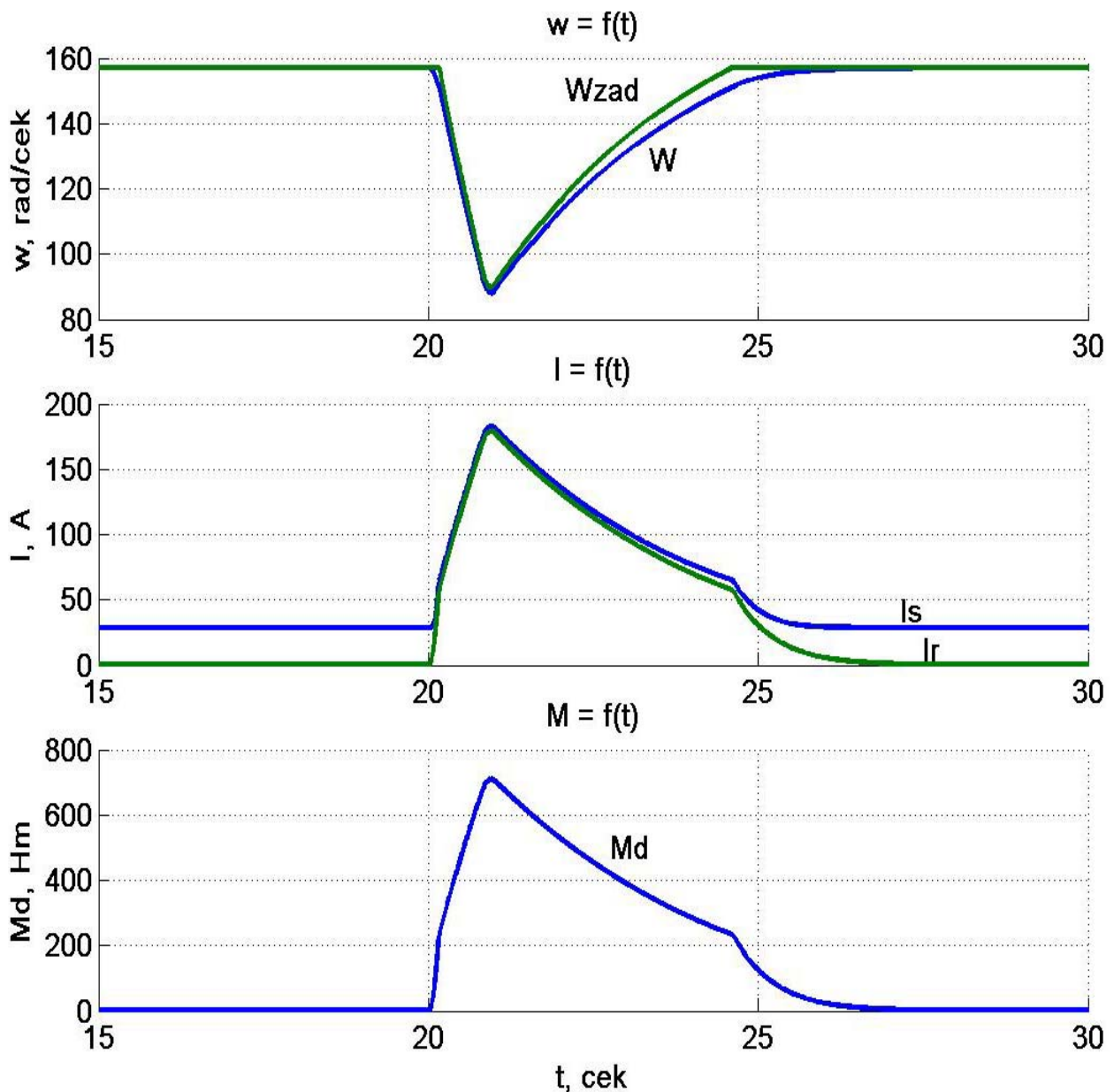


Рисунок 19 – Відпрацювання навантаження (технологічна операція) в режимі живлення від ПЧ ( $J_{\Sigma}=24,2 \text{ кгм}^2$ , зменшено на 20%)

Розрахунки енергетичних втрат для режимів розгону та накиду навантаження виконано за формулами, що представлені в розділі 2.2. Результати розрахунків зведено до табл. 4.

