

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний аграрний університет
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

Допущений до захисту:
В. о. завідувача кафедри
к. т. н., доц. Видмиш А.А.
(вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (Підпис)
“ ____ ” _____ 2020 р.

ОБґРУНТУВАННЯ І РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ
ЛИСТОПРАВИЛЬНОЇ МАШИНИ ДЛЯ ВИПРЯМЛЕННЯ ТА РАДІУСНОГО
ГНУТТЯ ЛИСТІВ МЕТАЛУ НА ПІДПРИЄМСТВАХ З РЕМОНТУ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 141 – Електроенергетика,
електротехніка і електромеханіка

Виконав: студент групи ЕІ-19-Мз
БОГАЧУК Максим Юрійович

_____ (підпис)

Керівник: к. т. н., доцент
Ярошенко Леонід Вікторович

_____ (підпис)

Зміст

Завдання на магістерську роботу	2
АНОТАЦІЯ	6
ВСТУП	6
Розділ 1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ВИМОГИ ДО ЙОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ	10
1.1 Загальна характеристика механізму	10
1.2 Конструктивні особливості листопривильних машин. Кінематична схема листопривильної машини ЛПМ 2300	13
1.3 Вимоги, що висуваються до електроприводів прокатних станів	21
Розділ 2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА	24
Розділ 3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	29
3.1 Порівняння систем електроприводів	29
3.2 Вибір принципу векторного керування	31
Розділ 4 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА	35
Розділ 5 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ПАРАМЕТРІВ	42
5.1 Визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна	42
5.2 Побудова статичної характеристики асинхронного двигуна	49
5.3 Розрахунок динамічних параметрів двигуна	50
5.4 Математичний опис і динамічна модель асинхронного двигуна як узагальненої електричної машини в двофазній системі координат	52
5.5 Аналіз роботи асинхронного двигуна на базі моделі в нерухомій відносно статора системі координат ($\alpha - \beta$)	58
5.5.1 Модель асинхронного двигуна в системі координат ($\alpha - \beta$)	58
5.5.2 Побудова перехідних функцій асинхронного двигуна на базі моделі в системі координат ($\alpha - \beta$)	60
5.6 Аналіз роботи асинхронного двигуна на базі моделі в системі координат ($d - q$), яка обертається з частотою обертання ротора	66

5.6.1	Модель асинхронного двигуна в системі координат (d – q)	66
5.6.2	Побудова перехідних функцій асинхронного двигуна на базі моделі в системі координат (d – q)	69
5.7	Математична модель асинхронного двигуна в системі координат (d - q) з урахуванням жорсткості ексцентричного валу	75
Розділ 6 ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА		80
6.1	Вибір перетворювача частоти	80
6.2	Мережеві модулі, що підключаються	80
6.3	Вибір мережевих силових компонентів	81
6.4	Вибір модулів двигуна	82
6.5	Компоненти зв'язку DC	83
6.6	Модуль управління CU320	85
6.7	Модуль сенсора	85
6.8	Додаткові системні компоненти	86
6.9	Силові кабелі	86
6.10	Сигнальні кабелі	86
6.11	Блоки живлення	87
6.12	Індикаторна панель оператора	88
6.13	Вибір автоматичного вимикача	88
6.14	Вибір запобіжників для захисту установки	889
Розділ 7 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА		
ЛИСТОПРАВИЛЬНОЇ МАШИНИ		90
7.1	Опис електропривода з векторною системою управління в системі координат (d – q)	90
7.2	Спрощена функціональна схема електроприводу з векторною системою управління в системі координат (d –q)	94
7.3	Структурна схема електропривода з векторною системою управління в системі координат (d - q) і налаштування її контурів регулювання	95
7.4	Розрахунок коефіцієнтів регуляторів струму,	

потокочеплення ротора, моменту і швидкості	101
Розділ 8 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЛИСТОПРАВИЛЬНОЇ МАШИНИ	104
8.1 Моделювання системи електропривода без врахування технологічних особливостей роботи установки	104
8.2 Моделювання системи електропривода при відпрацюванні тахограм технологічного процесу правки металу з врахуванням зміни статичного моменту навантаження і моменту інерції	109
Розділ 9 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	113
Розділ 10 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	120
10.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта	120
10.1.1 Санітарно-гігієнічні вимоги до робочого середовища користувача ЕОМ	120
10.1.2 Заходи по забезпеченню електробезпеки	126
ВИСНОВКИ	127
Література	128
ДОДАТКИ	132

АНОТАЦІЯ

Магістерська кваліфікаційна робота на тему «Обґрунтування і розробка електроприводу листопрямуючої машини для випрямлення та радіусного гнуття листів металу на підприємствах з ремонту сільськогосподарської техніки» виконана студентом групи ЕІ-19-Мз. Богачуком Максимом Юрійовичем у Вінницькому національному аграрному університеті на кафедрі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки інженерно-технологічного факультету, рік захисту 2020. Робота містить 135 аркушів, 14 таблиць, 26 рисунків, список літератури - 38 найменувань.

Розроблена система векторного керування електроприводом листопрямуючої машини, зі зміною статичного моменту навантаження та моменту інерції з метою підвищення енергетичної ефективності листопрямуючої машини ЛПМ 2300. Проаналізовано призначення, кінематичні схеми і технічні характеристики листопрямуючих машин, проведені електромеханічні розрахунки і вибрано двигуни для приведення в рух листопрямуючої машини, побудована навантажувальна діаграма роботи приводу листопрямуючої машини, проведено математичне моделювання асинхронного двигуна, побудована функціональна і структурна схеми електроприводу з векторною системою управління, також розглянуті економічні питання та питання з охорони праці.

SUMMARY

Master's qualification work on the topic "Substantiation and development of electric drive sheet straightening machine for straightening and radial bending of metal sheets at enterprises for the repair of agricultural machinery" performed by a student of the group EI-19-Mz. Bogachuk Maksym Yuriyovych at Vinnytsia National Agrarian University at the Department of Electrical Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Faculty of Engineering and Technology, year of defense 2020. The work contains 135 sheets, 14 tables, 26 figures, bibliography - 38 titles.

The vector control system of the electric drive of the sheet-straightening machine is developed, with change of the static moment of loading and the moment of inertia for the purpose of increase of energy efficiency of the sheet-straightening machine LPM 2300. The load diagram of the drive of the sheet-straightening machine is constructed, the mathematical modeling of the induction motor is carried out, the functional and structural schemes of the electric drive with vector control system are constructed, economic questions and questions on labor protection are also considered.

ВСТУП

Листоправильні машини застосовуються в прокатному виготовленні, щоб вирівнювати поверхню листової сталі. Пресове обладнання може бути роликового (валкова), яка є найбільш поширеною, і розтяжної. Роликове обладнання призначене для редагування тонкого і товстого листа в гарячому і холодному стані, а розтяжних - найчастіше, щоб правити в холодному стані тонкі аркуші (сталеві і з кольорового металу), до якості якого пред'являється підвищені вимоги.

Серед різних методів пластичної обробки металу прокатка займає особливе місце, тому що такий процес дозволяє отримати продукцію необхідної форми й розмірів для безпосереднього використання, а також поліпшити її механічних та інших властивостей. Прокатне виробництво є заключною ланкою металургійного виробництва. Близько 80% усієї сталі, яка виплавляється, у вигляді зливків надходить на подальшу переробку до прокатних цехів.

Якість готової металургійної продукції істотно залежить від роботи електроприводу металургійних агрегатів. Електропривод прокатного виробництва є одним із основних споживачів електричної енергії в металургійному процесі. Потужність окремих металургійних установок досягає десятків мегават установленої потужності. Більшість електроприводів металургійного виробництва є унікальними і працюють в специфічних умовах.

Процедура правки - це пружно-пластичний знакозмінний вигин листа приводним роликом, розташованим в робочій кліті в кілька рядів. Як правило, верстат для правки листів здатний використовувати функціонал тиску на листи. На точність правки впливає крок ролика (величезний крок не здатний забезпечувати необхідну точність), розміру і числа (якщо багато роликів, тоді точність висока). Як правило, кількість правильних роликів становить 9-23. Багато сучасних листоправильні машини мають, крім правильних, опорними роликами. На швидкість правки впливає товщина листа і, як зазвичай, вона становить 0,1-6 м / сек. Відсік правки - це зварна конструкція, що має ліву і праву стійку.

Актуальність теми. Процедура правки на розтяжно-пресовому обладнанні заснована на створенні в аркуші напруги, близького до межі текучості,

розтягуються зусиллям. У розтяжній листопрямильній машині є станина, дві затискні головки, механізм пересування робочих головок і приводу. Але потрібно відзначити, що на сьогоднішній час широко поширеними є розтяжні листопрямильні машини, які мають гідравлічний привід робочої головки.

Крім усього цього, досить часто користуються комбінованим способом безперервної правки смуг. Як правило, це вигин і натяг. Вигини здійснюються в листопрямильних машинах, а натяг - в пристрої з роликом великого діаметра, який розташовується з кожного боку даного обладнання.

Зв'язок роботи з науковими темами, програмами, планами. Усі заплановані дослідження проводились у ході виконання ініціативної господарської договірної тематик..

Мета роботи: обґрунтування та розробка системи керування електроприводом листопрямильної машини, що враховує змінність статичного моменту навантаження та моменту інерції, з метою підвищення енергетичної ефективності листопрямильної машини.

Об'єкт дослідження: технологічний процес роботи листопрямильної машини.

Предмет дослідження: системи керування електроприводом листопрямильної машини.

Методи дослідження: при проведенні теоретичних досліджень застосовувались методи системного аналізу а для обробки експериментальних даних - методи прогнозування та інтерполяції.

Наукова новизна:

- розглянуті загальні вимоги до електроприводу листопрямильних машин прокатних станів побудована навантажувальна діаграма роботи приводу листопрямильної машини;
- проведені електромеханічні розрахунки і вибрано двигуни K21F315L4 для приведення в рух листопрямильної машини;
- проведено математичне моделювання асинхронного двигуна в системі координат $(d - q)$ з урахуванням жорсткості ексцентричного валу;
- проаналізовані технічні характеристики електрообладнання машини, частотного перетворювача Sinamics і схеми його підключення;

- виконано математичний опис електропривода з векторною системою управління в системі координат (d – q);
- побудована функціональна і структурна схеми електроприводу з векторною системою управління в системі координат (d – q) і виконана настройка її контурів регулювання;

Практична цінність

На основі обґрунтованої і уточненої методики інженерного розрахунку системи керування електроприводом листопривальної машини проведені розрахунки даного приводу для умов ВАТ «ВІБРОСЕПАРАТОР» м. Житомир.

Апробація роботи

Тези даної магістерської роботи доповідалась на науково-практичному семінарі кафедри “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” ВНАУ. Головні результати і висновки магістерської роботи також доповідались та обговорювались на студентській науково–практичній конференції у Вінницькому національному аграрному університеті у 2020 р.

1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ВИМОГИ ДО НЬОГО

1.1 Загальна характеристика механізму

На сучасних машинобудівних заводах (крім пресових цехів) створюються великі цехи, або заготівельні ділянки, де встановлюється обладнання для розділових операцій: різання листового матеріалу на кривошипних листових ножицях, рулонного листового матеріалу на багатодискових ножицях, сортового матеріалу на комбінованих (сортових) ножицях, отримання заготовок з сортового (круглого) матеріалу на холодно-висадочних автоматах.

Листопрямильні машини також відносяться до обладнання для заготівельних операцій. Багато-валкові листопрямильні машини застосовуються на автомобільних і вагонобудівних заводах для редагування тонких листів (до 2-2,5 мм) в холодному стані.

У процесі формування, штампування чи іншого механічного впливу поверхню сталевого листа може придбати опуклості, вм'ятини, неоднорідну товщину і т. п. Від типу дефекту залежить і складність їх усунення, з якою зіткнеться пресове обладнання або той, хто буде займатися цим вручну.

Найчастіше для усунення дефектів листового металу використовується спеціальне обладнання. Ручна робота, яку використовували раніше, вимагає великого досвіду, часу і зусиль. Застосовувані сьогодні листопрямильні машини складаються зі станин, електродвигунів, валків (розташованих в два яруси в шаховому порядку), • рольгангів, підшипників.

Зазвичай в такому обладнанні використовується два двигуни. Один надає руху валки в нижньому блоці, а інший регулює висоту і кут нахилу верхнього ярусу за допомогою шестеренчастого механізму. Крім цього, по обидва боки від верстата знаходяться столи (рольганги). На передній укладається лист для подальшої правки, а задній служить для підтримки обробленого матеріалу. Після вирівнювання поверхні металу для обрізки його країв використовуються ножиці гільйотинні гідравлічні.

Валки пресове обладнання машини безпосередньо і здійснюють основну

роботу за рахунок багаторазового згинання металу. Рух на них передається за допомогою шпинделів шарнірного типу. Якщо деформація поверхні оброблюваного матеріалу істотна, то процес повторюється кілька разів. Нижній ряд валків має зафіксовану в станині вісь, на відміну від верхнього, встановленого в рухомому траверсі. За рахунок тонкої системи регулювання зазору між ярусами валків, можна налаштувати машину на обробку листів різного перетину, геометрії і з наявністю технологічних отворів.

Вибираючи такий верстат необхідно звернути увагу на його продуктивність, оснащеність додатковим обладнанням і розміри. Все це допоможе заощадити гроші, якщо пресове обладнання буде використовуватися в невеликій майстерні.

Виправлення тонких листів низьковуглецевої сталі є частиною технологічного процесу. У низьковуглецевих сталях при штампуванні витяжними штампами виникають складки і розриви в місцях вигину. Тому перед штампуванням листи проходять правку на багато-валкових листопрямильних машинах зі спеціальним перегинати пристроєм. Внаслідок перегину відбувається зміна структури матеріалу листа, підвищуються пластичні властивості.

Листопрямильна машина призначена для правки в холодному режимі металеві листи, тобто усунення кривизни, хвилястості, вм'ятин та інших зовнішніх дефектів, що утворилися при обробці тиском і в результаті обробки, а також при транспортуванні і зберіганні. Загальний вигляд листопрямильної машини представлений на рисунку 1.1.

Основними параметрами листопрямильних машин є: діаметр роликів d (мм), крок роликів t (мм), довжина бочки роликів l (мм), кількість роликів n (шт.), товщина листів h (мм), що піддаються виправленню на даній машині [1-3]. Діаметр і крок роликів визначають якість правки і тиск на ролики правильної машини. Великі крок і діаметр роликів не забезпечують необхідної точності правки. Зменшення діаметра і кроку веде до збільшення тиску на ролики і ускладнення конструкції машини. Тому діаметр і крок роликів вибирають на підставі практичних даних залежно від товщини і ширини листів, що піддаються виправленню.



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд листопрямильної машини

Якість правки також визначається кількістю роликів в машині. Чим більше роликів, тим краща якість правки. Для підвищення якості і точності правки робочі ролики листопрямильної машини спираються на опорні холості ролики. Діаметр опорних роликів вибирається рівним або більшим діаметра робочих роликів і встановлюються вони в шаховому порядку по відношенню до робочих роликів. Технічні характеристики листопрямильної машини приведені у таблиці 1.1 [1, 4-6].

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики листопрямильної машини

Параметри	Значення	Позначення
Товщина полоси, мм	15...50	h
Ширина полоси, мм	1000...2200	B
Довжина полоси, м	до 14	L
Швидкість правки, м/с	0,2...0,6	V_n
Швидкість транспортування, м/с	1,0	V_m
Діаметр бочки робочих валків (нових), мм	280	D_p

Діаметр бочки робочих валків (після перешліфовки), мм	270	$D_{p.n}$
Довжина бочки робочих валків, мм	2500	l_p
Передаточне число редуктора, в.о.	41,2148	$i_{ред}$
Відстань між осями робочих валків (крок), мм	300	t
ККД передачі від двигуна до валка, в.о.	0,86	$\eta_{пер}$
Цикл подання листів на правку, с	60	$T_{ц}$
Модуль пружності, МПа	21000	E
Межа плинності матеріалу, МПа		
5-ти валковий режим	550	σ_t
11-ти валковий режим	1000	

1.2 Конструктивні особливості листопрямильних машин. Кінематична схема листопрямильної машини ЛПМ 2300

Листопрямильна машина складається з кліті робочої, вузла приводу робочих валків, пристрою шпindelного, пристрою для зміни касет, а також пристрою прибирання окалини з-під листопрямильної машини. Для виключення аварійних ситуацій всі механізми зі змінною позицією обладнані датчиками граничних переміщень (індуктивними сенсорами).

Кліть робоча складається з попередньо напруженої станини, в якій встановлені верхня та нижня касети з правильними валками (рисунок 1.2, 1.3), станинних роликів (по 1 шт. на вхідний і вихідний сторонах листопрямильної машини) і системи площадок обслуговування і плитних настилів. Робочі валки є основним робочим органом листопрямильної машини, що сприймає всі навантаження, що передаються машині при виправленні металу [1, 2]. Станинні ролики виконані не-приводними.

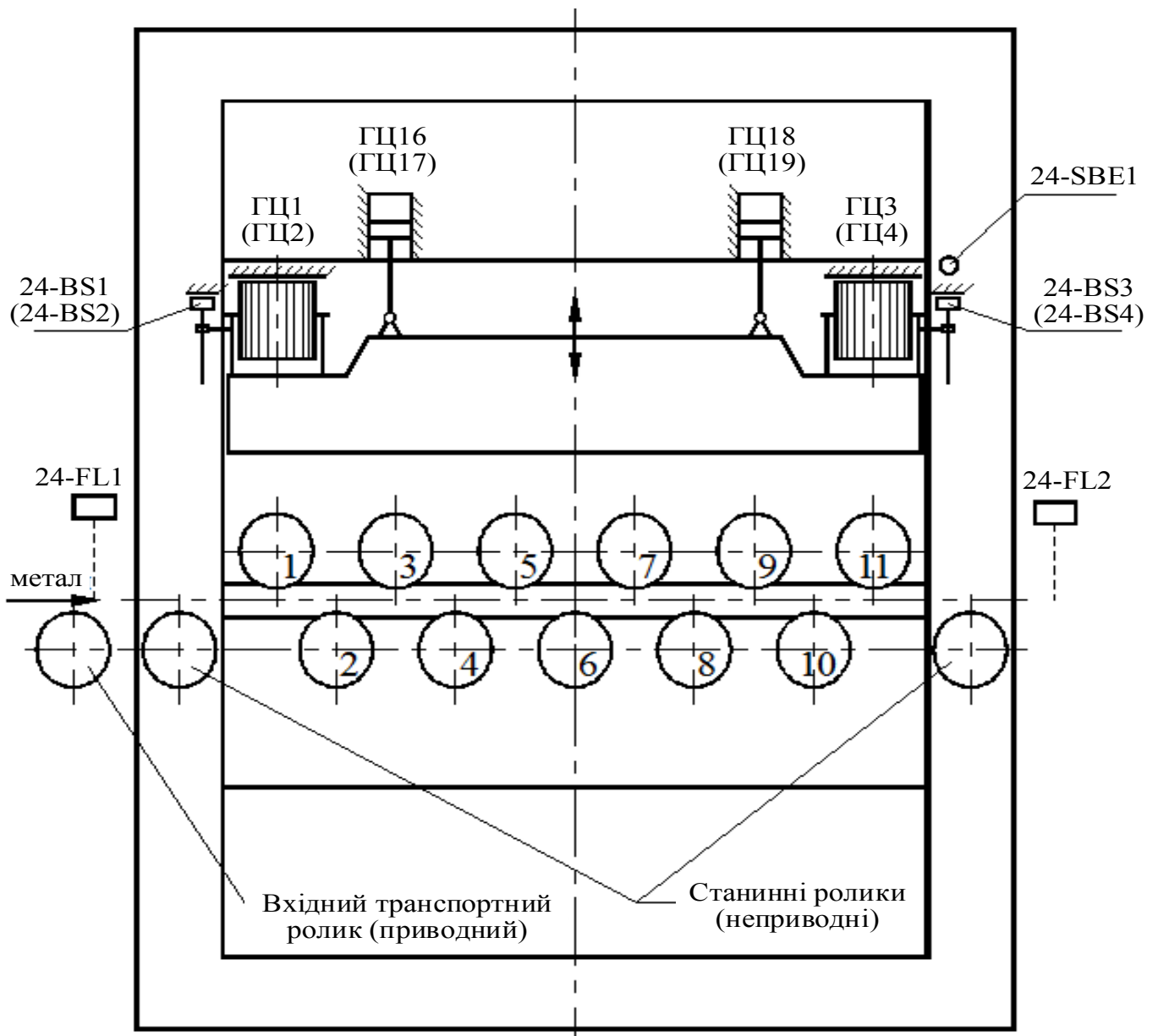


Рисунок 1.2 – Кінематична схема листоправильної машини

На вході в пресове обладнання встановлюється один додатковий ролик, оснащений електроприводом від мотор-редуктора (24-М6), ідентичним індивідуальному приводу роликів рольганга перед СКОН.

Касета нижня складається з зварного корпусу, в якому встановлені в індивідуальних подушках (обіймах) п'ять робочих валків. Під кожним з валків розташовані опорні ролики. Кожен з валків нижньої касети оснащений механізмом індивідуальної настройки, який виконаний у вигляді клинової пари. Переміщення валків у вертикальному напрямку здійснюється від індивідуальних гідروциліндрів (ГЦ6; ГЦ8; ГЦ10; ГЦ12; ГЦ14). Контроль положень валків здійснюється за допомогою датчиків лінійних переміщень 24-BS6; 24-BS8; 24-

BS10; 24-BS12; 24-BS14 (рисунок 1.3).