При розрахунку втрат енергії при накиді навантаження вважалось, що струм за час дії має трикутну форму (рис. 20). Тому середнє значення струму за

час дії визначалось як площа трикутника  $ABC$  ділена на час дії (основа  $AC$ ) або як максимальне значення струму (висота  $BD$ ) ділена на 2.

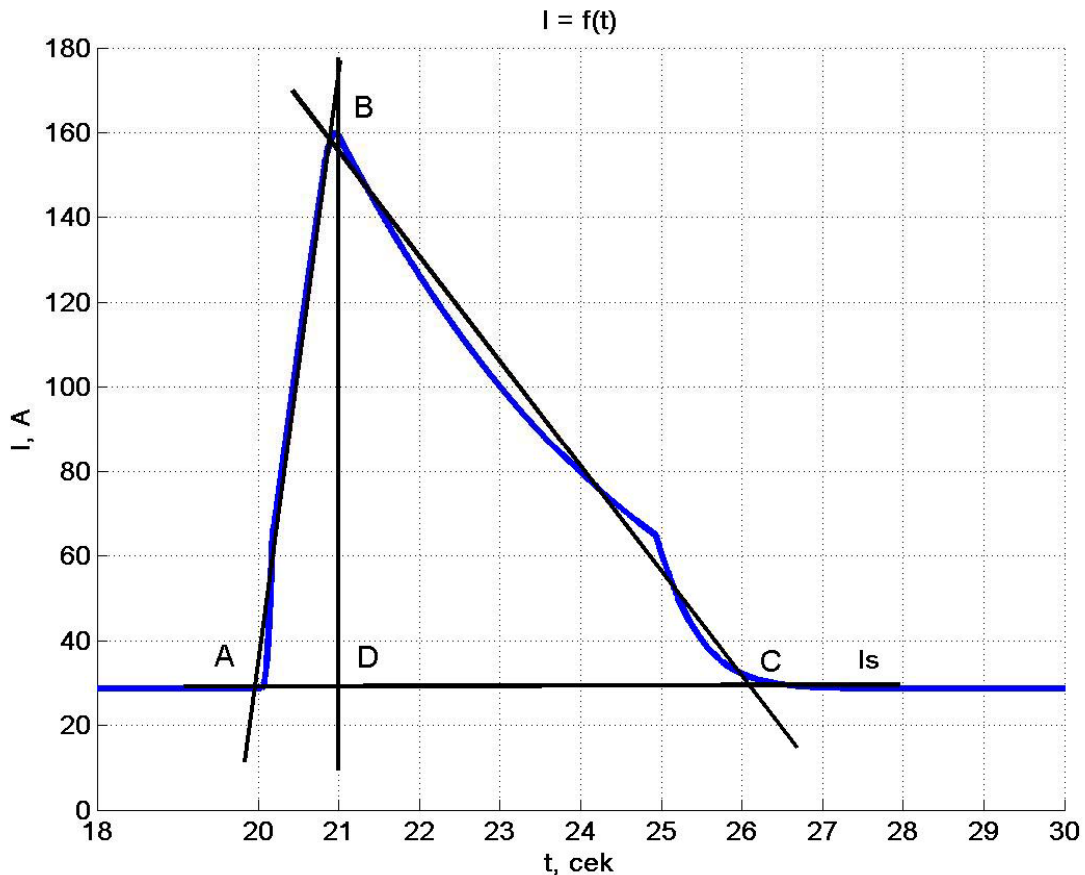


Рисунок 20 – До розрахунку струмів при визначенні втрат енергії

Результати моделювання та розрахунків втрат енергії зведені до табл. 4.

Як показують результати досліджень, при використанні системи стабілізації ковзання втрати в електроприводі зменшились майже у 2,5 рази. При цьому тривалість технологічної операції не змінилась. При зменшенні маси (моменту інерції) маховика на 20% втрати дещо зросли. Це пояснюється тим, що двигун віддає більше енергії, ніж в попередньому випадку. Падіння швидкості склало 69 рад/с. Час встановлення швидкості такий же, як і у попередньому випадку. Результати моделювання показують, що масу маховика можна зменшити, але треба дещо підвищити втрати в двигуні для зменшення рівня падіння швидкості.

Таблиця 4 – Результати досліджень						
			Робота від мережі ( $J_{\Sigma}=30,25 \text{ кгм}^2$ )	Робота від ПЧ ( $J_{\Sigma}=30,25 \text{ кгм}^2$ )	Робота від ПЧ ( $J_{\Sigma}=24,2 \text{ кгм}^2$ )	
Розгон		Час, с	9	14	14	
		Швидкість, рад/с	157	157	157	
		Втрати енергії, Дж	478319,4	50149,62	40119,7	
Накид навантаження	Струм статора ( $R_1=0,04 \text{ Ом}$ )	Максимальний, А	366	160	183	
		Мінімальний, А	28,7	28,7	28,7	
		Середній, А	168,65	65,65	77,15	
		Втрати потужності, Вт	3413,14	517,2	714,25	
		Час дії, с	3	7	6	
		Втрати енергії, Дж	10239,42	3620,4	4285,5	
	Струм ротора ( $R_2=0,142 \text{ Ом}$ )	Максимальний, А	358	155	179	
		Мінімальний, А	0	0	0	
		Середній, А	179	77,5	89,5	
		Втрати потужності, Вт	13649,47	2558,66	3412,37	
		Час дії, с	3	7	6	
		Втрати енергії, Дж	40948,4	17910,64	20474,2	
			Загальні втрати потужності, Вт	17062,6	3075,87	4126,61
			Загальні втрати енергії, Дж	51187,82	21531,09	24759,66
			Мінімальна швидкість, рад/с	111,5	100	88
			Час відновлення швидкості, с	4	7	7

### 3.3 Рекомендації до застосування закону частотного керування

Застосування законів частотного керування розглянемо стосовно режимів роботи, розгону та роботі при усталеній швидкості.

При розгоні можна скористатись звичайною лінійною залежністю  $U/f = U_H/f_H = const$  (лінія  $OD$  на рис. 21). Це дозволить плавно змінювати момент двигуна і плавно його розганяти. Але для більшої ефективності пуску і встановлення швидкості після накиду навантаження рекомендується використати залежність  $U/f$  у вигляді ламаної лінії  $ABCD$ . За рахунок того, що коефіцієнт співвідношення змінюється на різних інтервалах ми можемо впливати на процес розгону на різних його етапах (ділянках). Наприклад, на ділянці  $AB$  співвідношення  $U/f$  вибирають таким, щоб струм при пуску був менше номінального і короткочасно здійснювалось намагнічування двигуна. Попереднє намагнічування дозволить формувати більші моменти на подальшому етапі (рис.16).

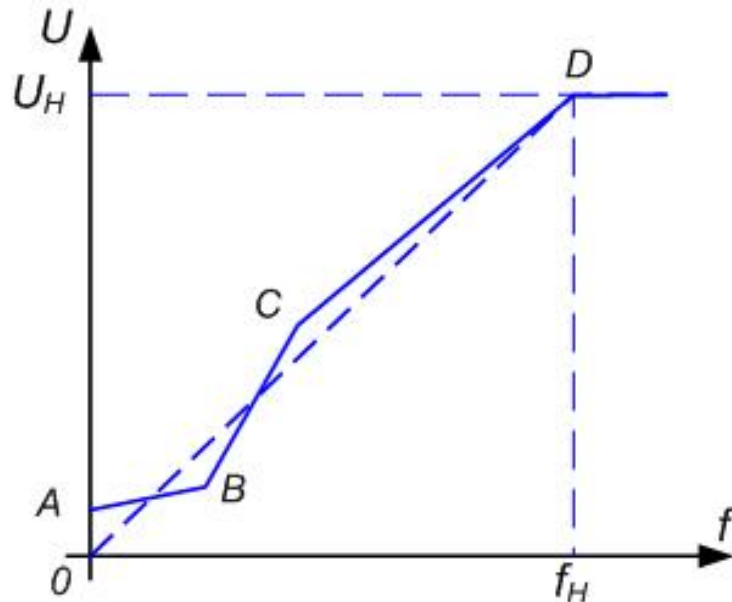


Рисунок 21 Закон частотного керування

Крива  $BC$  буде впливати на рівень формування максимального моменту при розгоні, а також на коливальність цього моменту під час виходу на



максимальне значення. Формування необхідного моменту під час початку пуску важливе при зрушування та розкручуванні махових мас.