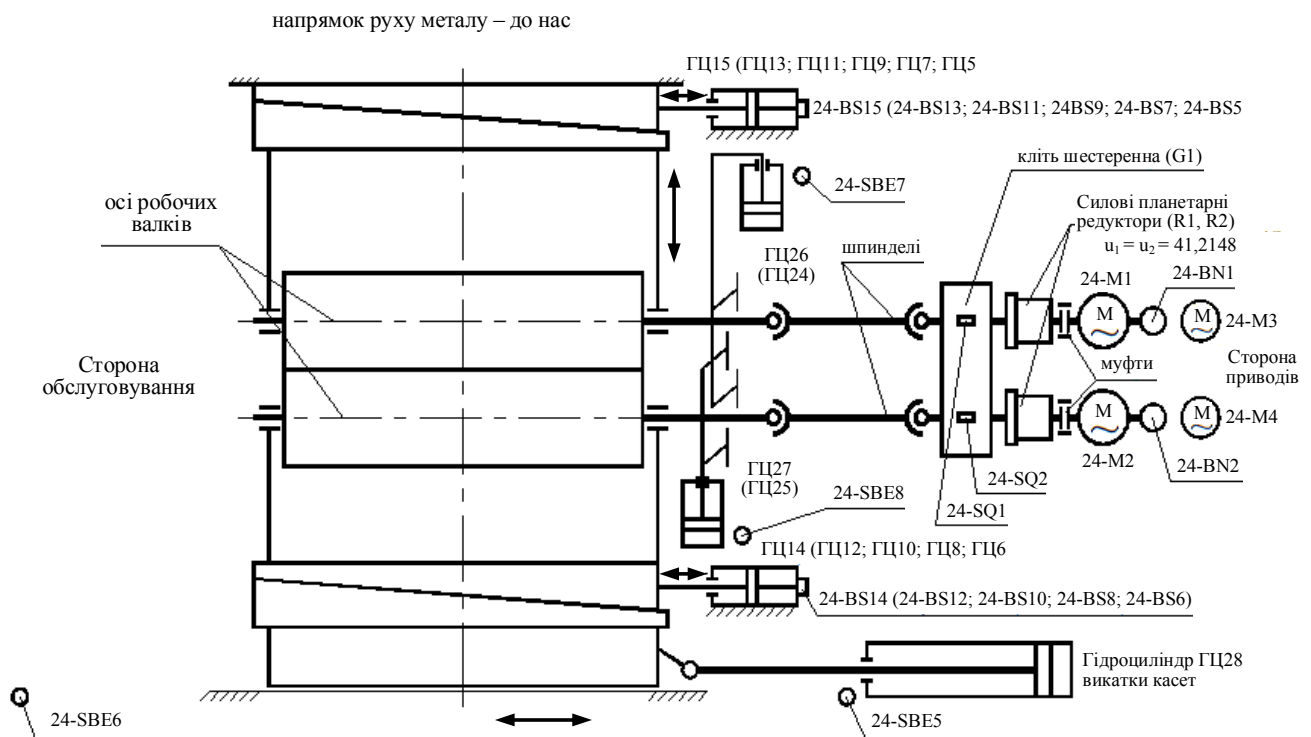


Рисунок 1.3 – Кінематична схема листоправильної машини

Касета верхня складається зі зварного корпусу, в якому встановлені в індивідуальних подушках шість робочих валків. Над кожним з валків розташовані опорні ролики. Кожен з валків верхньої касети оснащений механізмом індивідуальної настройки, виконаним аналогічно (у вигляді клинової пари). Переміщення валків у вертикальному напрямку здійснюються від індивідуальних гідроциліндрів (ГЦ5; ГЦ7; ГЦ9; ГЦ11; ГЦ13; ГЦ15). Контроль положень валків здійснюється за допомогою датчиків лінійних переміщень 24-BS5; 24-BS7; 24-BS9; 24-BS11; 24-BS13; 24-BS15 (рисунок 1.3).

Вузол станини кліті робочої виконаний попередньо напруженим, у вигляді стягнутих шпильками чотирьох стійок, з'єднаних в нижній частині зі звареною поперечиною, а у верхній – з двома кованими поперечинами із двома зварними стяжками. У верхній звареній траверсі станини встановлено корпуси чотирьох гідроциліндрів механізму натиску верхніх валків (ГЦ1, ГЦ2; ГЦ3, ГЦ4), плунжери яких спираються через сферичні під'ятники на верхні поперечини. Подача робочої рідини в гідроциліндри ГЦ1-ГЦ4 здійснюється через гнучкі підводи.

Верхня траверса має можливість вертикального переміщення спільно з касетою верхньою. Постійний натяг верхньої траверси до штоків натискних циліндрів (ГЦ1-ГЦ4) забезпечується чотирма гідроциліндрами врівноваження (ГЦ16-ГЦ19), які також встановлені на поперечинах, а їх штоки шарнірно приєднані до верхньої траверси.

Механізм натиску верхніх валків (гідролічний натяжний пристрій) листоправильної машини (з гідроциліндрами ГЦ1-ГЦ4) призначений для настройки зазору між верхньою і нижньою касетами машини на певну величину і утримання цього зазору постійним під час редагування. Як датчики положення гідроциліндрів використовуються датчики лінійного переміщення від 24-BS1 до 24-BS4. За допомогою цих датчиків здійснюється також контроль перекосу верхньої траверси.

Крім того, для фіксації крайнього нижнього положення верхньої траверси передбачений індуктивний сенсор 24-SBE1. Крайнє нижнє положення траверси з верхньою касетою визначається залежно від положення гідроциліндрів настройки правильних роликів і контролюється за показаннями як датчиків 24-BS1-24-BS4, так і 24-BS5, 24-BS7, 24-BS9, 24-BS11, 24-BS13, 24-BS15.

Налаштування машини для редагування листів з відомими характеристиками (товщиною, шириною, межею плинності матеріалу та ін.) полягає в установці необхідного перекриття верхнього ряду валків відносно нижнього і реалізується за допомогою натискних гідроциліндрів (ГЦ1-ГЦ4) і гідроциліндрів індивідуальної настройки валків (ГЦ5-ГЦ15). Інформація про вертикальні координати роликів відображається на моніторі пульта оператора.

Залежно від товщини смуги правка цієї смуги здійснюється одинадцятьма або п'ятьма робочими валками [2, 7 – 10]:

- в 11-валковому режимі правляться смуги товщиною від 6 до 20 мм;
- в 5-ти валковому режимі (в роботі беруть участь верхні валки №1, №5, №7 і нижні валки №4, №6) правляться смуги товщиною від 15 до 50 мм.

Для здійснення переходу з 11-ти на 5-ти валковий режим редагування і навпаки – в нижній частині станини встановлено чотири спільно працюючих

гідроциліндри (ГЦ20-ГЦ23 – по два з кожного боку вікна, відповідно до рисунка 1.4), що забезпечують переміщення нижньої касети уздовж лінії стану на 150 мм.

Контроль робочого положення касети нижньої кліті, що відповідає п'ятивалковому режиму редагування, здійснюється індуктивним сенсором 24-SBE3 (рисунок 1.4, схема підключення вимикача – рисунок 1.5). При зміщенні касети у напрямку руху металу на 150 мм досягається стан її, який відповідає режиму редагування тонких смуг (за участю одинадцяти робочих валків). Це положення контролюється індуктивним сенсором 24-SBE2 і таким, що дає дозвіл для початку зміни касет.

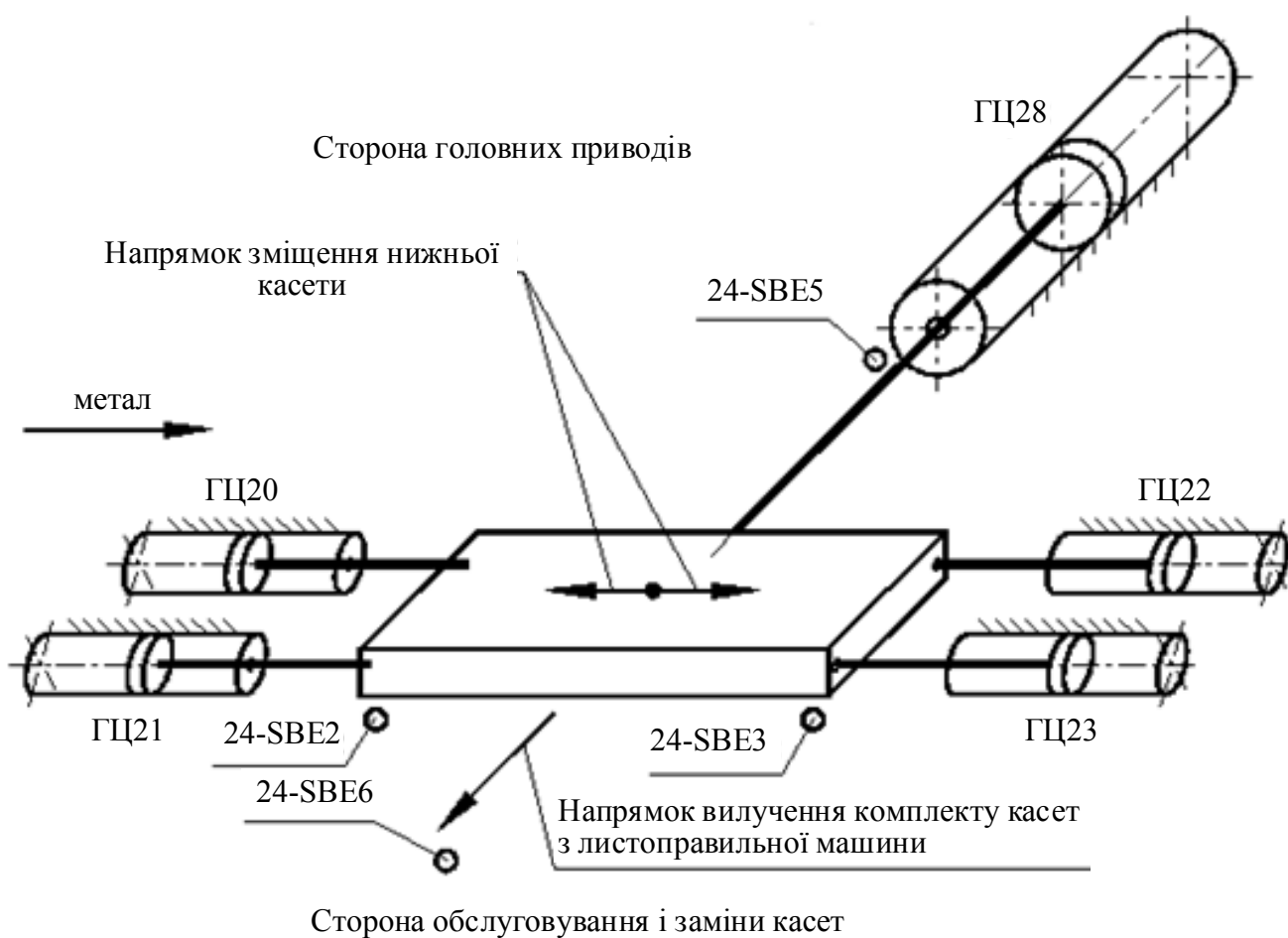


Рисунок 1.4 – Кінематична схема механізму зміщення нижньої касети уздовж лінії стану

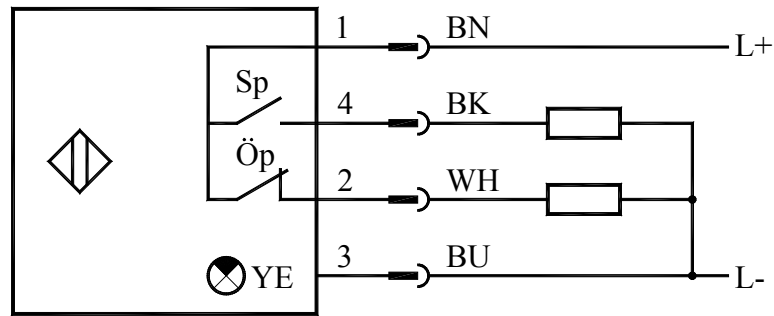


Рисунок 1.5 – Схема підключення індуктивного вимикача наближення

Переміщення механізмів і вузлів машини в цифровому вигляді виводяться на пульт оператора.

Головний привід ЛПМ – груповий, регульований, від асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, через два планетарних редуктора (R1, R2) шестерень кліть (G1) і групи карданних валів (K1 - K11) зі сполучними муфтами (рисунок 1.3). Від першого двигуна 24-M1 (по ходу металу) приводиться п'ять правильних валків (три верхніх і два нижніх), що знаходяться ближче до входу листопрямильної машини; від другого двигуна 24-M2 – інші шість валків (№6–№11). Приводні двигуни і редуктори розташовані зліва відносно напрямку руху металу. На шестеренній кліті встановлюються показчики потоку дистанційні (24-SQ1, 24-SQ2, рисунок 1.3), що фіксують факт надходження мастила в шестеренну кліть. Показчик потоку 24-SQ1 контролює наявність мастила зчеплення, 24-SQ2 – наявність мастила підшипників.

Двигуни призначені для роботи від перетворювачів частоти і оснащені (кожен) датчиком імпульсів (24-BN1, 24-BN2 – контроль швидкості), вентилятором обдуву з електроприводом (двигуни 24-M3, 24-M4), а також датчиками контролю температури в обмотках (КТУ 84-130 – 1 шт.) і підшипниках (РТ 100 – 2 шт.), нагрівачем для підігріву двигуна в стані спокою для виключення конденсату (інша назва – передпусковий підігрів). Кінематичний зв'язок між приводами в шестеренній кліті відсутній, в зв'язку з чим для узгодження приводів по швидкості при нерівномірному їх завантаженні потрібно підстроювання одного з приводів.

Пристрій шпindelний призначений для три-координатної фіксації

з'єднувальних муфт карданних валів в строго заданому положенні при зміні касет і виконано у вигляді верхньої та нижньої балок, що мають можливість вертикального переміщення по напрямних, закріпленим на стійках вузла станин за допомогою групи кронштейнів. Привод балок – гідравлічний, за допомогою попарно спрацьовуючих чотирьох гідроциліндрів (гідроциліндри приводу верхньої балки шпindelного пристрою – ГЦ24, ГЦ26; гідроциліндри приводу нижньої балки – ГЦ25, ГЦ27). Для фіксації крайніх положень балок по висоті передбачаються індуктивні сенсори, 24-SBE7 – верхнє положення верхньої балки; 24-SBE8 – нижнє положення нижньої балки.

Пристрій заміни касет включає в себе гідроциліндр викочування ГЦ28 (рисунок 1.4) і зварену раму з направляючими. Для контролю положення нижньої касети, а також штока гідроциліндра викочування передбачаються індуктивні сенсори: 24-SBE5 – втягнуте положення штока гідроциліндра, 24-SBE6 – висунуте положення штока гідроциліндра викочування ГЦ28 і повністю витягнутий комплект касет з листопривальної машини.

Пристрій прибирання окалини (кінематична схема – рисунок 1.6) призначений для збору окалини, що обсіпається з виправлених листів в коробі і прибирання наповненого короба на приводному візку за лінію стану.

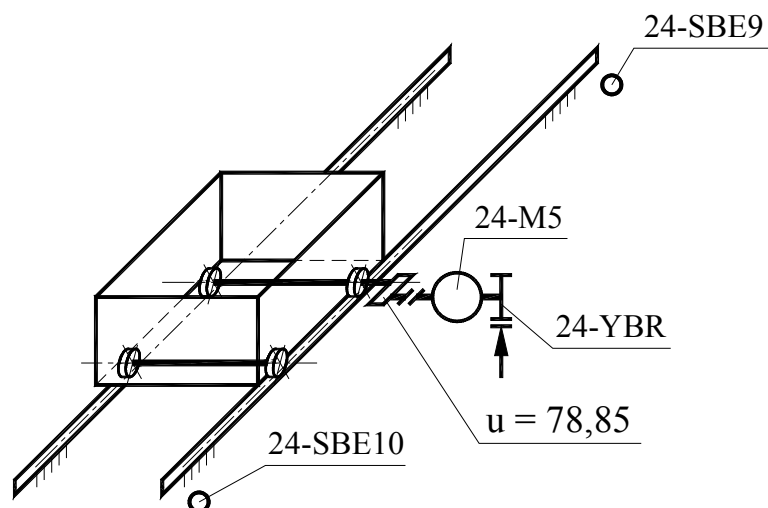


Рисунок 1.6 – Кінематична схема пристрою прибирання окалини

Візок отримує зворотно-поступальний рух за рахунок кочення коліс по рейках. Привід переміщення візка здійснюється від мотор-редуктора з

асинхронним електродвигуном (24-M5) з вбудованим гальмом (24-YBR) і з реактивною тягою. Крайні (аварійні) положення візка контролюються індуктивними сенсорами 24-SBE9 і 24-SBE10. Гальмо накладається при досягненні двигуном стану спокою ($M = 0$; $n = 0$).

Для фіксації фактів наявності і відсутності металу в контрольних перетинах (вхід і вихід смуги з листопральної машини) передбачаються лазерні бар'єри зі світловідбивачами (рефлекторами). Фірма-виробник лазерних бар'єрів – «MODULOC» (Англія).

Лазерний бар'єр 24-FL1 (рисунок 1.2) фіксує факт наявності (відсутності) металу на вхідній стороні ЛПМ, лазерний бар'єр 24-FL2 – на вихідній. Кожен лазерний бар'єр має характеристику, приведену в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Характеристика лазерного бар'єру LT200M

Параметр	Значення
Тип відбивача (рефлектора)	PEF-2HTW
Напруга живлення	$24 \pm 10\%$ В постійного струму
Споживана потужність	1 Вт
Дальність дії	більше 20 м з рефлектором
Точність визначення	3 мм на відстані до 10 м
Дозвіл	± 1 мм
Час спрацьовування	0,05 мс з циклом 10 мс
Довжина хвилі лазера	червоний видимий промінь 650 нм
Клас лазера	клас 2
Потужність лазера	1 мВт
Діаметр променю	0,1 мм до 10 м; 0,2 мм до 20 м
Індикація живлення	червоний світло-діод
Індикація спрацьовування	зелений світло-діод
Забруднення	миготливий помаранчевий
Вихід 1	реле АЛЕ / НЗ 250В, 8 А
Вихід 2	NPN / PNP транзистор

1.3 Вимоги до електроприводів листопривильних машин

Режим роботи двигунів головних приводів машини (24-M1, 24-M2) – тривалий зі змінним навантаженням, нереверсивний. Реверс можливий на випадок ремонту, а також при ліквідації нештатних і аварійних ситуацій [1, 2]. В нештатних ситуаціях можливі зупинки машини з металом і подальший розгін машини з металом від стану спокою ($M = 0$; $n = 0$) до швидкості правки.

Живлення приводних двигунів головних приводів (24-M1, 24-M2) здійснюється автономно від перетворювачів частоти з проміжною ланкою постійного струму, з гальмівними блоками і резисторами [11, 12].

Система управління двигунами головних приводів (24-M1, 24-M2) повинна забезпечувати:

- плавний пуск двигунів без навантаження і під навантаженням;
- регулювання швидкості кожного двигуна зміною частоти напруги живлення (рівню швидкості 0,5282 м/с відповідає номінальна частота обертання двигунів 1485 об/хв. при частоті напруги живлення 50 Гц і при нових робочих валках $D_{p.v.} = 0,28$ м);
- діапазон регулювання з урахуванням перешліфовки валків до діаметра бочки 270 мм 562...2915 об/хв..;
- можливість завдання різниці швидкості між групами валків;
- електричне гальмування;
- реверс (у виняткових випадках);
- стабілізацію швидкості на необхідному за технологією рівні;
- узгодження швидкостей приводів машини (з використанням зворотних зв'язків за швидкістю), приводу вхідного транспортного ролика і приводів примикання секцій рольгангів на вхідній і вихідній сторонах (в межах обраних секцій при конкретній довжині смуги); точність узгодження швидкостей – не гірша 2 % від заданого значення;
- корекцію по частоті обертання двигунів, обумовлену перешліфовці робочих валків (від 280 мм до 270 мм). Внаслідок перешліфовки валків для дотримання рівня швидкості 1,0 м/с двигун буде використовуватися по частоті

обертання в межах другої зони регулювання ($n_{дв} \approx 2915$ об/хв.. при $D_{р.в.} = 0,27$ м та $i = 41,2148$);

- індивідуальний поштовховий режим роботи на зниженій швидкості (0,1...0,2 від номінальної);

- групова аварійна зупинка машини спільно з вхідним транспортним роликом і з пов'язаними рольгангами;

- передбачити заходи захисту від радіоперешкод і перенапруг на двигунах;

- забезпечити управління електродвигунами вентиляторів (24-М3, 24-М4), вбудованих в електродвигуни приводу валків (24-М1, 24-М2). Електродвигуни вентиляторів (24-М3, 24-М4) повинні включатися до включення двигунів головних приводів (24-М1, 24-М2), працювати незалежно від роботи двигунів головних приводів і у включеному стані дозволяти включення двигунів головних приводів. Режим роботи цих двигунів – тривалий (S1), без регулювання швидкості. Реверс по частоті обертання не потрібний;

- забезпечити управління вбудованими в двигуни нагрівачами для підігріву в стані спокою для запобігання утворенню конденсату в холодну пору року. Включення нагрівачів на розсуд обслуговуючого персоналу. При роботі двигунів нагрівачі повинні бути вимкнені;

- забезпечити живлення двигуна 24-М6 приводу вхідного транспортного ролика від перетворювача частоти. Рівню швидкості 1,0 м/с повинна відповідати частота обертання двигуна 980,4 об/хв. при частоті напруги живлення в межах 50 Гц (приблизно 33,12 Гц), діаметрі ролика 300 мм і передавальному числі редуктора $i = 15,4$. Більш високий рівень швидкості не потрібен. Реверс передбачити на випадок ремонту, а також на випадок ліквідації нештатних і аварійних ситуацій.

На посту управління передбачити індивідуальну світлову сигналізацію (попереджувальну, аварійну) і (загальну для всіх випадків) звукову сигналізацію. Знімання звукового сигналу – спеціальною кнопкою після виявлення конкретної несправності.

Передбачити також спеціальну кнопку для входу в режим «справність сигнальних ламп». При натисканні цієї кнопки всі сигнальні лампи на пульті незалежно від обраного режиму світяться в справному стані. Після відпускання кнопки лампи повертаються в стан, що відповідає поточному режиму.

Передбачити в раціональному обсязі діагностику обладнання та режимів роботи механізмів машини.

Резервування джерел живлення.

Передбачити один резервний перетворювач для двох робочих перетворювачів головних приводів ЛПМ з органами перемикання в машинному залі.

В обсязі поставки повинен бути низьковольтний розподільний пристрій для електроприводів і систем автоматизації, що підключається до існуючої комплектної трансформаторної підстанції.

2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Вихідні дані сумарних обертових моментів на робочих роликах представлені в таблиці 2.1 [1].

Таблиця 2.1 – Сумарні обертові моменти на робочих роликах

Параметр	Значення	Позначення
Сумарні крутні моменти на робочих валках з розподілом по приводам, Н·м: Розрахункова схема №1 – правка полос товщиною до 50 мм в п'яти-валковому режимі (робочі валки №1, №5, ;7 і нижні робочі валки №4, №6):		
Привод №1 (валки №1, №4, №5):		
Ролик №1	1877	M ₁
Ролик №4	23924	M ₄
Ролик №5	11522	M ₅
Привод №2 (валки №6, №7):		
Ролик №6	8451	M ₆
Ролик №7	1427	M ₇
Сумарні крутні моменти на робочих валках з розподілом по приводам, Н·м: Розрахункова схема №2 – правка полос товщиною до 20 мм в одинадцяти-валковому режимі (в правці беруть участь всі робочі валки: №1–№11):		
Привод №1 (верхні валки №1, №3, №5 і нижні валки №2 і №4):		
Ролик №1	1179	M ₁
Ролик №2	20646	M ₂
Ролик №3	14822	M ₃
Ролик №4	15565	M ₄
Ролик №5	13927	M ₅
Привод №2 (верхні валки №7, №9, №11 і нижні валки №6, №8 і №10):		
Ролик №6	12988	M ₆
Ролик №7	11914	M ₇
Ролик №8	10966	M ₈
Ролик №9	10052	M ₉
Ролик №10	8385	M ₁₀
Ролик №11	871	M ₁₁

Розрахуємо потужності двигунів в п'ятивалковому режимі.

Сумарний обертовий момент для приводу №1 [2]:

$$\sum M_{\text{кр1}} = M_1 + M_2 + M_3, \quad (2.1)$$

$$\sum M_{\text{кр1}} = 1877 + 23924 + 11522 = 37323 (\text{Н} \cdot \text{м}).$$

Сумарний обертовий момент для приводу №2:

$$\sum M_{\text{кр2}} = M_4 + M_5, \quad (2.2)$$

$$\sum M_{\text{кр2}} = 8451 + 1427 = 9878 (\text{Н} \cdot \text{м}).$$

Номінальна потужність двигуна приводу роликів визначається за формулою [13 –15]:

$$P_{\text{н}} = \frac{\sum M_{\text{кр}} \cdot \omega_{\text{пр}} \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{пер}}}, \quad (2.3)$$

де $\omega_{\text{пр}}$ – номінальна кутова частота приводу валків, яка розраховується за формулою:

$$\omega_{\text{пр}} = \frac{2 \cdot V_{\text{п}}}{D_{\text{р.в.}}}, \quad (2.4)$$

$$\omega_{\text{пр}} = \frac{2 \cdot 0,5}{0,28} = 3,57 (\text{с}^{-1}).$$

Номінальна потужність двигуна приводу №1:

$$P_{\text{н1}} = \frac{\sum M_{\text{кр1}} \cdot \omega_{\text{пр}} \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{пер}}}, \quad (2.5)$$

$$P_{\text{н1}} = \frac{37323 \cdot 3,57}{0,92} = 144,829 (\text{кВт}).$$

Номінальна потужність двигуна приводу №2:

$$P_{\text{н2}} = \frac{\sum M_{\text{кр2}} \cdot \omega_{\text{пр}} \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{пер}}}, \quad (2.6)$$

$$P_{H2} = \frac{9878 \cdot 3,57}{0,92} = 38,33 \text{ (кВт)}.$$

Сумарна потужність електродвигунів приводу роликів:

$$\sum P_H = P_{H1} + P_{H2}, \quad (2.7)$$

$$\sum P_H = 144,829 + 38,33 = 184 \text{ (кВт)}.$$

Розрахуємо потужності двигунів в одинадцятивалковому режимі.

Сумарний обертовий момент для приводу №1:

$$\sum M_{kp1} = M_1 + M_2 + M_3, \quad (2.8)$$

$$\sum M_{kp1} = 1877 + 23924 + 11522 = 37323 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Сумарний обертовий момент для приводу №2:

$$\sum M_{kp2} = M_6 + M_7 + M_8 + M_9 + M_{10} + M_{11}, \quad (2.9)$$

$$\sum M_{kp2} = 12988 + 11914 + 10966 + 10052 + 8385 + 871 = 55176 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Номинальна потужність двигуна приводу №1:

$$P_{H1} = \frac{\sum M_{kp1} \cdot \omega_{пр} \cdot 10^{-3}}{\eta_{пер}}, \quad (2.10)$$

$$P_{H1} = \frac{66139 \cdot 3,57}{0,9} = 246,648 \text{ (кВт)}.$$

Номинальна потужність двигуна приводу №2:

$$P_{H2} = \frac{\sum M_{kp2} \cdot \omega_{пр} \cdot 10^{-3}}{\eta_{пер}}, \quad (2.11)$$

$$P_{H2} = \frac{55176 \cdot 3,57}{0,9} = 224,106 \text{ (кВт)}.$$

Сумарна потужність електродвигунів приводу роликів:

$$\sum P_H = P_{H1} + P_{H2}, \quad (2.12)$$

$$\sum P_H = 256,648 + 214,106 = 472 \text{ (кВт)}.$$

Розрахуємо сумарні статичні моменти для розрахункової схеми №1 ($h \leq 50$ мм, 5 валків).

Сумарний статичний момент правки, приведений до валу двигуна приводу №1:

$$M'_{ст1} = \frac{M_1 + M_4 + M_5}{i \cdot \eta}, \quad (2.13)$$

$$M'_{ст1} = \frac{1877 + 23924 + 11522}{41,2148 \cdot 0,86} = 1053 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Сумарний статичний момент правки, приведений до валу двигуна приводу №2:

$$M'_{ст2} = \frac{M_6 + M_7}{i \cdot \eta}, \quad (2.14)$$

$$M'_{ст2} = \frac{8451 + 1427}{41,2148 \cdot 0,86} = 278,7 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Розрахуємо сумарні статичні моменти для розрахункової схеми №2 ($h \leq 20$ мм, 11 валків).

Сумарний статичний момент правки, приведений до валу двигуна приводу №1:

$$M'_{ст1} = \frac{M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5}{i \cdot \eta}, \quad (2.15)$$

$$M'_{ст1} = \frac{1179 + 20646 + 14822 + 15565 + 13927}{41,2148 \cdot 0,86} = 1866 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Сумарний статичний момент правки, приведений до валу двигуна приводу №2:

$$M'_{ст2} = \frac{M_6 + M_7 + M_8 + M_9 + M_{10} + M_{11}}{i \cdot \eta}, \quad (2.16)$$

$$M_{\text{ст2}}' = \frac{12988 + 11914 + 10966 + 10052 + 8385 + 871}{41,2148 \cdot 0,86} = 1557 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Попередньо приймаємо потужність електродвигуна 250 кВт та швидкість його обертання до 1500 об/хв.

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

3.1 Порівняння систем електроприводів

Розглянемо системи керування електроприводом листоправильної машини: ПЧ-АД (скалярне керування), ПЧ-АД (векторне керування), Г-Д, ТП-Д.

Розглянемо ці варіанти з економічної точки зору. Використовуємо метод зведених витрат:

$$Z = E_n \cdot K + C, \quad (3.1)$$

де E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності ($E_n = 0,12$);

K – капіталовкладення, в які входять вартість двигуна D та системи керування СК;

C – собівартість:

$$C = C_a + C_o + C_{\Delta W}, \quad (3.2)$$

де C_o – витрати на обслуговування і ремонт:

$$C_o = E_o \cdot K, \quad (3.3)$$

де C_a – амортизаційні відрахування:

$$C_a = E_a \cdot K, \quad (3.4)$$

де $E_a = 0,05$;

$C_{\Delta W}$ – витрати на електроенергію ($E_o = 0,015$),

$$C_{\Delta W} = m_o \cdot \Delta W, \quad (3.5)$$

де m_o – вартість електроенергії ($m_o = 2,02$ грн./кВт год. [16]);

ΔW – кількість втраченої електроенергії за рік:

$$\Delta W = \Delta P \cdot T_p \cdot k_p, \quad (3.6)$$

де T_p – річний час роботи обладнання ($T_p = 8400$ год.);

k_p – коефіцієнт, що враховує втрати.

Втрати потужності:

$$\Delta P = k_3 \cdot P_n \cdot (1 - \eta_d) / \eta_d, \quad (3.7)$$

де k_3 – коефіцієнт завантаження ($k_3=0,98$);

η_d – ККД двигуна ($\eta_d = 0,94$).

В результаті розрахунків, отримано економічні показники, приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняння економічних показників систем можливих електроприводів

Показники	Тип системи			
	ПЧ-АД скалярне	ПЧ-АД векторне	Г-Д	ТП-Д
Потужність двигуна P_n , кВт	250			
Вартість двигуна (Д), грн.	198340	198340	260760	260760
Вартість системи керування (СК), грн.	683080	745680	861390	572930
Капіталовкладення $K=D+СК$, грн.	881420	944020	1122150	833690
E_a	0,05			
Амортизаційні відрахування $C_a = E_a \cdot K$, грн.	44071	47201	56108	41685
E_o	0,015			
Витрати на обслуговування і ремонт C_o $= E_o \cdot K$, грн.	13221	14160	16832	12505
Вартість електроенергії m_o , грн/кВт год.	2,02			
Коефіцієнт завантаження k_3	0,98			
Річний час роботи T_p , год.	8400			
ККД η_d , %	0,94			
Втрати потужності $\Delta P = k_3 \cdot P_n \cdot (1 - \eta_d) / \eta_d$, кВт	15,64	15,64	15,64	15,64

Коефіцієнт, що враховує втрати k_p	0,21	0,10	0,94	0,82
Кількість втраченої електроенергії за рік $\Delta W = \Delta P \cdot T_p \cdot k_o$, кВт	27586	13136	123480	107717
Витрати на електроенергію $C_{\Delta W} = m_o \cdot \Delta W$, грн	55724	26535	249430	217588
Собівартість $C = C_a + C_o + C_{\Delta W}$, грн.	113016	87896	322369	271777
Нормативний коефіцієнт економічної ефективності E_n	0,12			
Зведені витрати $Z = E_n \cdot K + C$, грн.	218786	201179	457027	371820

Як видно з таблиці 3.1, за зведеними витратами кращою є система ПЧ-АД з векторним керуванням, яка має найменші зведені затрати.

3.2 Вибір принципу векторного керування

Управління приводом листоправильної машини здійснюється з пульта управління, розташованого біля машини. При роботі агрегату в режимі правки смуги пресове обладнання здійснює розподіл смуги на аркуші розмірної довжини.

У базовій системі використовується сучасний привід з векторним керуванням фірми VEM. Він реалізує векторний закон управління за законом $\psi_2 = \text{const}$.

Система регулювання має два канали управління: модулем вектору потокозчеплення ротора і кутовою швидкістю ротора. Двоканальна система управління дає можливість здійснювати незалежне регулювання модуля вектору потокозчеплення ротора і швидкості ротора при збереженні прямої пропорційності між моментом на валу двигуна і складовою намагнічувальної сили статора, яка знаходиться в квадратурі з хвилею потокозчеплення ротора. У статичному режимі асинхронний двигун з короткозамкненим ротором описується системою рівнянь [17, 18]:

$$\begin{cases} U_1 = R_1 I_1 + j\Omega_0 \Psi_1, \\ 0 = R_2' I_2' + j_s \Omega_0 \Psi_2. \end{cases} \quad (3.8)$$

Напишемо систему рівнянь (3.8) в ортогональній системі координат d-q, яка обертається з синхронною швидкістю. Ось d прив'яжемо до вектора потокозчеплення ротора Ψ_2 . Тоді $\Psi_{2d} = |\Psi_2|$ а $\Psi_{2q} = 0$. Вектор потокозчеплення ротора випереджає вектор струму ротора на $\pi/2$, тому якщо $\Psi_{2q} = 0$, то $I_{2d} = 0$.

В результаті отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} u_{1q} = R_1 I_{1q} + \Omega_0 \Psi_{1d}, \\ 0 = R_2' I_{2q}' + (\Omega_0 - \Omega) \Psi_2, \\ M = \frac{3}{2} Z_{\pi} \frac{L_0}{L_2'} \Psi_2 I_{1q}. \end{cases} \quad (3.9)$$

Аналізуючи систему рівнянь (3.9) можна зробити висновок, що під час запису в системі координат d-q асинхронний електродвигун описується такими ж рівняннями, як і двигун постійного струму. При цьому роль α струму збудження виконує складова струму статора I_{1d} , яка збігається за напрямком з вектором потокозчеплення ротора.

Складова I_{1q} виконує роль аналога струму якоря двигуна постійного струму, взаємодіє з потокозчепленням ротора і створює електромагнітний момент. З останнього рівняння системи рівнянь (3.9) випливає можливість роздільного управління потоком збудження і моментом асинхронного двигуна в орієнтованій по полю двигуна перетвореної системи координат.

Системи векторного керування будуються аналогічно системам підпорядкованого управління електродвигунами постійного струму.

При синтезі систем управління частотних електроприводів вихідну систему диференціальних рівнянь, що описують електроприводи в трифазній системі, перетворюють в системи диференціальних рівнянь в ортогональних системах координат:

α - β , жорстко зв'язаної з нерухомим статором;

d - q , жорстко зв'язаної з ротором, що обертається з кутовою швидкістю ω ;

x - y , що обертається з кутовою частотою ω_1 магнітного поля статора.

Такі перетворення дають можливість уявити симетричну трифазну електричну машину двофазною, що значно спрощує математичний опис процесів електромеханічного перетворення енергії в електроприводах.

При синтезі систем управління частотним електроприводом, що забезпечують закон управління $\Psi_2 = \text{const}$ систему диференціальних рівнянь асинхронного двигуна перетворюють в ортогональну систему координат x - y . Векторна діаграма для цього випадку наведена на рисунку 3.1 [18, 19].

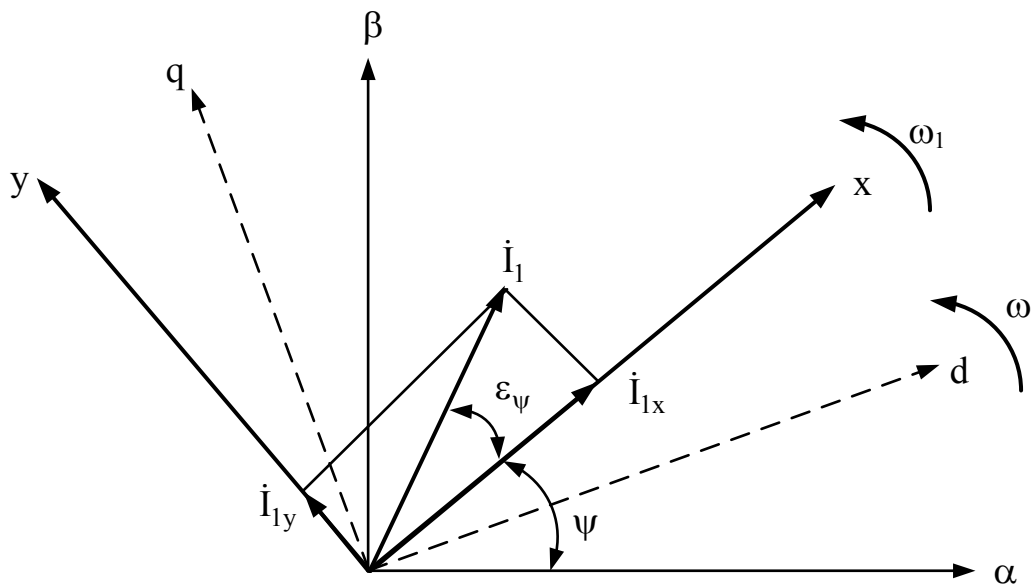


Рисунок 3.1 – Векторна діаграма струму статора I_1 і потокозчеплення ротора Ψ_2 в перетвореній ортогональній системі координат x - y

Проекція струму статора на вісь x є потокоутворюючою, $I_{1x} \equiv \Psi_2$.

Проекція струму статора на вісь y є моментоутворюючою, $I_{1y} \equiv M$.

Ідея векторного управління при законі управління $\Psi_2 = \text{const}$ ґрунтується на регулюванні складової струму статора $I_{1x} \equiv \Psi_2$.

Можливі 2 принципи векторного управління:

– регулювання модуля струму статора \dot{I}_1 і кута ε_ψ ;

– регулювання проекції струму статора \dot{I}_{1x} і \dot{I}_{1y} .

Перший принцип не набув поширення через складність вимірювання кута ε_ψ в динамічних режимах, через що в електроприводі виникають некеровані надструми і значні динамічні моменти.

Другий принцип управління використовується у всіх сучасних частотних електроприводах.

Для реалізації цього принципу управління необхідно спочатку трифазну систему струмів статора двигуна перетворити в двофазну, виділивши проекції струму статора на вісь x і y .

У сучасних частотних електроприводах з векторним керуванням потокозчеплення і швидкість обчислюють за допомогою контролерів за алгоритмами, заснованими на різних непрямих методах з достатньою точністю [22 – 22].

При змінному моменті опору економічно більш вигідним є закон векторного керування, при якому ψ_2 є функцією від моменту опору. Тому будемо реалізовувати регулятор потокозчеплення, що забезпечує змінність потокозчеплення ротора.

4 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Вибираємо два асинхронних трифазних двигуна з короткозамкненим ротором типу K21F315L4 фірми «VEM» (Німеччина) з характеристиками, представленими в таблиці 4.1 [23].

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики двигуна

Тип двигуна	$P_{н\text{,}}$ кВт	$n_{н\text{,}}$ об/хв	$I_{н\text{,}}$ А	$M_{\text{max}}/M_{н}$	$M_{\text{пуск}}/M_{н}$	$U_{н\text{,}}$ В	η , %	$\cos\varphi$	J , кг·м ²
K21F315L4	250	1485	438,9	2,3	1,6	380	96,1	0,9	5,9

Конструктивне виконання за способом монтажу електродвигунів ІМ1001, частота двигуна 50 Гц, маса двигуна 1485 кг; з одним датчиком температури КУ 84-130 в обмотці і підшипниках РТ 100 (2 шт.), з підігрівом при спокої 100 Вт, 230 В.

Прибудовані до двигунів 24-М1 і 24-М2 вентилятори типу FBW 315 ІІ з електродвигуном асинхронним трифазним короткозамкненим 0,37 кВт, 0,66 А, 380 В, 50 Гц. Для вмонтовування в двигун передбачені наступні типи датчиків: датчик імпульсний HOG 10 DN +1024 І (в комплекті з двигуном), фірма «HUEBNERBERLIN» [24, 25].

Муфта встановлена на валу двигуна: М35, $d = 90$ мм.

Знаходимо момент інерції муфти М35 [3]:

$$J_{\text{муф}} = \frac{1,8}{4} = 0,45 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}. \quad (4.1)$$

Момент інерції редуктора:

$$J_{\text{ред}} = 0,3 \cdot J_{\text{дв}}, \quad (4.2)$$

де $J_{\text{дв}}$ – момент інерції двигуна ($J_{\text{дв}} = 5,9 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$).

$$J_{\text{ред}} = 0,3 \cdot 5,9 = 1,77 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Власний момент інерції робочого ролика ($A280 = 0,00475$).

$$J_{pp} = l_p \cdot A280, \quad (4.3)$$

де l_p – довжина робочих валків ($l_p = 2500$ мм);

$A280$ – діаметр робочих валків ($A280 = 0,00475$ м).

$$J_{pp} = 2500 \cdot 0,00475 = 11,875 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Момент інерції робочих роликів приводу №1:

$$J_{pp1} = \frac{Z_1 \cdot J_{pp}}{i_{ред}^2}, \quad (4.4)$$

де Z_1 – кількість роликів ($Z_1 = 5$ шт.).

$$J_{pp1} = \frac{5 \cdot 11,875}{41,2148^2} = 0,035 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Момент інерції робочих роликів приводу №2:

$$J_{pp2} = \frac{Z_2 \cdot J_{pp}}{i_{ред}^2}, \quad (4.5)$$

де Z_2 – кількість роликів ($Z_2 = 6$ шт.).

$$J_{pp2} = \frac{6 \cdot 11,875}{41,2148^2} = 0,042 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Сумарний момент інерції двигуна і механізму при холостому ході приводу №1 (ролики №1 – №5):

$$J_{xx1} = J_{дв} + J_{муф} + J_{ред} + J_{pp1}, \quad (4.6)$$

$$J_{xx1} = 5,9 + 0,45 + 1,77 + 0,035 = 8,155 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Сумарний момент інерції двигуна і механізму при холостому ході приводу №2 (ролики №6 – №11):

$$J_{xx2} = J_{дв} + J_{муф} + J_{ред} + J_{pp2}, \quad (4.7)$$

$$J_{xx2} = 5,9 + 0,45 + 1,77 + 0,042 = 8,162 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Визначимо масу металу, що припадає на один ролик:

$$m_{np} = 3 \cdot m_{n_шаг} = 3 \cdot B_{max} \cdot h_{max} \cdot t \cdot \gamma, \quad (4.8)$$

де h_{max} – максимальна товщина смуги металу;

B_{max} – максимальна ширина смуги металу;

γ – питома вага матеріалу ($\gamma = 7,85$ т – сталь кована і катана).

$$m_{np} = 3 \cdot 2,2 \cdot 0,05 \cdot 0,3 \cdot 7850 = 777,15 \text{ (кг)}.$$

Розрахуємо номінальну кутову швидкість двигуна:

$$\omega_{дв} = \frac{\pi}{30} \cdot n_n, \quad (4.9)$$

$$\omega_{дв} = \frac{3,14}{30} \cdot 1485 = 155,5 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

Швидкість робочих роликів:

$$V_p = \omega_p \cdot \frac{d_p}{2} = \frac{\omega_{дв}}{i} \cdot \frac{d_p}{2}, \quad (4.10)$$

$$V_p = \frac{155,5}{41,2148} \cdot \frac{0,28}{2} = 0,5282 \text{ (м/с)}.$$

Момент інерції металу приводу №1:

$$J_{мет1} = m_{np} \cdot Z_1 \cdot \frac{V_p^2}{\omega_{дв}^2}, \quad (4.11)$$

$$J_{мет1} = 777,15 \cdot 5 \cdot \frac{0,5282^2}{155,5^2} = 0,045 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Момент інерції металу приводу №2 (ролики №6 – №11):

$$J_{мет2} = m_{np} \cdot Z_2 \cdot \frac{V_p^2}{\omega_{дв}^2}, \quad (4.12)$$

$$J_{\text{мет2}} = 777,15 \cdot 6 \cdot \frac{0,5282^2}{155,5^2} = 0,054 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Сумарний момент інерції двигуна і механізму з металом для приводу №1 (ролики № 1 – № 5):

$$J_1 = J_{\text{xx1}} + J_{\text{мет1}}, \quad (4.13)$$

$$J_1 = 8,155 + 0,045 = 8,2 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Знайдемо сумарний момент інерції двигуна і механізму з металом для приводу №2 (ролики №6 – №11):

$$J_2 = J_{\text{xx2}} + J_{\text{мет2}}, \quad (4.14)$$

$$J_2 = 8,162 + 0,054 = 8,216 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Режим редагування смуг товщиною 20 мм (при $V_{\text{max}} = 2,2$ м).

Маса металу, що припадає на один ролик:

$$m_{\text{пр}} = 3 \cdot m_{\text{п_шаг}} = 3 \cdot V_{\text{max}} \cdot h_{\text{max}} \cdot t \cdot \gamma, \quad (4.15)$$

$$m_{\text{пр}} = 3 \cdot 2,2 \cdot 0,02 \cdot 0,3 \cdot 7850 = 310,86 \text{ (кг)}.$$

Момент інерції металу приводу №1:

$$J_{\text{мет1}} = m_{\text{пр}} \cdot Z_1 \cdot \frac{V_p^2}{\omega_{\text{дв}}^2}, \quad (4.16)$$

$$J_{\text{мет1}} = 310,86 \cdot 5 \cdot \frac{0,5282^2}{155,5^2} = 0,018 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Момент інерції металу приводу №2 (ролики №6 – №11):

$$J_{\text{мет2}} = m_{\text{пр}} \cdot Z_2 \cdot \frac{V_p^2}{\omega_{\text{дв}}^2}, \quad (4.17)$$

$$J_{\text{мет2}} = 310,86 \cdot 6 \cdot \frac{0,5282^2}{155,5^2} = 0,022 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Сумарний момент інерції двигуна і механізму з металом (привод 1):

$$J_1 = J_{xx1} + J_{мет1}, \quad (4.18)$$

$$J_1 = 1,155 + 0,018 = 8,173 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Сумарний момент інерції двигуна і механізму з металом (привод 2):

$$J_2 = J_{xx2} + J_{мет2}, \quad (4.19)$$

$$J_2 = 8,162 + 0,022 = 8,184 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Значення статичних моментів при холостому ході M_{xx} на веденому валу кожного приводу приймаються за аналогом з укрупненням в 1,5 рази, зумовленим збільшенням діаметра з 230 мм до 280 мм (збільшення маси робочих

валків пропорційне збільшенню квадрата діаметра, тобто $K = \frac{280^2}{230^2} = 1,5$).