Інтервал  $CD$  фактично може співпадати з стандартною залежністю  $U/f$ . Але при нахилі навантаження і використанні системи стабілізації ковзання положення точки  $C$  вище лінії  $OD$  дозволить сформувати більше початкове значення струму і відповідно моменту для відновлення швидкості.

Можливість реалізувати нестандартну залежність  $U/f$  реалізовано в багатьох комплектних частотних перетворювачах, наприклад в ПЧ серії АЛТИВАР [12]. Але саме вибір необхідної кривої повинен здійснюватись безпосередньо на об'єкті.

При налагодженні ланки стабілізації ковзання слід пам'ятати, що малій коефіцієнт зворотного зв'язку знижає ефективність роботи системи. Занадто великий коефіцієнт приведе до того, що на деякому етапі частота живлячої напруги стане менше частоти обертання. Це означає що машина перейде у режим гальмування і падінні швидкості при нахилі навантаження буде більшим. Рекомендований діапазон зміни коефіцієнта 0,1-0,2.

## Висновки

В результаті виконання роботи був проведений аналіз властивостей кривошипно-шатунного механізму як елемента електромеханічної системи.

Розглянуто використання кривошипно-шатунного механізму у складі ковальського пресу.

Проведено аналіз систем електропривода для кривошипно шатунних механізмів ковальських пресів, розглянуто енергетику електропривода.

Запропоновано систему стабілізації ковзання при роботі преса у робочому режимі. Система призначена для зменшення втрат в електроприводі і тим самим підвищення його ефективності.

Розроблено математичну модель електропривода кривошипно-шатунного механізму ковальського пресу, проведено математичне моделювання. Доведено працездатність запропонованих рішень.

Система стабілізації ковзання дозволяє зменшити втрати в електроприводі майже в 2,5 рази. Також можливе зменшення маси маховика з незначним погіршенням характеристик пресу.

Надано рекомендації що до використання закону частотного керування для електропривода кривошипно-шатунного механізму ковальського пресу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Казачковський М.М. Комплектні електроприводи: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ: НГА України, 2003. – 225 с.
2. Казачковський М.М. Керовані випрямлячі: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ: НГА України, 1999. – 227 с.
3. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
4. Справочник по электрическим машинам. В 2-х т./Под. ред. И.П. Копылова и В.К. Клокова - М: Энергоатомиздат, 1988. т.1. -655 с.; т.2. -496 с.
5. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. -616 с.
6. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
7. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – М.-Л., Госэнергоиздат, 1963. – 772 с.
8. Васильев Н.Н., Дробязко С.Ф. Сборник задач по основам электропривода. – Киев, Гостехиздат УССР, 1962. – 225 с.
9. Башарин А.В., Голубев Ф.Н., Кепперман В.Г. Примеры расчетов автоматизированного электропривода. – Л., Энергия, 1971. – 440 с.
10. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
11. Колб Ант. А., Колб А.А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник – Д., Національний гірничий університет, 2006. – 511 с.
12. [www.schneider-electric.ua](http://www.schneider-electric.ua) ALTIVAR 71 Преобразователи частоты. Инструкция по программированию, 2011 г.
13. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
14. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л.Г. Мамиканянца – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984 – 240 с.

15. Харизоменов И.В. Электрооборудование кузнечно-штамповочных машин. – М., Высш. школа, 1970 – 185 с.
16. Электрооборудование кузнечно-прессовых машин. Справочник / В.Е. Стоколов, Г.С. Усышкин, В.М. Степанов – М., Машиностроение, 1981 – 304 с.
17. Ковочно-штамповочный механический пресс К864 усилием 1600 тонн. Паспорт. Челябинский завод им. С. Орджоникидзе. – 39с.
18. Прессы однокривошипные открытые двухстоечные простого действия ненаклонные усилием 1000 кН. Модели К2130В, К1430Б. – Инструкция по эксплуатации. – Барнаульский завод механических прессов. -110 с.
19. Пресс кривошипный двухстоечный закрытый двойного действия усилием 63 тонны Модель К-460. – Руководство к прессу. – Одесский завод прессов. -54 с.