Значення статичного моменту при холостому ході для приводу №1:

$$M_{xx1} = 1054,5 \cdot 1,5 = 1581,75 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Значення статичного моменту при холостому ході для приводу №2:

$$M_{xx2} = 1157,4 \cdot 1,5 = 1736,1 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Статичний момент холостого ходу, приведений до валу двигуна, привод 1:

$$M'_{xx1} = \frac{M_{xx1}}{i \cdot \eta}, \quad (4.20)$$

$$M'_{xx1} = \frac{1581,75}{41,2148 \cdot 0,86} = 44,63 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Статичний момент холостого ходу, наведений до валу двигуна, привод 2:

$$M'_{xx2} = \frac{M_{xx2}}{i \cdot \eta}, \quad (4.21)$$

$$M'_{xx2} = \frac{1736,1}{41,2148 \cdot 0,86} = 49 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Номинальний момент, що розвивається асинхронним двигуном K21F315L4:

$$M_H = 9550 \cdot \frac{P_H}{n_H}, \quad (4.22)$$

$$M_H = 9550 \cdot \frac{250}{1485} = 1608 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Перевіряємо двигуни за нагрівом:

$$\frac{P_{H1}}{P_{дв}} \cdot 100\% = \frac{472}{2 \cdot 250} \cdot 100\% = 94,4\%. \quad (4.23)$$

Перевіряємо обраний двигун за умовою перевантаження.

Двигун задовольняє умовам перевантаження, якщо виконується наступне співвідношення:

$$M_{п} > M_{ст\max}, \quad (4.24)$$

де $M_{п}$ – пусковий момент електродвигуна;

$M_{ст\max}$ – максимальний статичний момент опору механізму;

Пусковий момент електродвигуна:

$$M_{п} = 1,5 \cdot M_{ном}, \quad (4.25)$$

$$M_{п} = 1,5 \cdot 1608 = 2412 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Максимальний статичний момент опору:

$$M_{ст.\max} = 9550 \cdot \frac{P_{ст.\max}}{n_H}, \quad (4.26)$$

$$M_{ст.\max} = 9550 \cdot \frac{246,648}{1485} = 1586,18 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Виходячи з умови $M_{п} > M_{ст\max}$, маємо, що $2412 \text{ Н} \cdot \text{м} > 1587,18 \text{ Н} \cdot \text{м}$, що відповідає правильності вибору асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором за умовою перевантаження.

Електропривод листоправильної машини працює в тривалому режимі. Пуск досить рідкісний, можливий пуск з частотою 1 раз в 10 хвилин. Машина запускається на холостому ході до швидкості 0,53 м/с. Для цього випадку $M_{\text{пуск}} = M_{\text{н.дв.}} = 2412 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Час циклу прийнято рівним (з урахуванням розриву між листами) 60 с. Діаграма навантажень на ведучому валу одного приводу (вал двигуна) приведена на рисунку 4.1.

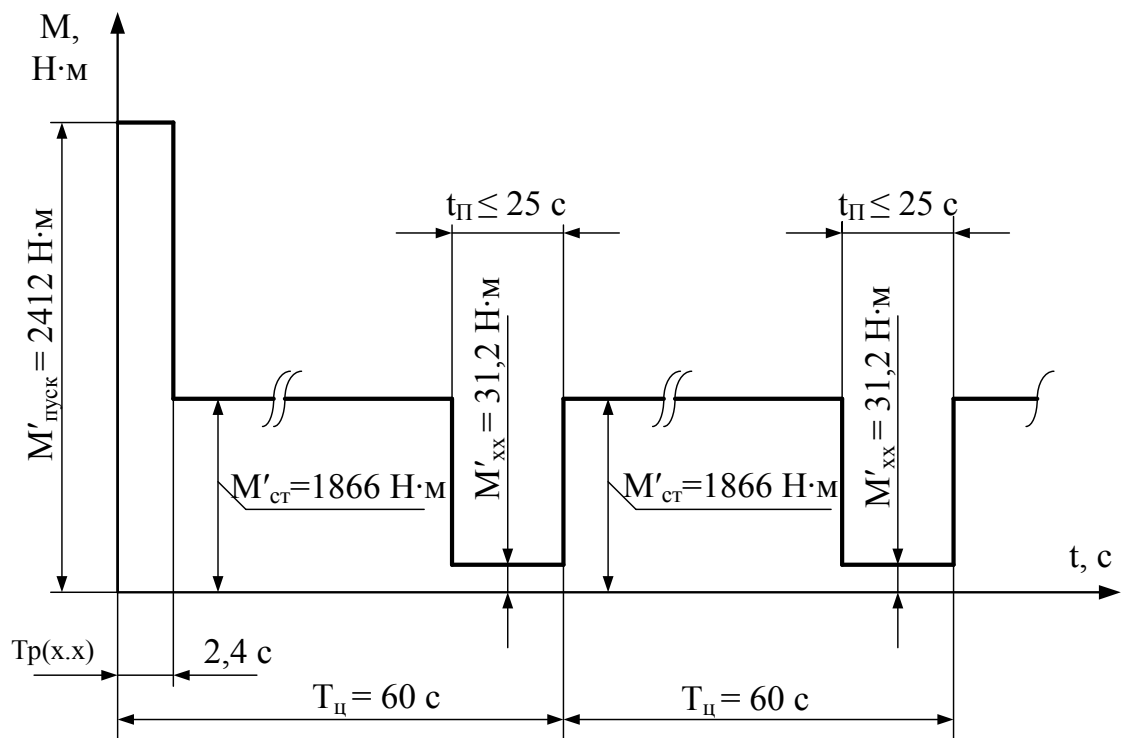


Рисунок 4.1 – Навантажувальна діаграма на ведучому валу одного приводу

5 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ПАРАМЕТРІВ

5.1 Визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

Асинхронний двигун може бути представлений наступною системою двох векторних диференціальних рівнянь [26]:

$$\begin{cases} \tilde{U}_s = R_s \tilde{I}_s + \frac{d\tilde{\Psi}_s}{dt}, \\ \tilde{U}_r = R_r \tilde{I}_r + \frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt}, \end{cases} \quad (5.1)$$

де R_s, R_r – активні опори статора і ротора відповідно;

\tilde{I}_s, \tilde{I}_r – вектори струму статора і ротора в трифазній системі координат відповідно;

\tilde{U}_s, \tilde{U}_r – вектори напруги статора і ротора в трифазній системі координат відповідно;

$\tilde{\Psi}_s, \tilde{\Psi}_r$ – вектори потокозчеплення статора і ротора в трифазній системі координат відповідно.

Система рівнянь (5.1) може бути перетворена до рівнянь балансу напруг статора і ротора еквівалентної двофазної асинхронної машини в системі координат, що обертається відносно стаціонарної системи координат статора з довільною кутовою швидкістю ω_k :

$$\begin{cases} \tilde{U}_s = R_s \tilde{I}_s + \frac{d\tilde{\Psi}_s}{dt} + j\omega_k \tilde{\Psi}_s, \\ \tilde{U}_r = R_r \tilde{I}_r + \frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r) \tilde{\Psi}_r, \end{cases} \quad (5.2)$$

де $j\omega_k \tilde{\Psi}_s$ і $j\omega_k \tilde{\Psi}_r$ – ЕРС обертання в рівняннях для відповідних обмоток, які пропорційні швидкості обертання;

$-j\omega_r \tilde{\Psi}_r$ – ЕРС обертання ротора, яка пропорційна наведеній кутовій

швидкості ротора відносно електромагнітного поля статора.

В системі рівнянь (3.7) потокозчеплення можуть бути представлені таким чином:

$$\begin{cases} \tilde{\Psi}_s = L_s \tilde{I}_s + L_m \tilde{I}_r, \\ \tilde{\Psi}_r = L_m \tilde{I}_s + L_r \tilde{I}_r, \end{cases} \quad (5.3)$$

де L_s , L_r – повні індуктивності відповідно фаз статора і ротора еквівалентної двофазної машини [27]:

$$\begin{cases} L_s = L_m + L_{s\sigma}, \\ L_r = L_m + L_{r\sigma}; \end{cases} \quad (5.4)$$

L_m – головна взаємна індуктивність між фазою статора і фазою ротора;

$L_{s\sigma}$, $L_{r\sigma}$ – індуктивності розсіювання статора і ротора відповідно.

Крім того, для еквівалентної машини справедливим є співвідношення.

$$\begin{cases} \tilde{\Psi}_s = \tilde{\Psi}_m + L_{s\sigma} \tilde{I}_s, \\ \tilde{\Psi}_r = \tilde{\Psi}_m + L_{r\sigma} \tilde{I}_r, \end{cases} \quad (5.5)$$

де $\tilde{\Psi}_m$ – вектор потокозчеплення від головного магнітного потоку (потокозчеплення в повітряному проміжку):

$$\tilde{\Psi}_m = L_m \tilde{I}_m; \quad (5.6)$$

\tilde{I}_m – вектор струму намагнічування:

$$\tilde{I}_m = \tilde{I}_s + \tilde{I}_r. \quad (5.7)$$

Для отримання рівнянь асинхронного двигуна, які зв'язують координати в установлених режимах, слід в рівняннях (5.2) прийняти $\omega_k = \omega_s = 2\pi f_s$ та $d/dt = 0$.

$$\begin{cases} \tilde{U}_s = \tilde{I}_s R_s + j\omega_s \tilde{\Psi}_s, \\ \tilde{U}_r = \tilde{I}_r R_r + j(\omega_s - \omega_r) \tilde{\Psi}_r. \end{cases} \quad (5.8)$$

Підставивши (5.5) в рівняння (5.8), отримаємо:

$$\begin{cases} \tilde{U}_s = (R_s + jX_s)\tilde{I}_s + jX_m\tilde{I}_r, \\ \frac{\tilde{U}_r}{s} = \left(\frac{R_r}{s} + jX_r\right)\tilde{I}_r + jX_m\tilde{I}_s, \end{cases} \quad (5.9)$$

де X_s, X_r – індуктивні опори статора і ротора відповідно:

$$\begin{cases} X_s = X_m + X_{s\sigma}, \\ X_r = X_m + X_{r\sigma}; \end{cases} \quad (5.10)$$

s – ковзання двигуна, яке визначається наступним чином:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}, \quad (5.11)$$

де ω_0 – синхронна швидкість;

ω – робоча швидкість.

Системі рівнянь (5.10) відповідає схема заміщення асинхронного двигуна, зображена на рисунку 5.1.

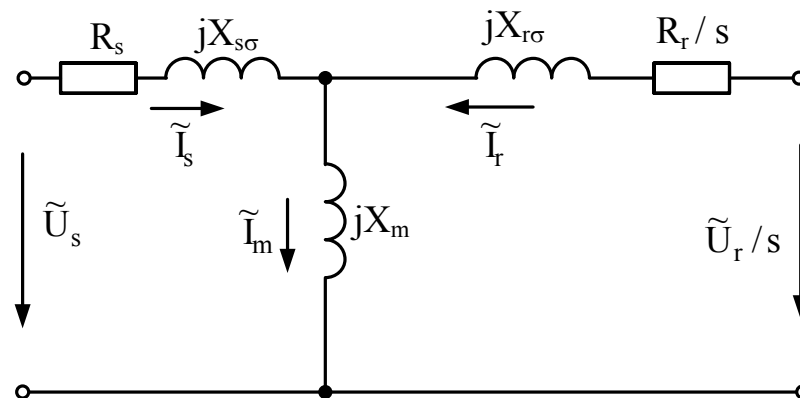


Рисунок 5.1 – Еквівалентна схема заміщення асинхронного двигуна

На підставі еквівалентної схеми заміщення з використанням методу накладання можна отримати вирази для струмів статора і ротора:

$$\begin{cases} \tilde{I}_s = \frac{\tilde{U}_s}{\bar{Z}_{0s}} - \frac{\tilde{U}_r}{s\bar{Z}_{0r}} \cdot \frac{jX_m}{R_s + jX_s}, \\ \tilde{I}_r = \frac{\tilde{U}_r}{s\bar{Z}_{0r}} - \frac{\tilde{U}_s}{\bar{Z}_{0s}} \cdot \frac{jX_m}{R_r/s + jX_r}, \end{cases} \quad (5.12)$$

де \bar{Z}_{0s} , \bar{Z}_{0r} – комплексні опори асинхронного двигуна відповідно при замкнутих на коротко обмотках ротора (з боку статора) і статора (з боку ротора):

$$\begin{cases} \bar{Z}_{0s} = \left[R_s + \frac{R_r}{s} \cdot \frac{X_m^2}{(R_r/s)^2 + X_r^2} \right] + j \cdot \left[X_{s\sigma} + X_m \frac{(R_r/s)^2 + X_r X_{r\sigma}}{(R_r/s)^2 + X_r^2} \right], \\ \bar{Z}_{0r} = \left[\frac{R_r}{s} + R_s \frac{X_m^2}{R_s^2 + X_s^2} \right] + j \cdot \left[X_{r\sigma} + X_m \frac{R_s^2 + X_s X_{s\sigma}}{R_s^2 + X_s^2} \right]. \end{cases} \quad (5.13)$$

Знаки "-" в (5.13) відображають відмінність напрямків струмів при розрахунку від зображених на рисунку 5.1.

При розгляді коротко-замкнутих двигунів, а також асинхронних двигунів з фазним ротором, обмотки ротора якого замкнуті на-коротко безпосередньо або через додаткові активні опори, напруга, прикладена до ротора, дорівнює нулю:

$$\tilde{U}_r = 0.$$

Електромагнітний момент можна визначити приблизно за спрощеною формулою Клосса [14]:

$$M = \frac{2M_k}{s/s_k + s_k/s} \quad (5.14)$$

або за уточненою:

$$M = \frac{2M_k(1 + \xi)}{s/s_k + s_k/s + 2\xi}, \quad (5.15)$$

де M_k – критичний момент двигуна; (2.18) - критичне ковзання двигуна:

$$M_k \approx \pm \frac{3U_s^2}{4\omega_0 \left(\sqrt{R_s^2 + X_k^2} \pm R_s \right)}; \quad (5.16)$$

s_k – критичне ковзання двигуна:

$$s_k \approx \pm \frac{R_r}{\sqrt{R_s^2 + X_k^2}}; \quad (5.17)$$

U_s – амплітуда вектору напруги статора;

ξ – коефіцієнт уточнення:

$$\xi = \frac{R_s}{\sqrt{R_s^2 + X_k^2}} = \frac{R_s}{R_r} s_k; \quad (5.18)$$

X_k – індуктивний опір короткого замикання:

$$X_k = X_{s\sigma} + X_{r\sigma}. \quad (5.19)$$

В (5.16) і (5.17) знак "+" має місце в рушійному режимі, "-" – в генераторному.

Розрахуємо основні параметри схеми заміщення асинхронного двигуна, використовуючи дані, наведені в таблиці 4.1. Тривалість включення вважаємо стовідсотковою.

Номінальне ковзання (синхронна частота обертання $n_0 = 1500$ об/хв., номінальна – $n_n = 1485$ об/хв.):

$$s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0}, \quad (5.20)$$

$$s_n = \frac{1500 - 1485}{1500} = 0,01.$$

Критичне ковзання можна обчислити за такою формулою:

$$s_k = s_n \left(\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1} \right) \quad (5.21)$$

де λ_m – перевантаження по моменту (визначене в попередня підрозділі $\lambda_m = 2,3$).

Тоді отримаємо

$$s_k = 0,01 \cdot \left(2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1} \right) = 0,0437.$$

Механічні втрати потужності приблизно обчислюються за такою формулою:

$$\Delta P = \left(U_{\text{л}} \sqrt{3} I_{\text{ф}} \cos \varphi_{\text{н}} - P_{\text{н}} \right) \left(1 + \frac{n_{\text{н}}^2}{1000^2} \right) \cdot 0,05, \quad (5.22)$$

де $U_{\text{л}}$ – лінійна напруга двигуна ($U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$);

$I_{\text{ф}}$ – номінальний фазний струм двигуна;

$\cos \varphi_{\text{н}}$ – номінальний коефіцієнт потужності ($\cos \varphi_{\text{н}} = 0,9$).

$$\Delta P = \left(380 \cdot \sqrt{3} \cdot 438,9 \cdot 0,9 - 250000 \right) \cdot \left(1 + \frac{1485^2}{1500^2} \right) \cdot 0,05 = 988,8 \text{ (Вт)}.$$

Опір фази статора визначаємо таким чином:

$$R_s = 3 \left(\frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \frac{1 - s_{\text{н}}}{2b_{\text{к}} \left(1 + \frac{b_{\text{к}}}{s_{\text{к}}} \right) \lambda_{\text{м}} (P_{\text{н}} - \Delta P)}, \quad (5.23)$$

де $b_{\text{к}}$ – додатковий коефіцієнт:

$$b_{\text{к}} = 1 + s_{\text{к}}, \quad (5.24)$$

$$b_{\text{к}} = 1 + 0,0437 = 1,0437.$$

$$R_s = 3 \cdot \left(\frac{380}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \frac{1 - 0,01}{2 \cdot 1,0437 \left(1 + \frac{1,0437}{0,0437} \right) 2,3 (250000 - 988,8)} = 0,0043 \text{ (Ом)}.$$

Опір фази ротора:

$$R_r = \frac{P_{\text{н}} + \Delta P}{3 \left(1 - s_{\text{н}} + \frac{b_{\text{к}}}{s_{\text{к}}} \right) \cdot \lambda_{\text{І}} \cdot I_{\text{ф}}^2}, \quad (5.25)$$

де $\lambda_{\text{І}}$ – допустиме перевантаження по струму для обраного двигуна ($\lambda_{\text{І}} = 5$).

$$R_r = \frac{250000 + 988,8}{3 \left(1 - 0,01 + \frac{1,0437}{0,0437} \right) \cdot 5 \cdot 438,9^2} = 0,0035 \text{ (Ом)}.$$

Індуктивність статора:

$$L_s = \frac{U_{\text{л}}}{2\sqrt{3} \cdot \pi \cdot 50 \cdot I_{\phi} \cdot \left(\sqrt{1 - \cos \varphi_{\text{H}}} - \cos \varphi_{\text{H}} \frac{S_{\text{H}}}{S_{\text{K}}} \right)}, \quad (5.26)$$

$$L_s = \frac{380}{2\sqrt{3} \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 438,9 \cdot \left(\sqrt{1 - 0,9} - 0,9 \frac{0,01}{0,0437} \right)} = 0,014 \text{ (Гн)}.$$

Індуктивність розсіювання фазної обмотки статора:

$$L_{s\sigma} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_{\text{л}}}{\lambda_I I_{\phi} \sqrt{3}} \right)^2 - (R_s + R_r)^2}}{2 \cdot \pi \cdot 50}, \quad (5.27)$$

$$L_{s\sigma} = \frac{\sqrt{\left(\frac{380}{5 \cdot 438,9 \cdot \sqrt{3}} \right)^2 - (0,0043 + 0,0035)^2}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00031 \text{ (Гн)}.$$

Припустимо, що індуктивність статора і наведена індуктивність ротора приблизно рівні, тобто

$$L_r = L_s = 0,014 \text{ Гн}.$$

Тоді індуктивність головного магнітного контуру визначається як

$$L_m = L_s - L_{s\sigma}, \quad (5.28)$$

$$L_m = 0,014 - 0,00031 = 0,01369 \text{ (Гн)}.$$

Розраховані вище параметри схеми заміщення далі використовуються при моделюванні електричної машини. Для більш наочного уявлення вони зведені в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Розрахункові параметри схеми заміщення

Величина	Назва	Значення	Одиниця вимірювання
1	2	3	4
Активний опір статора	R_s	0,0043	Ом
Приведений активний опір ротора	R_r	0,0035	Ом
Індуктивність статора	L_s	0,014	Гн
Приведена індуктивність ротора	L_r	0,014	Гн
Індуктивність розсіювання статора	$L_{s\sigma}$	0,00031	Гн

5.2 Побудова статичної характеристики асинхронного двигуна

Побудуємо статичну характеристику асинхронного двигуна, яка приведена на рисунку 5.2).

Синхронна швидкість:

$$\omega_0 = n_0 \pi / 30, \quad (5.29)$$

$$\omega_0 = 1500 \cdot \pi / 30 = 157 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

Номінальна швидкість:

$$\omega_n = n_n \pi / 30, \quad (5.30)$$

$$\omega_n = 1485 \cdot \pi / 30 = 155,43 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

Критичний момент:

$$M_k = \lambda_m M_n, \quad (5.31)$$

$$M_k = 2,3 \cdot 1608 = 3698,4 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

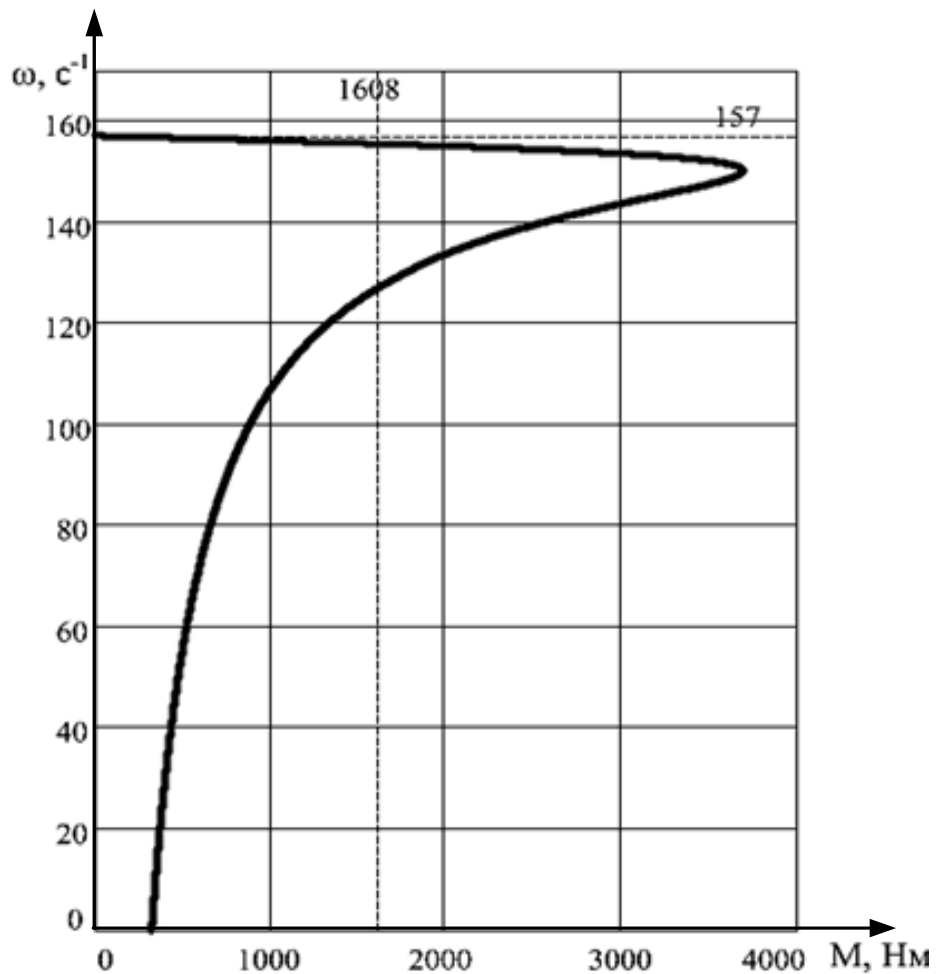


Рисунок 5.2 – Статична характеристика асинхронного двигуна

5.3 Розрахунок динамічних параметрів двигуна

Для побудови структурної схеми і отримання динамічних характеристик двигуна окрім розглянутих вище статичних параметрів, потрібно використовувати кілька типових динамічних значень. Розрахуємо параметри, необхідні для моделювання.

Коефіцієнт магнітного зв'язку статора:

$$k_s = \frac{L_m}{L_s}, \quad (5.32)$$

$$k_s = \frac{0,01369}{0,014} = 0,977.$$

Коефіцієнт магнітного зв'язку ротора:

$$k_r = \frac{L_m}{L_r}, \quad (5.33)$$

$$k_r = \frac{0,01369}{0,014} = 0,977.$$

Перехідна індуктивність статора

$$L'_s = (1 - k_s k_r) L_s, \quad (5.34)$$

$$L'_s = (1 - 0,977 \cdot 0,977) \cdot 0,014 = 0,00031 \text{ (Гн)}.$$

Перехідна індуктивність ротора:

$$L'_r = (1 - k_s k_r) L_r, \quad (5.35)$$

$$L'_r = (1 - 0,977 \cdot 0,977) \cdot 0,014 = 0,00031 \text{ (Гн)}.$$

Приведена постійна часу статора:

$$T'_s = \frac{L'_s}{R_s}, \quad (5.36)$$

$$T'_s = \frac{0,00031}{0,0043} = 0,072 \text{ (с)}.$$

Коефіцієнт розсіювання:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}, \quad (5.37)$$

$$\sigma = 1 - \frac{0,01369^2}{0,014 \cdot 0,014} = 0,044.$$

Приведений активний опір ротора:

$$r = k_s R_s + R_r, \quad (5.38)$$

$$r = 0,977 \cdot 0,0043 + 0,0035 = 0,0077 \text{ (Ом)}.$$

Приведена постійна часу ротора:

$$T' = \frac{L'_r}{r}, \quad (5.39)$$

$$T' = \frac{0,00031}{0,0077} = 0,04 \text{ (с)}.$$

Постійна часу ротора:

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}, \quad (5.40)$$

$$T_r = \frac{0,014}{0,0035} = 4 \text{ (с)}.$$

Еквівалентний активний опір двигуна:

$$R_\ell = R_s + k_r^2 R_r, \quad (5.41)$$

$$R_\ell = 0,0043 + 0,977^2 \cdot 0,0035 = 0,0033 \text{ (Ом)}.$$

Еквівалентна електромагнітна постійна часу статора:

$$T_\ell = \sigma L_s / R_\ell, \quad (5.42)$$

$$T_\ell = 0,044 \cdot 0,014 / 0,0033 = 0,186 \text{ (с)}.$$

5.4 Математичний опис і динамічна модель асинхронного двигуна як узагальненої електричної машини в двофазній системі координат

При математичному описі асинхронної машини використовується загальноприйняті припущення і обмеження, а саме:

- магнітна система машини ненасичена;
- втрати в сталі відсутні;
- фазні обмотки машини симетричні і розташовані точно на 120° (для трифазних машин);
- магніторушійні сили обмоток і магнітні поля розподілені по всьому полю повітряного зазору за синусоїдальним законом;
- величина повітряного зазору постійна;

- ротор машини симетричний;
- реальна розподілена обмотка замінена еквівалентною зосередженою, яка створює ту ж магніторушійних силу.

Сучасний рівень розвитку комп'ютерної техніки дає можливість з урахуванням прийнятих припущень будувати модель асинхронного двигуна у фазних координатах. Однак структурна схема моделі при цьому виходить досить складною через наявність змінних коефіцієнтів в рівняннях зв'язків фазних струмів і потокозчеплень машини, які залежать від миттєвого значення кута повороту ротора відносно магнітних осей статора двигуна.

З метою спрощення математичних моделей систему рівнянь трифазної асинхронної машини, записану в фазних координатах, прийнято представляти в ортогональній системі координат (x-y), яка обертається в просторі в загальному випадку з довільною кутовою швидкістю. На рисунку 5.3 показано розкладання трифазного вектору в декількох двофазних системах координат [18].

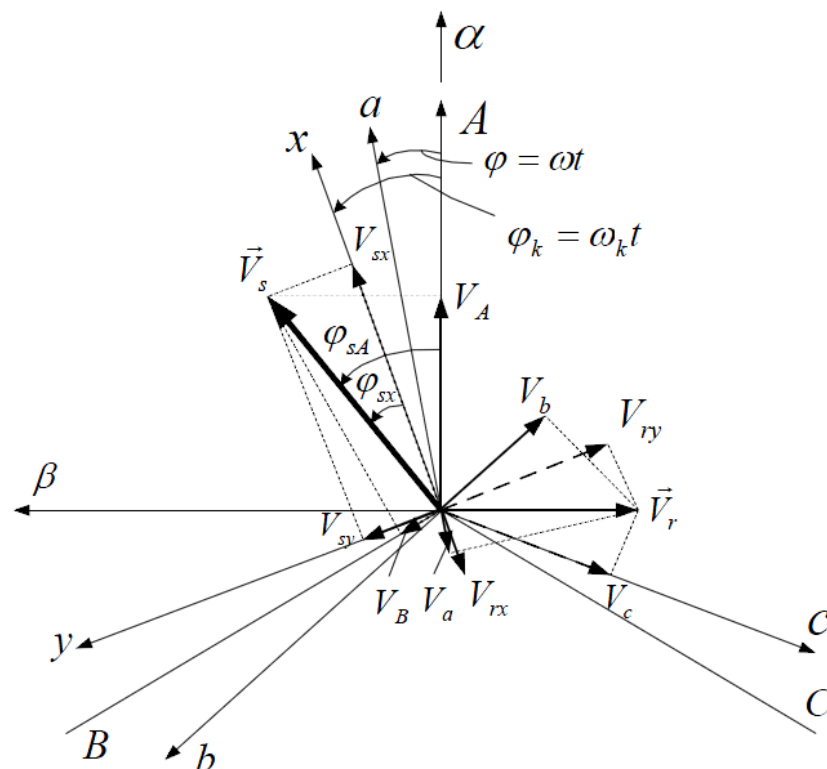


Рисунок 5.3 – Розкладання трифазного вектору в двофазних системах координат

Еквівалентна напруга статора в системі координат (x-y) пов'язана з фазними

напругами трифазної машини наступними співвідношеннями:

$$U_{sx} = \frac{2}{3} \left[U_{\Phi A} \cos \omega_k t + U_{\Phi B} \cos \left(\omega_k t - \frac{2\pi}{3} \right) + U_{\Phi C} \cos \left(\omega_k t + \frac{2\pi}{3} \right) \right], \quad (5.43)$$

$$U_{sy} = -\frac{2}{3} \left[U_{\Phi A} \sin \omega_k t + U_{\Phi B} \sin \left(\omega_k t - \frac{2\pi}{3} \right) + U_{\Phi C} \sin \left(\omega_k t + \frac{2\pi}{3} \right) \right], \quad (5.44)$$

де $U_{\Phi A}$, $U_{\Phi B}$, $U_{\Phi C}$ – фазні напруги для фаз А, В, С відповідно;

U_{sx} , U_{sy} – напруги статора, представлені в ортогональній двофазній системі координат.

Аналогічні співвідношення пов'язують еквівалентні значення струмів і потокозчеплень двигуна з відповідними фазними значеннями змінних. Підставляючи в ці рівняння вирази для реальної фазної напруги, отримаємо:

$$\begin{cases} U_{\Phi A} = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \\ U_{\Phi B} = U_m \cos\left(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_0\right), \\ U_{\Phi C} = U_m \cos\left(\omega_0 t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_0\right). \end{cases} \quad (5.45)$$

Можна отримати вирази для складових напруг в еквівалентній двофазній системі координат:

$$\begin{cases} U_{sx} = U_m \cos[(\omega_0 - \omega_k)t + \varphi_0], \\ U_{sy} = U_m \sin[(\omega_0 - \omega_k)t + \varphi_0], \end{cases} \quad (5.46)$$

де U_m – амплітудне значення фазної напруги;

ω_0 – частота обертання поля статора двигуна в просторі;

φ_0 – початкова фаза напруги фази А двигуна.

Система рівнянь електромагнітної рівноваги асинхронного двигуна в формі Коші в системі координат (x-y) може бути представлена таким чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_{sx}}{dt} = U_{sx} - R_s i_{sx} + \omega_k \Psi_{sy}, \\ \frac{d\Psi_{sy}}{dt} = U_{sy} - R_s i_{sy} - \omega_k \Psi_{sx}, \\ \frac{d\Psi_{rx}}{dt} = -R_r i_{rx} + (\omega_k - \omega) \Psi_{ry}, \\ \frac{d\Psi_{ry}}{dt} = -R_r i_{ry} - (\omega_k - \omega) \Psi_{rx}, \end{array} \right. \quad (5.47)$$

де Ψ_{sx}, Ψ_{sy} – потокозчеплення еквівалентних статорних контурів;

Ψ_{rx}, Ψ_{ry} – потокозчеплення еквівалентних роторних контурів;

i_{sx}, i_{sy} – еквівалентні струми статора;

i_{rx}, i_{ry} – еквівалентні струми ротора;

R_s, R_r – активні опори фазних обмоток статора і ротора;

ω – частота обертання ротора двигуна.

Для вирішення цієї системи рівнянь, її необхідно доповнити рівняннями зв'язку еквівалентних струмів і потокозчеплень машини в системі координат (x-y). Рівняння при розкладанні в ортогональну двофазну систему координат будуть мати наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{sx} = L_s i_{sx} + L_m i_{rx}, \\ \Psi_{sy} = L_s i_{sy} + L_m i_{ry}, \\ \Psi_{rx} = L_m i_{sx} + L_r i_{rx}, \\ \Psi_{ry} = L_m i_{sy} + L_r i_{ry}. \end{array} \right. \quad (5.48)$$

Коефіцієнти в рівняннях зв'язку між еквівалентними струмами і потокозчеплення не залежать від миттєвого значення кута повороту ротора відносно магнітної осі статора двигуна. Для побудови математичної моделі асинхронного двигуна зручніше користуватися зворотними залежностями, тобто залежностями, які мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{sx} = \frac{1}{\sigma L_s} \Psi_{sx} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \Psi_{rx}, \\ i_{sy} = \frac{1}{\sigma L_s} \Psi_{sy} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \Psi_{ry}, \\ i_{rx} = -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \Psi_{sx} + \frac{1}{\sigma L_r} \Psi_{rx}, \\ i_{ry} = -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \Psi_{sy} + \frac{1}{\sigma L_r} \Psi_{ry}, \end{array} \right. \quad (5.49)$$

де σ – коефіцієнт розсіювання двигуна.

Вираз для електромагнітного моменту асинхронного двигуна є векторним додаванням будь-якої пари просторових векторів струмів і потокозчеплень. Таким чином, в системі координат (x-y) можна використовувати шість рівнянь для знаходження електромагнітного моменту двигуна. При використанні будь-яких з цих виразів результат буде однаковим:

$$\left\{ \begin{array}{l} M = \frac{3}{2} p_{\Pi} (\Psi_{sx} i_{sy} - \Psi_{sy} i_{sx}), \\ M = \frac{3}{2} p_{\Pi} (i_{rx} \Psi_{ry} - i_{ry} \Psi_{rx}), \\ M = \frac{3}{2} L_m p_{\Pi} (i_{rx} i_{sy} - i_{ry} i_{sx}), \\ M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} p_{\Pi} (\Psi_{rx} \Psi_{sy} - \Psi_{ry} \Psi_{sx}), \\ M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} p_{\Pi} (i_{rx} \Psi_{sy} - i_{ry} \Psi_{sx}), \\ M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} p_{\Pi} (\Psi_{rx} i_{sy} - \Psi_{ry} i_{sx}), \end{array} \right. \quad (5.50)$$

де p_{Π} – кількість пар полюсів асинхронного двигуна.

Вибір того чи іншого виду рівняння для електромагнітного моменту здійснюється за умовою раціональної побудови структурної схеми математичної моделі.

Рівняння руху двигуна в одно-масовій механічній системі має вигляд:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{\Sigma}}(M - M_c), \quad (5.51)$$

де J_{Σ} – сумарний момент інерції ротора двигуна і механізму;

M_c – статичний момент навантаження електроприводу.

Структурна схема асинхронного двигуна в довільній системі координат (x - y) представлена на рисунку 5.4.

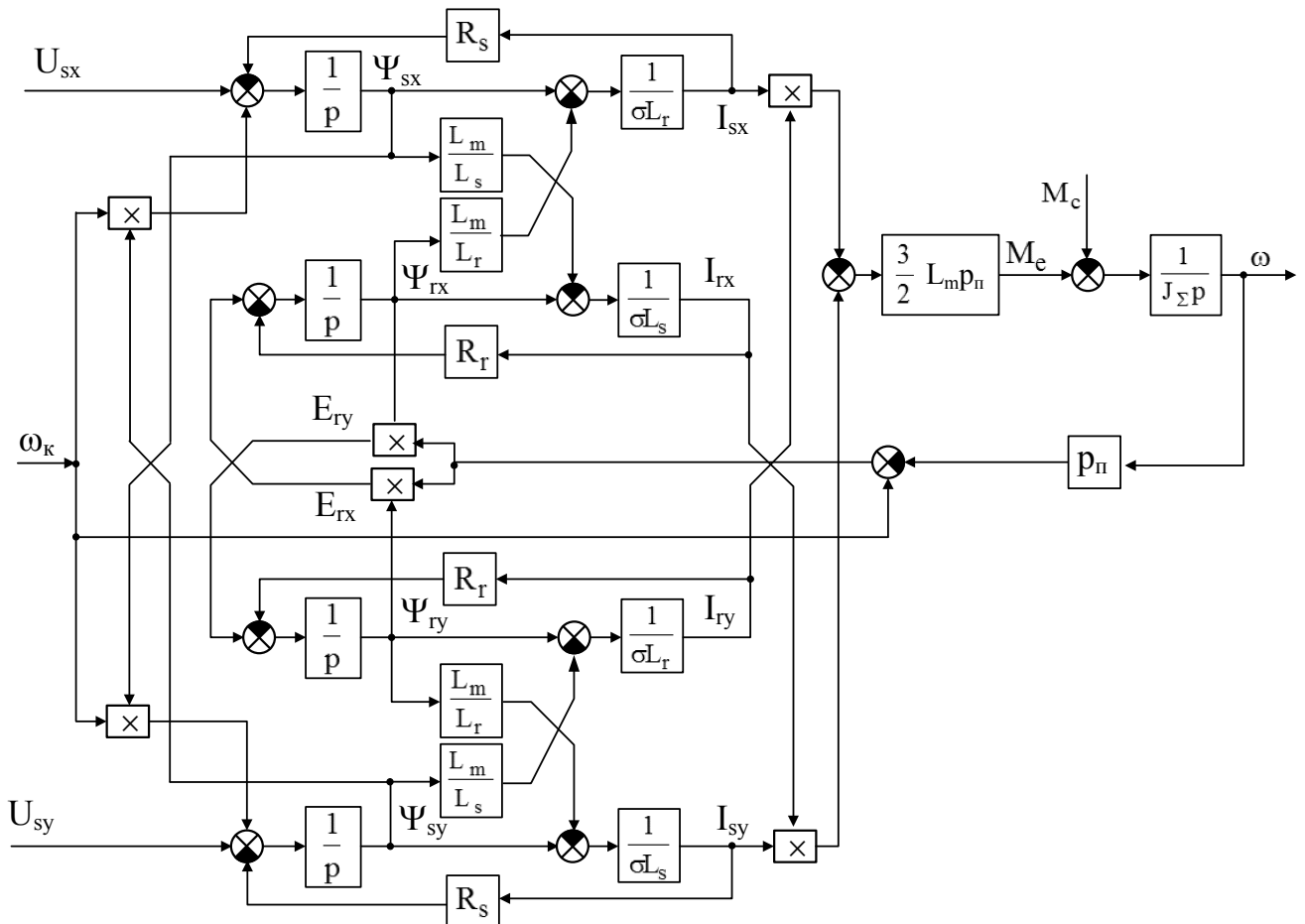


Рисунок 5.4 – Структурна схема асинхронного двигуна в системі координат, яка обертається в просторі з довільною кутовою швидкістю ω_k

Залежно від швидкості обертання системи координат рівняння електромагнітної рівноваги асинхронного двигуна трохи видозмінюється, але механічна характеристика двигуна, розрахована в системі координат, що обертається в просторі з будь-якою кутовою швидкістю ω_k , не змінюється.

Найчастіше використовуються дві найбільш зручні системи координат, які є окремими випадками розглянутої вище:

– система координат, нерухома відносно статора електричного двигуна, тобто така система буде мати $\omega_k = 0$;

– система координат, нерухома відносно ротора електричного двигуна, тобто вона обертається з частотою обертання ротора $\omega_k = \omega$.

5.5 Аналіз роботи асинхронного двигуна на базі моделі в нерухомій відносно статора системі координат ($\alpha - \beta$)

5.5.1 Модель асинхронного двигуна в системі координат ($\alpha - \beta$)

У нерухомій відносно статора системі координат $\omega_k = 0$. Осі в цій системі координат позначаються ($\alpha - \beta$). Головна перевага системи координат ($\alpha - \beta$) полягає в тому, що при виборі положення однієї з її осей (як правило, приймається вісь α), що збігається з магнітною віссю однієї з фаз реальної машини, еквівалентний струм $i_{s\alpha}$ дорівнюватиме реальному фазному струму двигуна. Ця система координат широко застосовується для аналізу систем електроприводу з керуванням рушійними і гальмівними режимами по колу статора, в тому числі і при аналізі систем з векторним керуванням. Певну складність при побудові моделі асинхронного двигуна в системі координат ($\alpha - \beta$) представляє те, що еквівалентні напруги $U_{s\alpha}$ і $U_{s\beta}$ змінюються в часі за синусоїдальним законом. Якщо частота джерела електроенергії f_c постійна, то $\omega_0 = 2\pi f_c / p_{\Pi} = \text{const}$ і для формування гармонійних вхідних сигналів моделі можуть бути використані дві консервативні ланки з передавальними функціями:

$$W_1(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2 + \omega_0^2}, \quad (5.51)$$

$$W_2(p) = \frac{\omega_0 p}{p^2 + \omega_0^2}. \quad (5.52)$$

Перехідні функції таких ланок мають вигляд:

$$h_1(t) = l(t) \cdot (1 - \cos(\omega_0 t)), \quad (5.53)$$

$$h_2(t) = 1(t) \cdot \sin(\omega_0 t), \quad (5.54)$$

де $1(t)$ – одинична ступінчата функція.

Еквівалентні складові напруги статора асинхронного двигуна в системі координат $(\alpha - \beta)$ можуть бути отримані таким чином:

$$U_{s\alpha} = U_m \cdot (1 - h_1(t)), \quad (5.55)$$

$$U_{s\beta} = U_m \cdot h_2(t). \quad (5.56)$$

На рисунку 5.5 представлена структурна схема математичної моделі асинхронного двигуна в нерухомій відносно статора системі координат $(\alpha - \beta)$ [28].

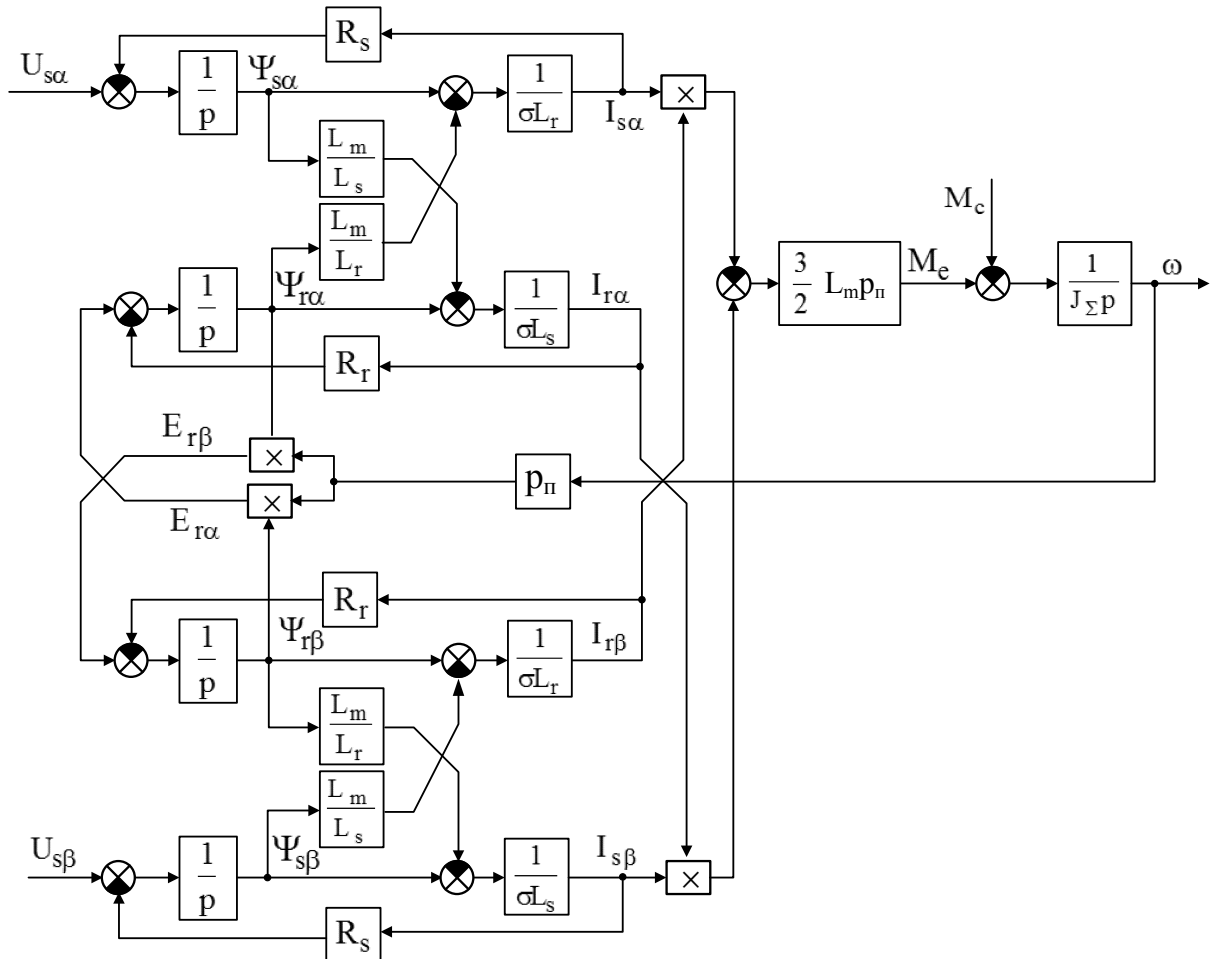


Рисунок 5.5 – Структурна схема асинхронного двигуна в системі координат $(\alpha - \beta)$, нерухомій відносно статора

Незважаючи на деякі складності при формуванні еквівалентних напруг $U_{s\alpha}$ і $U_{s\beta}$ система координат $(\alpha - \beta)$ широко застосовується при побудові систем

векторного керування асинхронним електроприводом. У цій системі координат змінні роторного поля двигуна, що обчислюються, змінюються в часі за синусоїдальним законом з частотою ω_0 . Перехід від еквівалентних струмів за осями α і β до фазних струмів статора можна виконати таким чином:

$$\begin{cases} i_A = i_{s\alpha}, \\ i_B = -\frac{1}{2}i_{s\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{s\beta}, \\ i_C = -\frac{1}{2}i_{s\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{s\beta}. \end{cases} \quad (5.57)$$

Перехід від еквівалентних струмів за осями α і β до фазних струмів роторних контурів виконується так [18]:

$$\begin{cases} i_a = i_{r\alpha} \cos \omega t + i_{r\beta} \sin \omega t, \\ i_b = i_{r\alpha} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{r\beta} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), \\ i_c = i_{r\alpha} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{r\beta} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right). \end{cases} \quad (5.58)$$

Аналогічно може бути здійснений перехід до фазних координат для інших змінних статора і ротора.

5.5.2 Побудова перехідних функцій асинхронного двигуна на базі моделі в системі координат ($\alpha - \beta$)

Використовуючи математичні описи і структурні схеми асинхронного двигуна в системі координат ($\alpha - \beta$) з попередніх підрозділів, побудуємо його модель в програмному середовищі MATLAB Simulink.

Для приведення трифазної напруги живлення електричної машини до двофазної в системі координат ($\alpha - \beta$) використовуємо координатний перетворювач (рисунок 5.6), який працює за таким законом:

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = U_{sA}, \\ U_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(U_{sB} - U_{sC}), \end{cases} \quad (5.59)$$

де U_{sA} , U_{sB} , U_{sC} – миттєві значення напруг статора в трифазній системі координат.

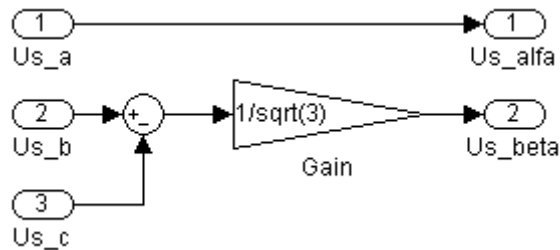


Рисунок 5.6 – Модель координатного перетворювача 3-2 в MATLAB Simulink

Надалі координатний перетворювач представляється у вигляді, згорнутому до маскованої підсистеми.

Додаткові розрахункові параметри для побудови моделі:

$$\frac{1}{\sigma L_r} = \frac{1}{0,044 \cdot 0,014} = 1623,3;$$

$$\frac{1}{\sigma L_s} = \frac{1}{0,044 \cdot 0,014} = 1623,3;$$

$$\frac{3}{2} L_{mpn} = \frac{3}{2} \cdot 0,01369 \cdot 3 = 0,0616;$$

$$J_{\Sigma} = J = 5,9 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2 \text{)}.$$

Модель асинхронного двигуна як маскує підсистеми в MATLAB Simulink представлена на рисунку 5.7.

Ця модель побудована відповідно до структурної схеми, представленої на рисунку 5.5. На вхід вона отримує значення $U_{s\alpha}$ і $U_{s\beta}$ від координатного перетворювача. Як виходи моделі використовуються наступні параметри: швидкість обертання валу двигуна, проєкції струмів на осі ($\alpha - \beta$) і момент

двигуна. Струм статора в цій моделі розраховується як корінь квадратний із суми квадратів проєкцій на осі ($\alpha - \beta$).

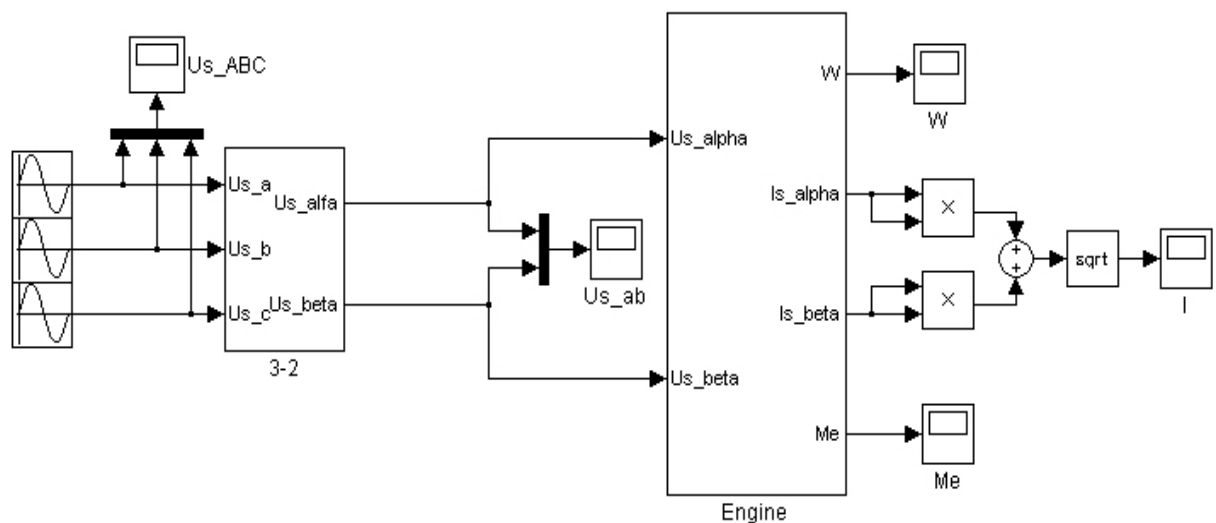


Рисунок 5.7 – Модель асинхронного двигуна з координатним перетворювачем, джерелами живлення і блоками для відображення графічної інформації

Підсистема Engine моделі рисунка 5.7 приведена на рисунку 5.8.

На рисунках 5.9 – 5.13 представлені результати моделювання в програмному середовищі MATLAB Simulink.

Аналізуючи залежності, представлені на рисунках 5.11 – 5.13 можна зробити висновок, що максимальне значення пускового моменту не перевищує допустимого в $2,3M_H = 2,3 \cdot 1608 = 3698,4 \text{ (Нм)} > 2412 \text{ (Нм)}$.

Максимальне значення струму під час пуску складає 1755,6 А. Воно також не перевищує допустимого значення струмового перевантаження в

$$5I_H = 5 \cdot 438,9 = 2194,5 \text{ (А)}.$$

Тому умови пуску можна вважати правильними.

З перехідної функції по швидкості випливає, що пуск буде досить тривалим: на розгін до швидкості, близької до швидкості холостого ходу двигун витрачає 17 с. Така тривалість зумовлена в першу чергу великим моментом інерції елементів, які обертаються, і може бути скорочена за допомогою регуляторів.

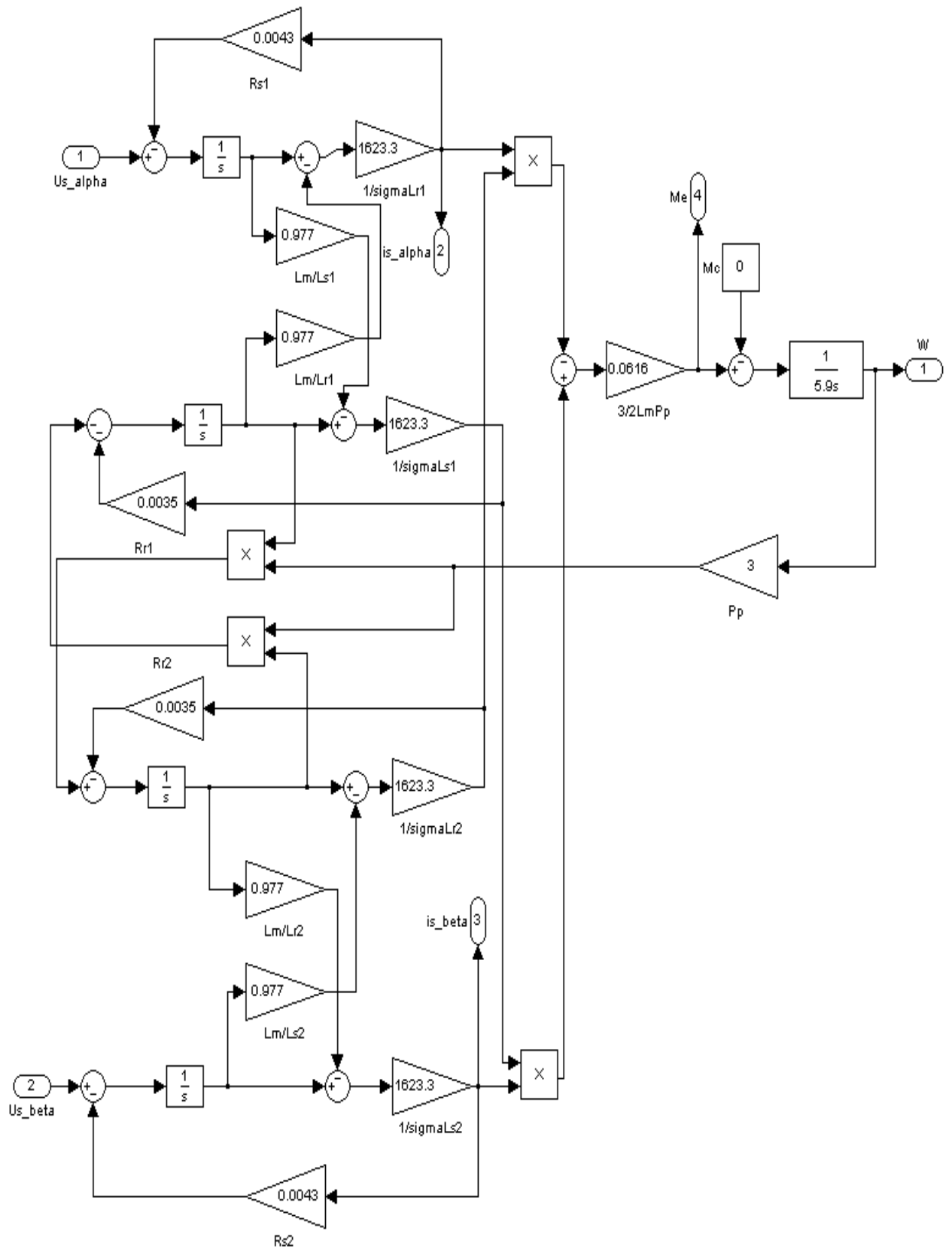


Рисунок 5.8 – Підсистема Engine моделі рисунка 5.7

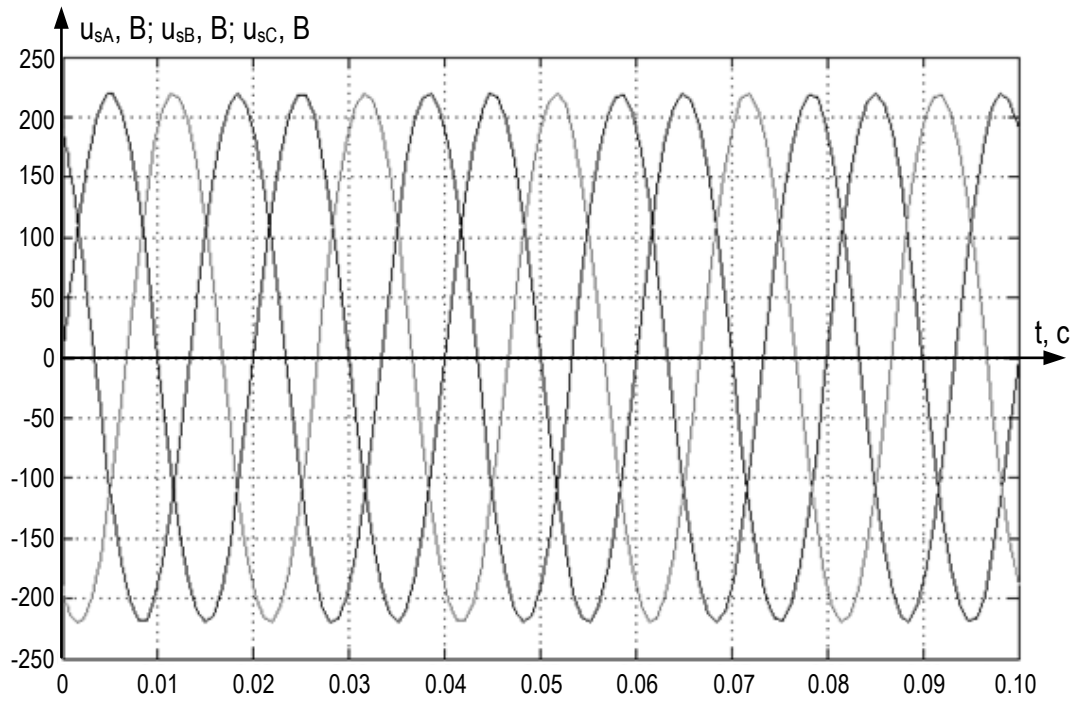


Рисунок 5.9 – Фазні напруги, які подаються на вхід моделі

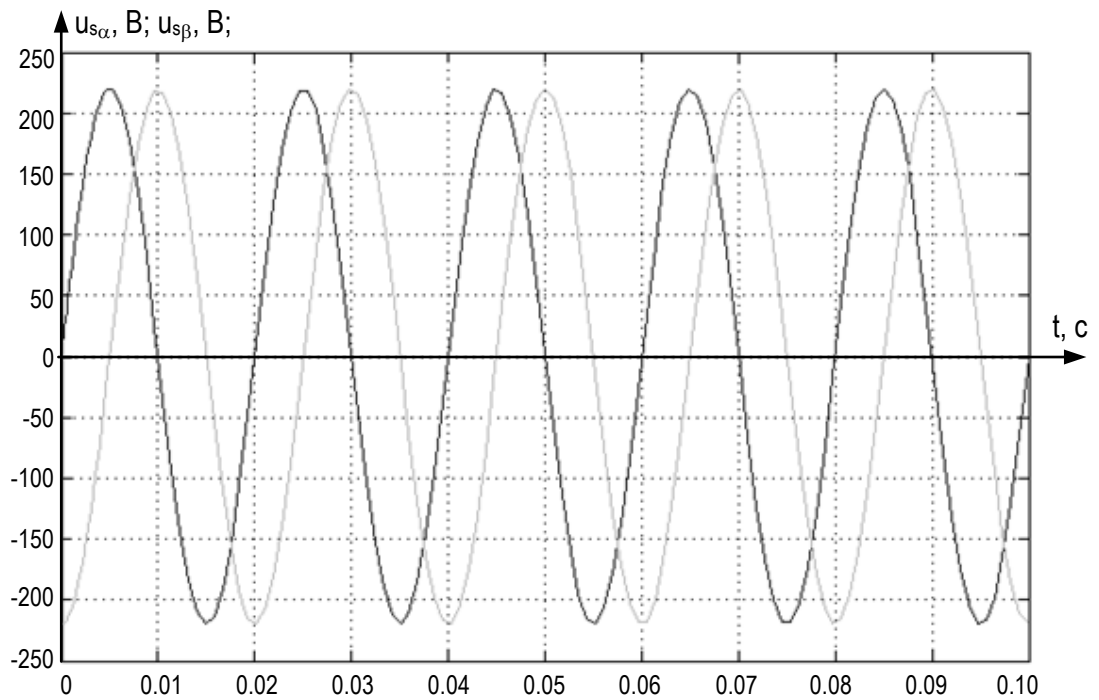


Рисунок 5.10 – Напруги на виході координатного перетворювача 3-2

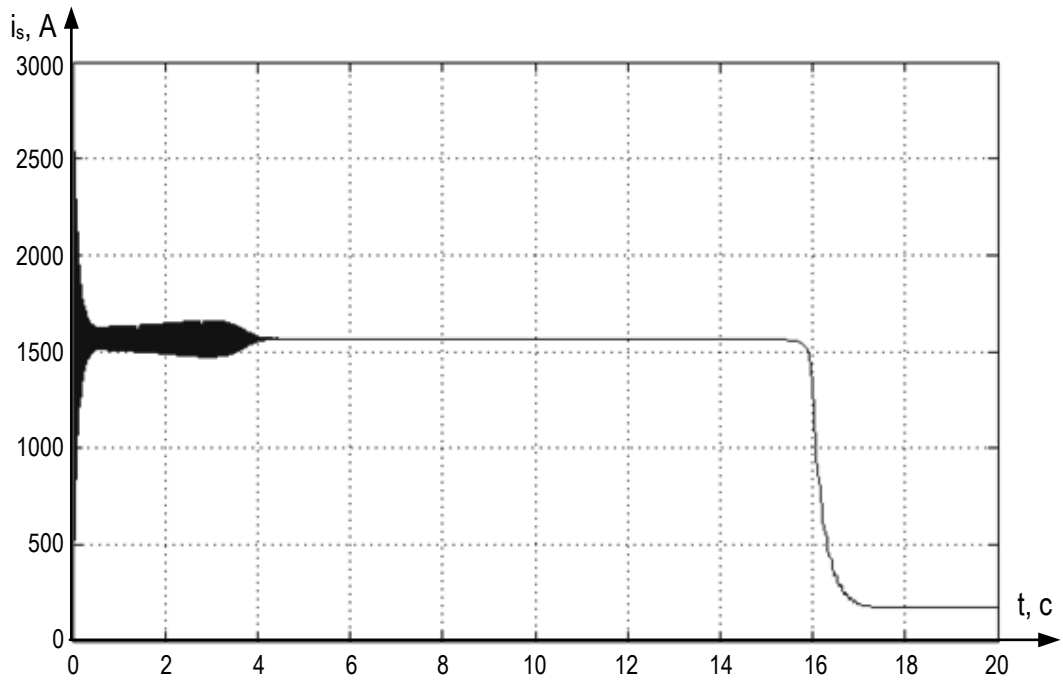


Рисунок 5.11 – Залежність діючого значення струму статора під часу пуску в холостому режимі, отримана на моделі асинхронного двигуна в системі координат $(\alpha - \beta)$

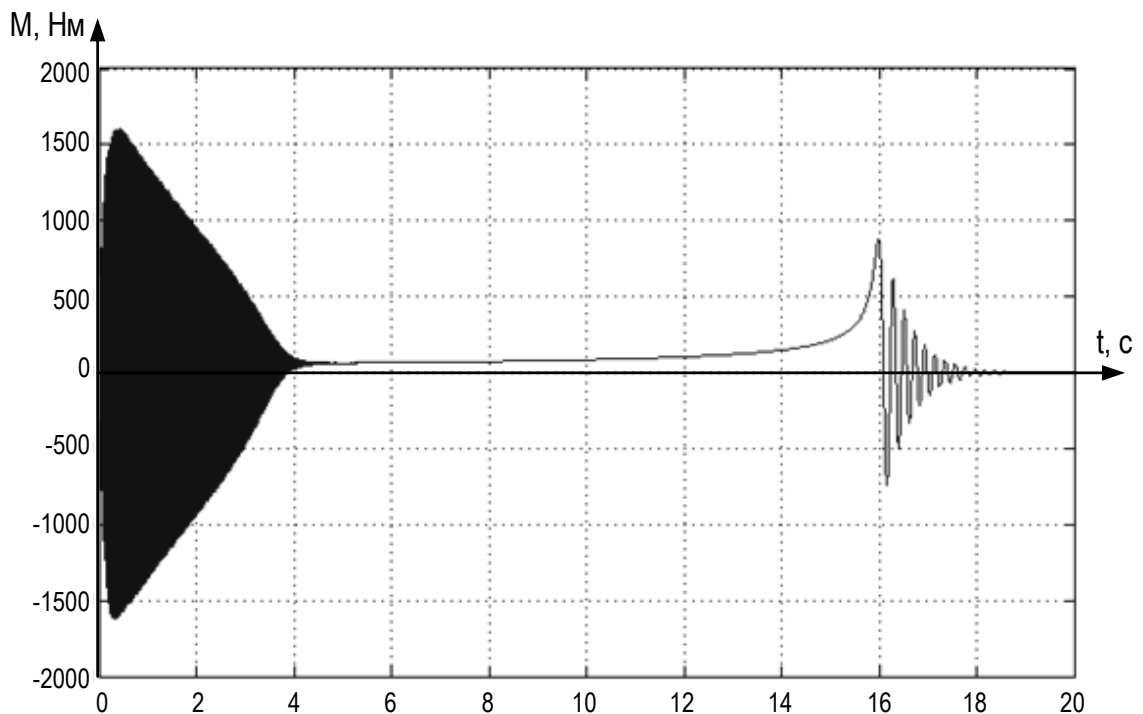


Рисунок 5.12 – Залежність моменту двигуна під часу пуску в холостому режимі, отримана на моделі асинхронного двигуна в системі координат $(\alpha - \beta)$

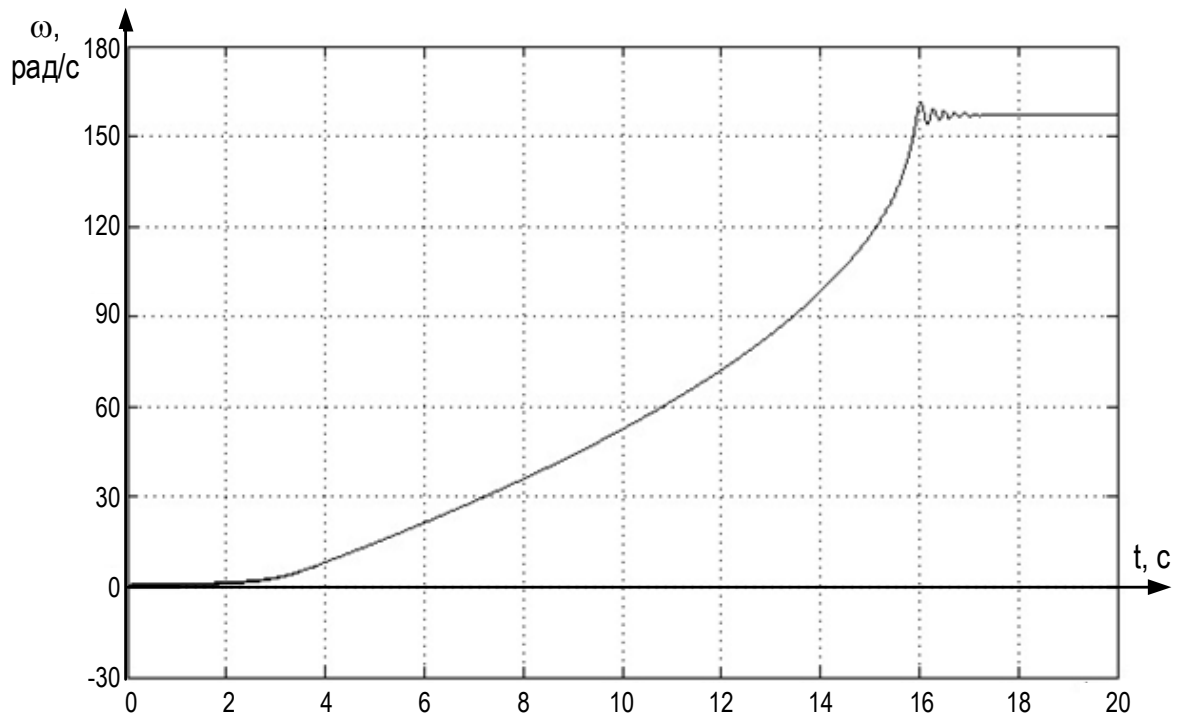


Рисунок 5.13 – Перехідна функція по швидкості під час пуску в холостому режимі, отримана на моделі асинхронного двигуна в системі координат $(\alpha - \beta)$

5.6 Аналіз роботи асинхронного двигуна на базі моделі в системі координат $(d - q)$, яка обертається з частотою обертання ротора

5.6.1 Модель асинхронного двигуна в системі координат $(d - q)$

Система координат $(d - q)$ є нерухомою відносно ротора двигуна і обертається відносно статора з частотою обертання ротора, тобто $\omega_k = \omega$. Така система координат знаходить широке застосування для аналізу перехідних процесів в синхронних і асинхронних двигунах при не-симетрії ротора.

Система координат, яка обертається з частотою обертання ротора, зсунута відносно нерухомої системи координат на кут Θ_1 (рисунок 5.14).

В усталеному режимі кут θ_1 залишається незмінним. Під час перехідних процесів його значення змінюється. Дійсна вісь системи координат d буде жорстко з'єднана з напрямком вектора потокозчеплення ротора як в перехідних,

так і в сталих режимах роботи – система координат орієнтована по вектору $\tilde{\Psi}_r$. Диференціальні рівняння для опису такої орієнтованої системи координат отримують, виходячи зі структури, побудованої за векторами $\tilde{I}_s, \tilde{\Psi}_r$.

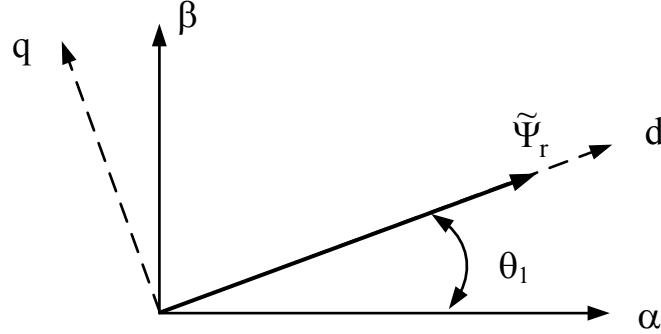


Рисунок 5.14 – Системи координат $(\alpha - \beta)$ і $(d - q)$

Рівняння по векторах $\tilde{I}_s, \tilde{\Psi}_r$, виходячи із загального опису асинхронного двигуна, можуть бути представлені в такому вигляді [28]:

$$\begin{cases} U_{sx} = R_s i_{sx} + k_r p \Psi_{rx} + \sigma L_s p i_{sx} - k_r \omega_k \Psi_{ry} + \sigma L_s \omega_k i_{sy}, \\ U_{sy} = R_s i_{sy} + k_r p \Psi_{ry} + \sigma L_s p i_{sy} + k_r \omega_k \Psi_{rx} + \sigma L_s \omega_k i_{sx}, \\ U_{rx} = T_r^{-1} \Psi_{rx} - k_r R_r i_{sx} + p \Psi_{rx} - (\omega_k - \omega_r) \Psi_{ry}, \\ U_{ry} = T_r^{-1} \Psi_{ry} - k_r R_r i_{sy} + p \Psi_{ry} + (\omega_k - \omega_r) \Psi_{rx}. \end{cases} \quad (5.60)$$

Рівняння балансу напруги статора в (5.60) містять по дві вихідних від сигналів складових. Виконаємо приріст, віднявши від першого і другого рівнянь відповідно третє і четверте, помножені на коефіцієнт k_r . В результаті рівняння рівноваги напруг статора і ротора можна привести до вигляду:

$$\begin{cases} U_{sx} - k_r U_{rx} = R_s i_{sx} + \sigma L_s p i_{sx} + \sigma L_s \omega_k i_{sy} - k_r T_r^{-1} \Psi_{rx} - k_r \omega_r \Psi_{ry}, \\ U_{sy} - k_r U_{ry} = R_s i_{sy} + \sigma L_s p i_{sy} + \sigma L_s \omega_k i_{sx} - k_r T_r^{-1} \Psi_{ry} + k_r \omega_r \Psi_{rx}, \\ U_{rx} = T_r^{-1} \Psi_{rx} - k_r R_r i_{sx} + p \Psi_{rx} - (\omega_k - \omega_r) \Psi_{ry}, \\ U_{ry} = T_r^{-1} \Psi_{ry} - k_r R_r i_{sy} + p \Psi_{ry} + (\omega_k - \omega_r) \Psi_{rx}. \end{cases} \quad (5.61)$$

Доповнюючи (5.61) відповідним рівнянням електромагнітного моменту (5.50) і рівнянням руху (5.51), можна побудувати математичну модель асинхронного двигуна по векторах $\tilde{I}_s, \tilde{\Psi}_r$. При орієнтації системи координат по вектору потокозчеплення ротора використовується структура моделі $\tilde{I}_s, \tilde{\Psi}_r$ з деякими доповненнями. Традиційне позначення такої системи координат – (d – q). Умову обертання системи координат візьмемо у вигляді:

$$\begin{cases} \Psi_{rd} = |\tilde{\Psi}_r| = \Psi_r, \\ \Psi_{rq} = 0. \end{cases} \quad (5.62)$$

Використовуючи в (5.61) відповідні нові індекси, і підставивши (5.62), після перетворень отримаємо:

$$\begin{cases} U_{sd} - k_r U_{rd} = R_\ell i_{sd} + \sigma L_s p i_{sd} + \sigma L_s \omega_k i_{sq} - k_r T_r^{-1} \Psi_r, \\ U_{sq} - k_r U_{rq} = R_\ell i_{sq} + \sigma L_s p i_{sq} + \sigma L_s \omega_k i_{sd} + k_r \omega_r \Psi_r, \\ U_{rd} = T_r^{-1} \Psi_r - k_r R_r i_{sd} + p \Psi_r, \\ \omega_k = \omega_r + \frac{U_{rq} + k_r R_r i_{sq}}{\Psi_r}. \end{cases} \quad (5.63)$$

Останнє рівняння (5.63) є умовою точної орієнтації за вектором потокозчеплення ротора. Складова $\frac{U_{rq} + k_r R_r i_{sq}}{\Psi_r}$ в сталих режимах дорівнює абсолютному ковзанню двигуна $\beta = \omega_s - \omega_r$.

Відповідне рівняння електромагнітного моменту матиме простий вигляд:

$$M = \frac{3}{2} p_\pi k_r \Psi_r i_{sq}. \quad (5.64)$$

Доповнивши (5.63), (5.64) рівнянням руху (5.50), можна побудувати структурну схему асинхронного двигуна в системі координат, орієнтованої за вектором потокозчеплення ротора (рисунок 5.16). При обчисленні умови

орієнтації з метою виключення випадку ділення на нуль до сигналу, як правило, додається мала константа, яка приймає значення в діапазоні від 10^{-5} до 10^{-4} .

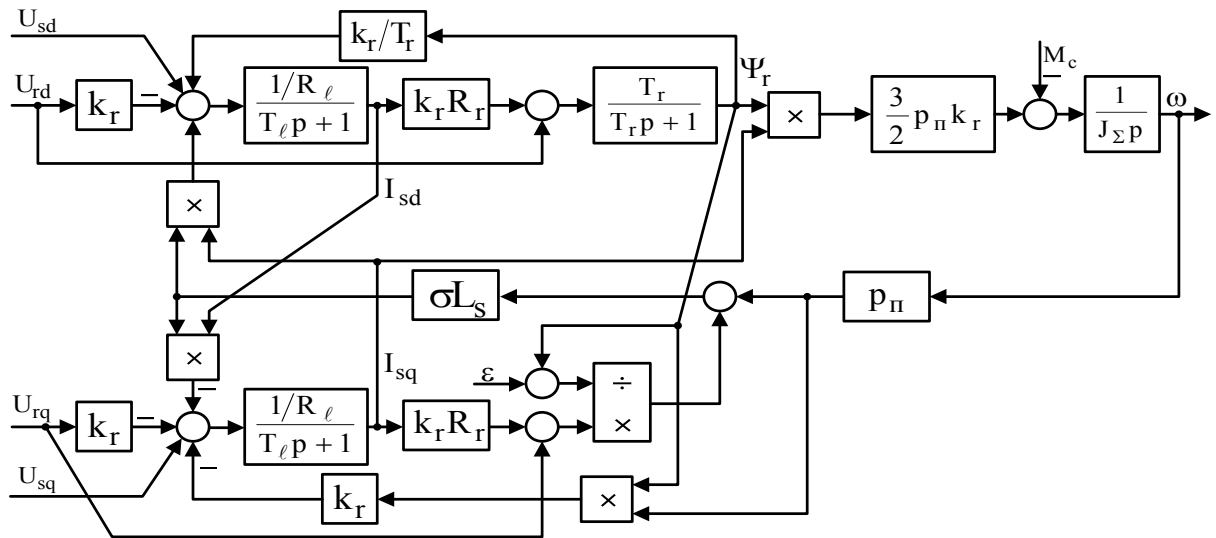


Рисунок 5.16 – Структурна схема асинхронного двигуна в системі координат $(d - q)$, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора

Вхідні координати наведеної структурної схеми при переході від системи $(\alpha - \beta)$ до $(d - q)$ перетворюються координатним перетворювачем наступним чином

$$\begin{cases} U_{sd} = U_{s\alpha} \cos \theta_k + U_{s\beta} \sin \theta_k, \\ U_{sq} = -U_{s\alpha} \sin \theta_k + U_{s\beta} \cos \theta_k, \end{cases} \quad (5.65)$$

де θ_k – кутове пересування рушійною системи координат $(d - q)$.

5.6.2 Побудова перехідних функцій асинхронного двигуна на базі моделі в системі координат $(d - q)$

Використовуючи структурну схему асинхронного двигуна в системі координат $(d - q)$ (рисунок 5.16), побудуємо його модель в програмному середовищі MATLAB Simulink. Ротор вважаємо короткозамкненим, тому під час моделювання $U_{rq} = 0, U_{rd} = 0$.

Додаткові розрахункові параметри для побудови моделі:

$$k_r R_r = 0,977 \cdot 0,0035 = 0,0034;$$

$$\sigma L_s = 0,044 \cdot 0,014 = 0,000616;$$

$$\frac{3}{2} k_r p_{\Pi} = \frac{3}{2} \cdot 0,977 \cdot 3 = 4,396;$$

$$\frac{k_r}{T_r} = \frac{0,977}{4} = 0,244$$

Для приведення трифазної напруги живлення електричної машини до двофазної в системі координат $(\alpha - \beta)$, використовуємо координатний перетворювач 3-2 (рисунок 5.6), а для переходу від $(\alpha - \beta)$ до $(d - q)$ - координатний перетворювач 2-2 (рисунок 5.17), який працює за законом (5.65). Надалі перетворювач представляється у вигляді прихованої підсистеми.

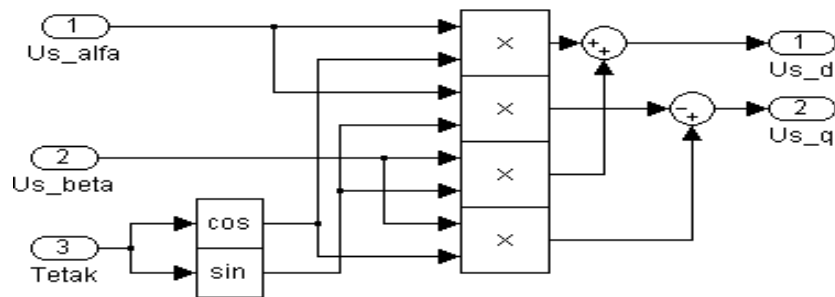


Рисунок 5.17 – Модель координатного перетворювача 2-2
в MATLAB Simulink

Модель приведена на рисунку 5.18 дозволяє визначити перехідні процеси від основних координат двигуна.

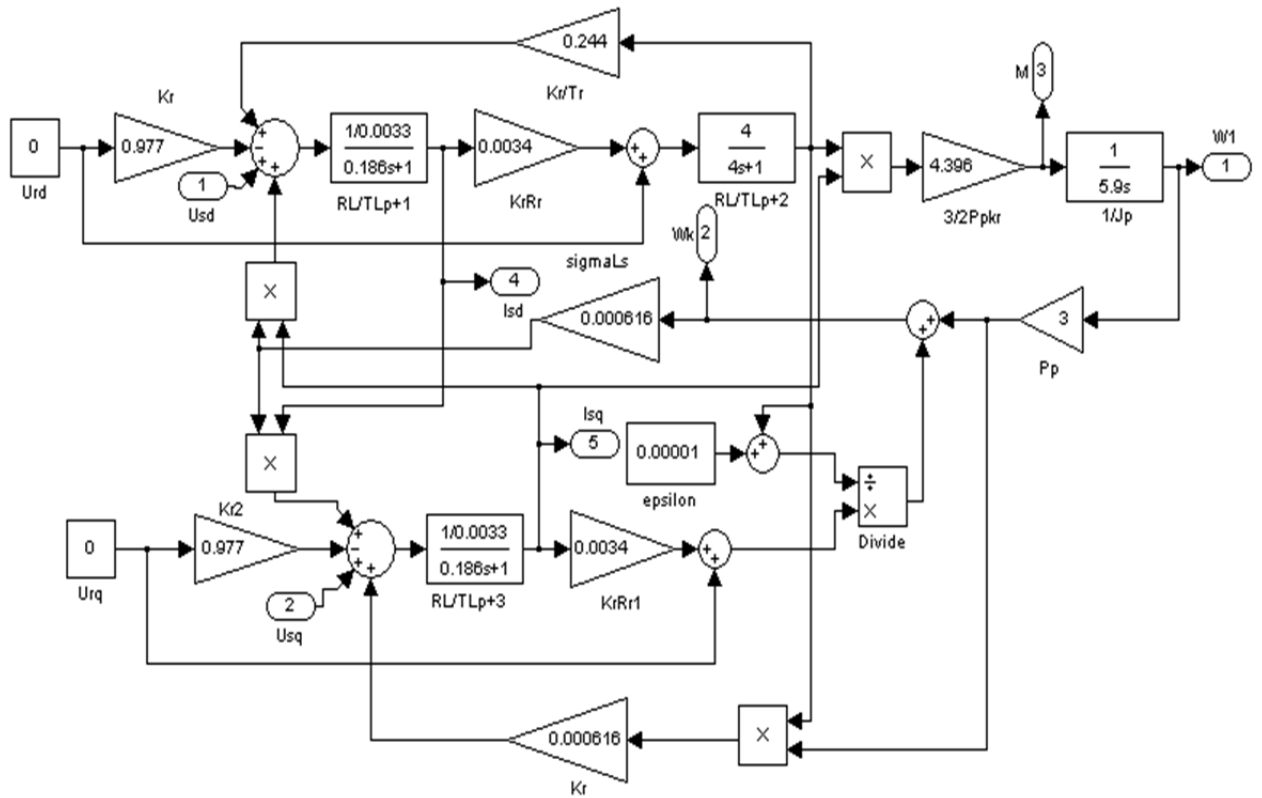


Рисунок 5.18 – Модель асинхронного двигуна в трифазній системі координат $(d - q)$ в MATLAB Simulink

На рисунку 5.19 представлена модель асинхронного двигуна з двома координатними перетворювачами, джерелами живлення і блоками Scope для відображення графічної інформації. Струм статора в цій моделі розраховується як корінь квадратний із суми квадратів проєкцій на осі $(d - q)$. Модель асинхронного двигуна як прихованої підсистеми в MATLAB Simulink побудована у відповідності зі структурною схемою, наведеною на рисунку 5.16. Значення U_{sd} і U_{sq} отримують від координатного перетворювача 2-2, який отримує на вхід значення $U_{s\alpha}$ і $U_{s\beta}$ від перетворювача 3-2, а також значення кута θ_k , яке розраховується в моделі асинхронного двигуна за формулою:

$$\theta_k = \int \omega_k dt, \quad (5.66)$$

де ω_k – швидкість обертання системи координат, яка розраховується останньою формулою системи рівнянь (5.63).

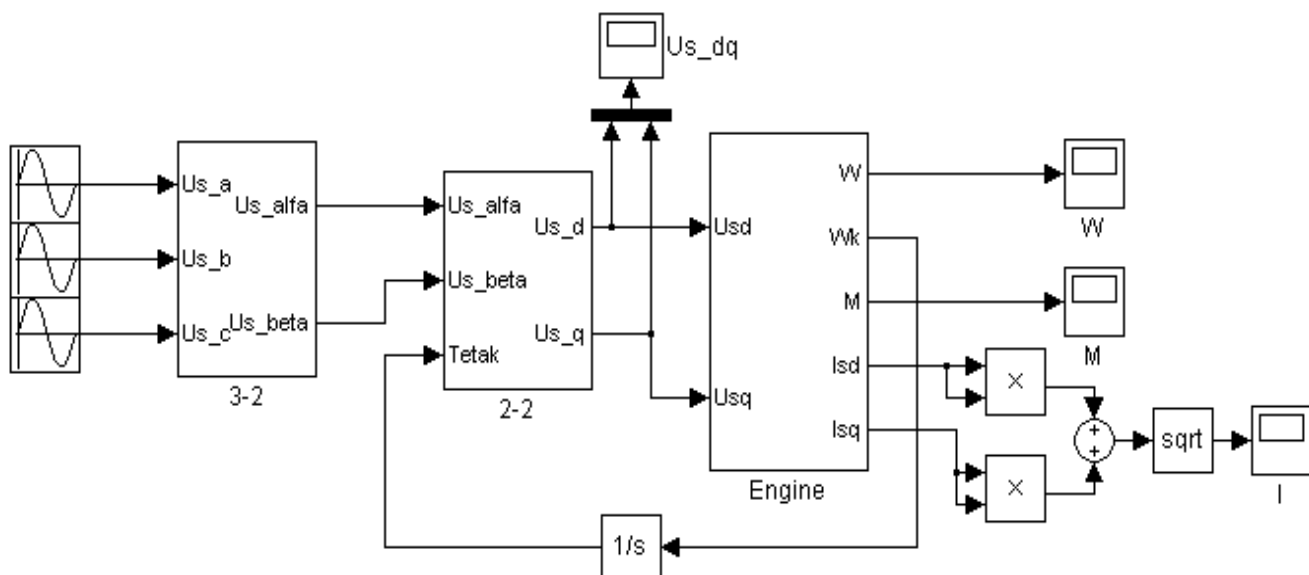


Рисунок 5.19 – Модель асинхронного двигуна з координатними перетворювачами, джерелами живлення і блоками для відображення графічної інформації

Як виходи моделі використовують такі параметри: швидкість обертання валу двигуна, необхідна швидкість обертання системи координат, проєкції струмів на осі (d – q) і момент двигуна.

На рисунках 5.20 – 5.23 наведені результати моделювання в програмному середовищі MATLAB Simulink.

На рисунку 5.21 показано яким чином змінюється напруга на виході іншого координатного перетворювача, тобто яке завдання U_{sd} і U_{sq} подається на вхід моделі двигуна. Напруга на виході перетворювача 3-2 і трифазна напруга живлення залишаються такими ж, як і при побудові моделі в системі координат ($\alpha - \beta$).

Порівнюючи графіки перехідних функції по струму, моменту і швидкості, отримані при моделюванні в системі координат ($\alpha - \beta$) і в системі координат (d – q) можна зробити висновок, що вони майже збігаються. Незначні похибки пов'язані з особливостями математичного моделювання в MATLAB Simulink. Тому побудовані математичні моделі асинхронного двигуна є адекватними.

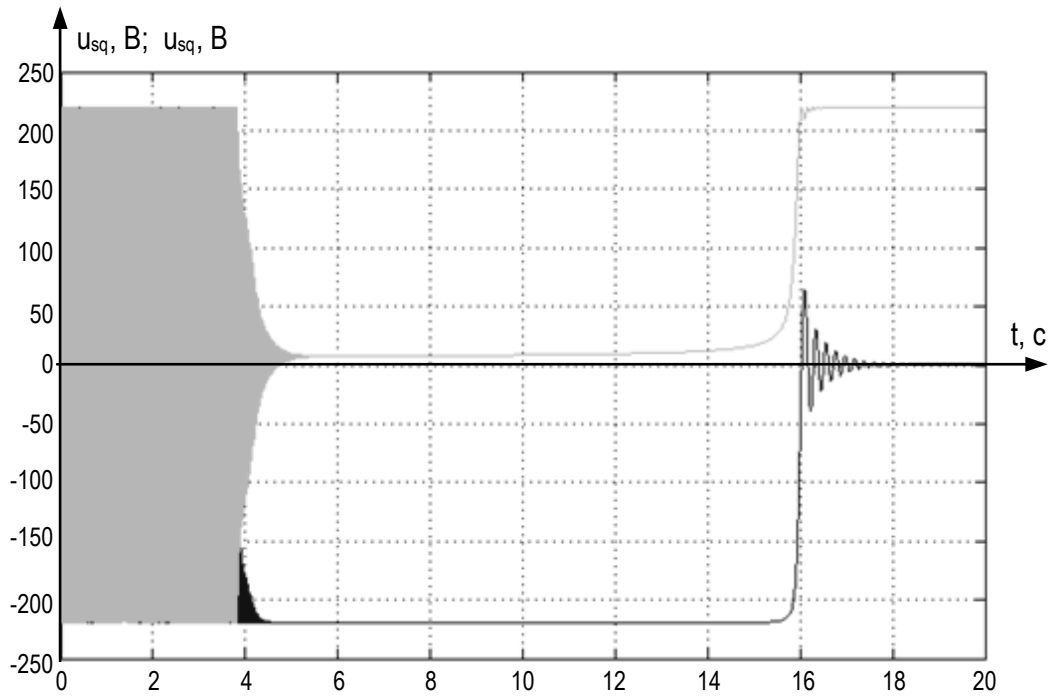


Рисунок 5.20 – Напруги на виході координатного перетворювача 2-2

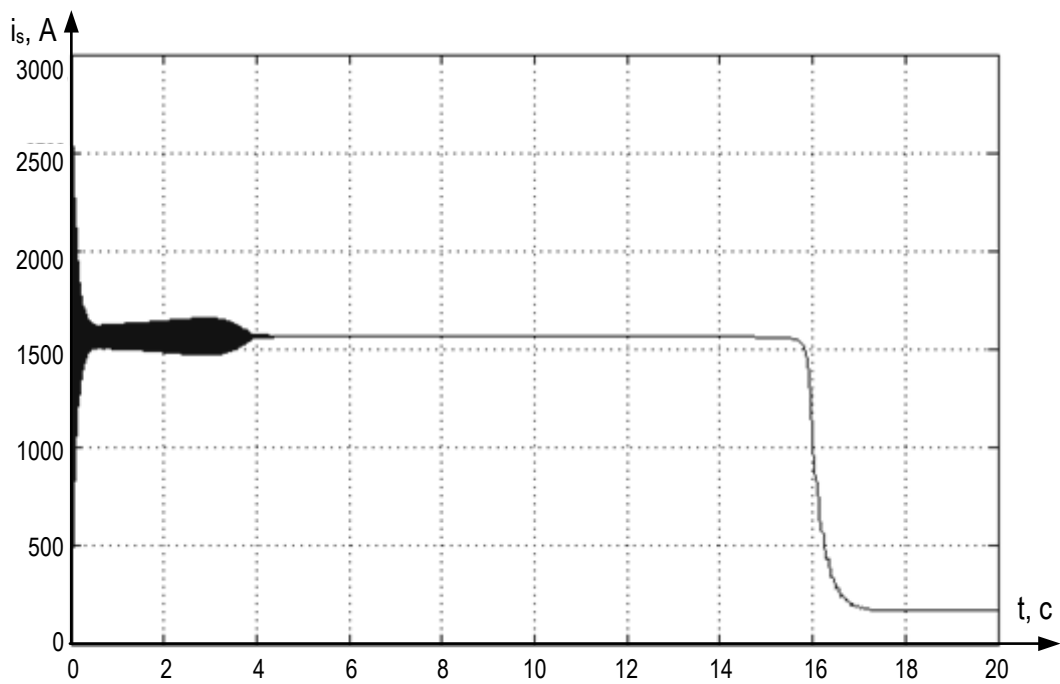


Рисунок 5.21 – Залежність діючого значення струму статора від часу при пуску в холостому режимі, отримана на моделі асинхронного двигуна в системі координат ($d - q$)

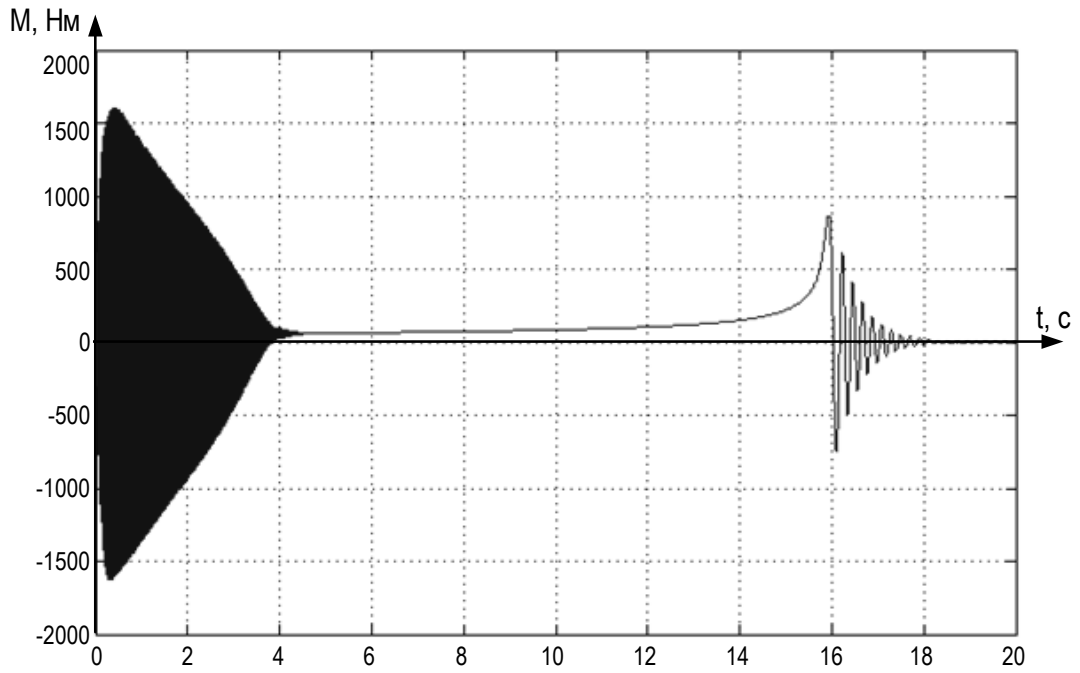


Рисунок 5.22 – Залежність моменту двигуна від часу пуску в холостому режимі, отримана на моделі асинхронного двигуна в системі координат $(d - q)$

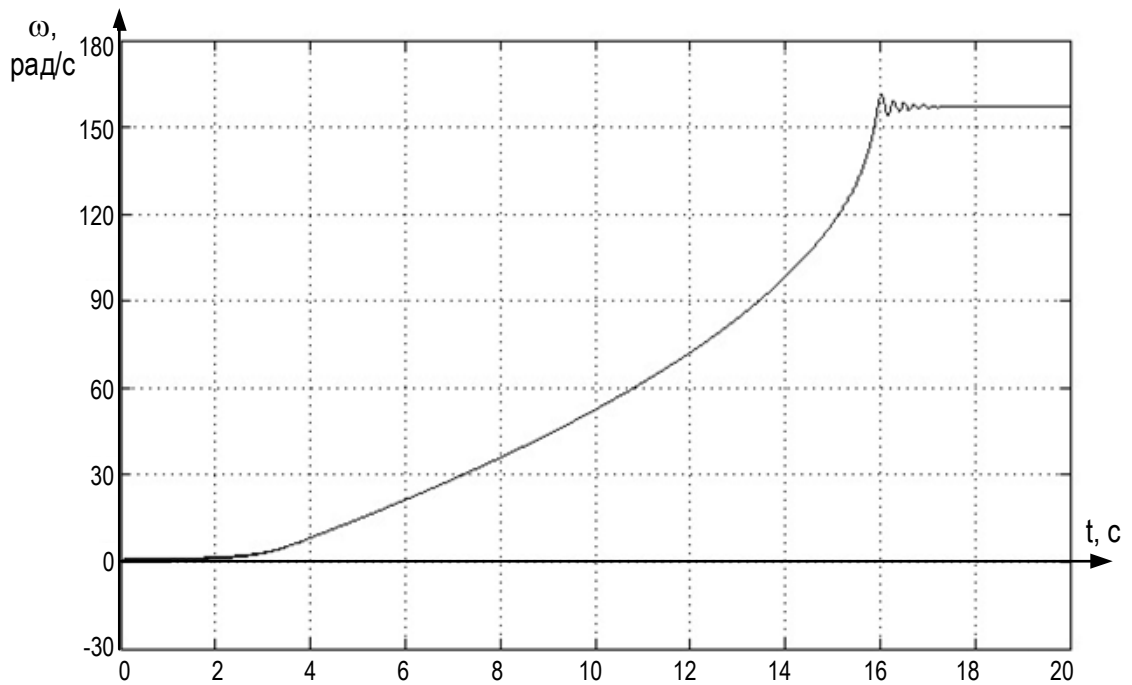


Рисунок 5.23 – Перехідна функція швидкості під час пуску в холостому режимі, отримана на моделі асинхронного двигуна в системі координат $(d - q)$

5.7 Математична модель асинхронного двигуна в системі координат (d - q) з урахуванням жорсткості ексцентричного валу

Пружні механічні ланки приводу машин, як накопичувачі енергії, викликають коливання його координат з відхиленням процесів від заданих за технологією і зростанням навантажень на передачу і двигун. Динамічні навантаження коливного характеру не дозволяють використовувати електричне обладнання по перевантажувальній здатності, значно скорочують термін роботи вузлів і деталей механічних передач, що негативно впливає на якість продукції [29]. Однак облік пружних зв'язків доцільний лише в тому випадку, коли частота пружних коливань за величиною може бути порівняна з робочими частотами електроприводу.

Виконаємо аналіз доцільності досліджень на базі дво-масової моделі механічної підсистеми. У таких системах необхідне значення вихідної швидкості можна знімати безпосередньо з об'єкта управління. Зняття показників з валу двигуна не забезпечить потрібного управління швидкістю.

Розрахуємо жорсткість ексцентрикового валу, який приводить в рух ножі. Жорсткість валу розраховується за такою формулою:

$$C = \frac{GJ_p}{\ell}, \quad (5.67)$$

де G – модуль пружності зсуву вуглецевої сталі ($G = 8,1 \cdot 10^{11}$ Па);

J_p – полярний момент інерції для круглого валу:

$$J_p = \frac{\pi R^4}{4}; \quad (5.68)$$

ℓ – довжина ексцентричного валу ($\ell = 1,9$ м);

R – радіус ексцентричного валу ($R = 0,06$ м).

Таким чином, полярний момент інерції має значення:

$$J_p = \frac{3,14 \cdot 0,06^4}{4} = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}. \quad (5.69)$$

Жорсткість валу:

$$C = \frac{8,1 \cdot 10^{11} \cdot 1,02 \cdot 10^{-5}}{1,9} = 4,35 \cdot 10^6 \text{ (Нм)}. \quad (5.70)$$

Приведемо параметри механічної частини до валу двигуна. Приведений коефіцієнт жорсткості:

$$C_{12} = \frac{C}{i}, \quad (5.71)$$

$$C_{12} = \frac{4,35 \cdot 10^6}{5,86} = 7,42 \cdot 10^5.$$

Маса валу, який обертається, може бути розрахована наступним чином:

$$m_B = \pi R^2 \ell \rho, \quad (5.72)$$

де ρ – питома вага вуглецевої сталі ($\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$).

$$m_B = 3,14 \cdot 0,06^2 \cdot 1,9 \cdot 7850 = 168,6 \text{ (кг)}.$$

Розрахуємо частоту власних коливань двомасової системи:

$$\Omega_{12} = \sqrt{C_{12} \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2}}, \quad (5.73)$$

де J_1 – момент інерції двигуна;

J_2 – момент інерції циліндричного ексцентричного валу:

$$J_2 = \frac{m_B R^2}{2}, \quad (5.74)$$

$$J_2 = \frac{168,6 \cdot 0,06^2}{2} = 0,3 \text{ (кг} \cdot \text{м}^3\text{)}.$$

$$\Omega_{12} = \sqrt{7,42 \cdot 10^5 \frac{5,9 + 0,3}{5,9 \cdot 0,3}} = 1612,2 \text{ (Гц)}.$$

Отримана частота власних коливань досить велика для електроприводу, тому виконувати демпфування пружних коливань є не доцільним. Всі високочастотні коливання майже не пропускаються механічними частинами системи. Для підтвердження незначності впливу частоти на динамічні характеристики побудуємо модель асинхронного двигуна в двофазній системі координат ($d - q$), показану на рисунку 5.18, з урахуванням двомасовості (рисунок 5.24).

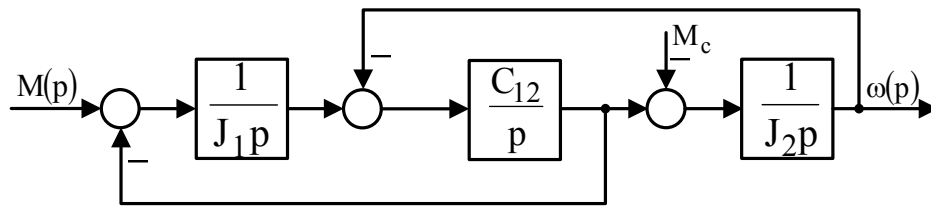


Рисунок 5.24 – Структурна схема двомасової математичної моделі

Модель асинхронного двигуна в двофазній системі координат ($d - q$) у вигляді маскованої підсистеми в MATLAB Simulink приведена на рисунку 5.25.

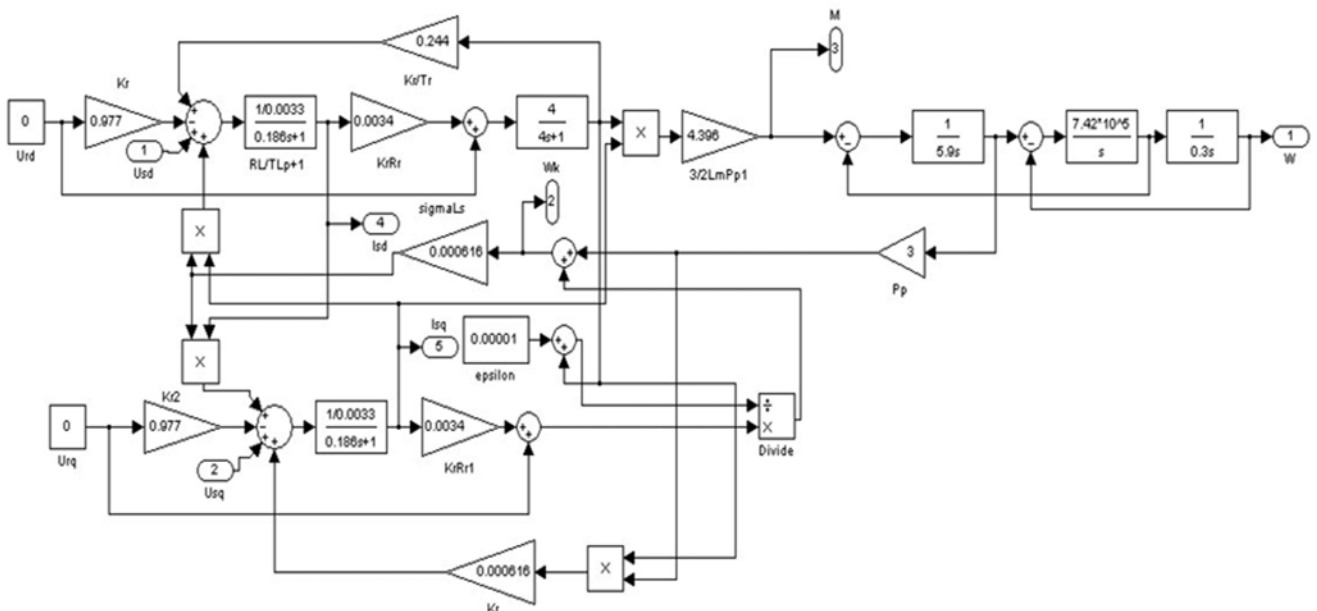


Рисунок 5.25 – Модель асинхронного двигуна в трифазній системі координат ($d - q$) з урахуванням жорсткості ексцентричного валу у вигляді маскування підсистеми в MATLAB Simulink

На рисунку 5.26 наведено дві моделі асинхронного двигуна з двома координатними перетворювачами, джерелами живлення і блоками Scope для відображення графічної інформації. Модель у вигляді підсистеми Engine_single_mass – одно-масова. Вона відповідає рисунку 5.18, Engine_double_mass – двомасова підсистема асинхронного двигуна, побудована по рисунку 5.25.

Перехідні функції по швидкості при пуску в холостому режимі, отримані на моделі асинхронного двигуна в системі координат (d – q) в одно-масовій і двомасовій системах, наведені на рисунку 5.27, з якого видно, що перехідні характеристики мають однаковий характер, проте в двомасовій системі дещо збільшується тривалість перехідного процесу (на 0,3 с).

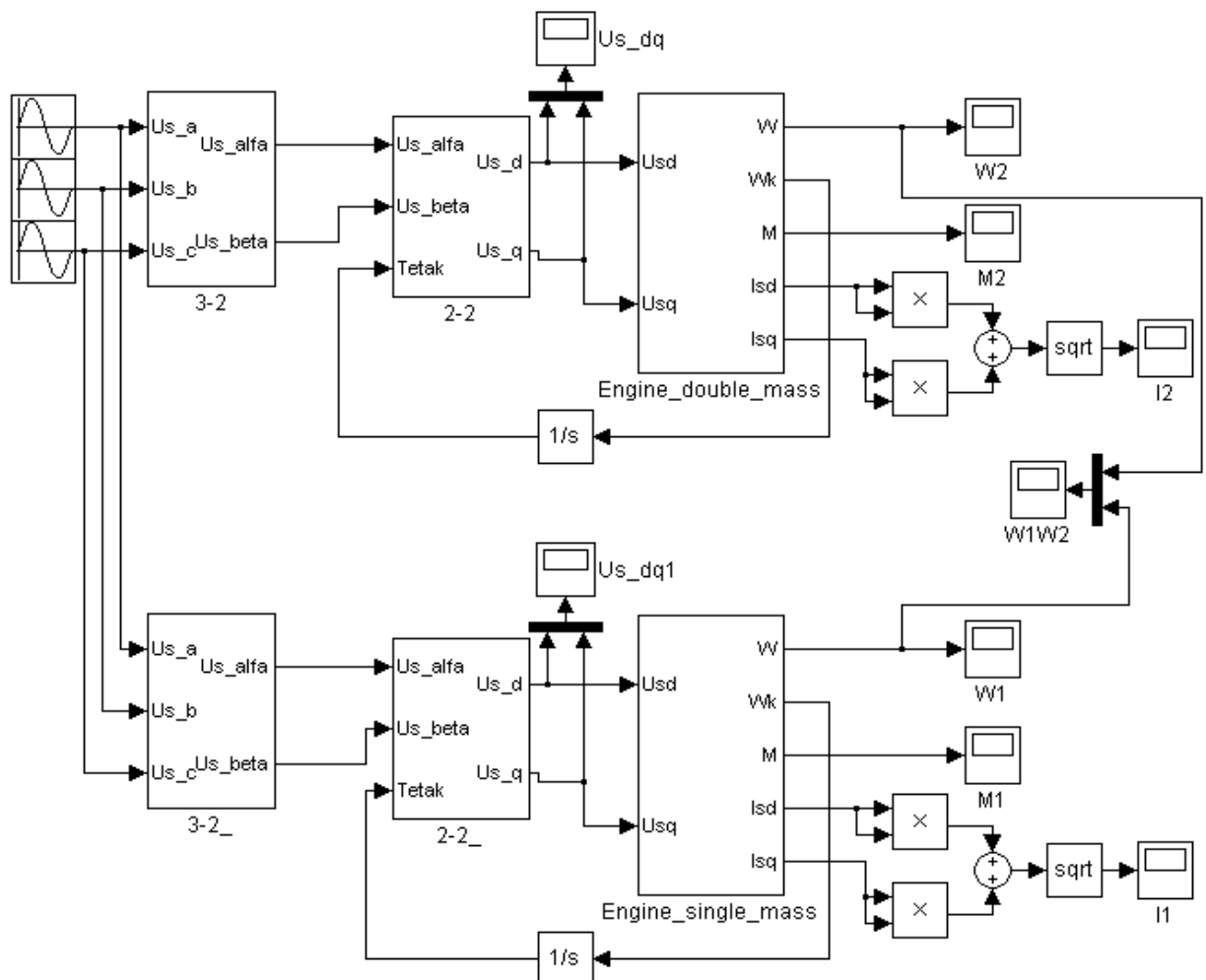


Рисунок 5.26 – Моделі асинхронного двигуна з координатними перетворювачами, джерелами живлення і блоками для відображення графічної інформації, зібрані з урахуванням жорсткості ексцентрикового валу і без нього

Надалі, для підвищення адекватності математичного моделювання, будемо враховувати жорсткість ексцентрикового валу, тобто таку модель асинхронного двигуна, яка показана на рисунку 5.25.

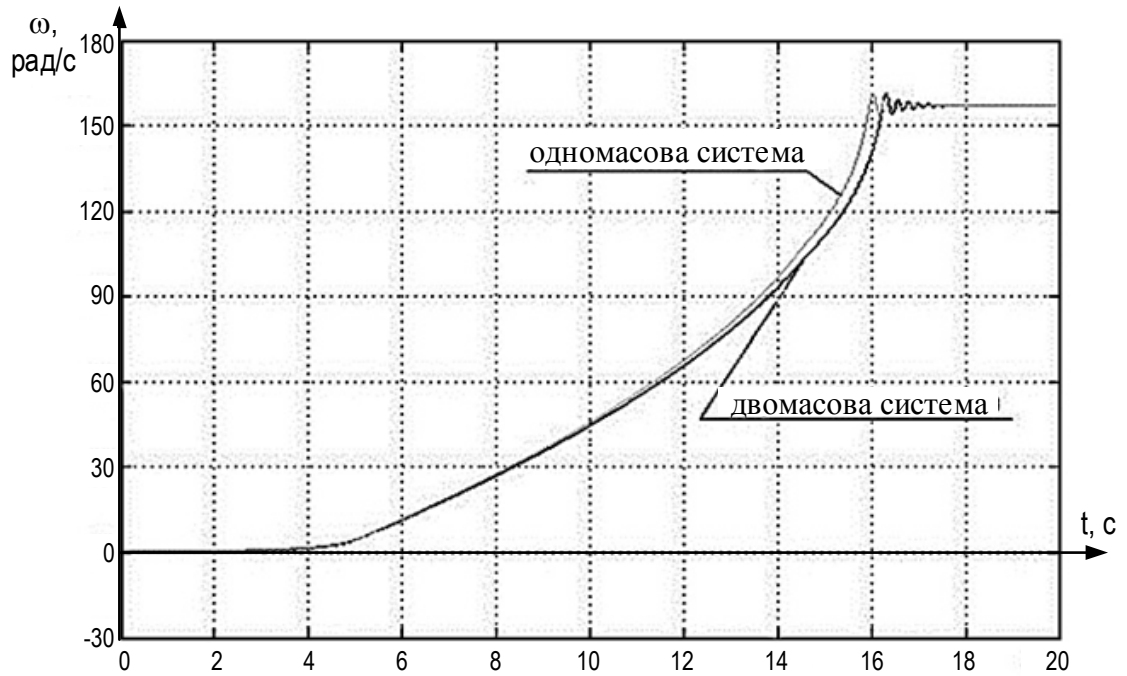


Рисунок 5.27 – Перехідні функції по швидкості при пуску в холостому режимі, отримані на моделі асинхронного двигуна в системі координат $(d - q)$ з урахуванням жорсткості ексцентрикового валу і без нього

6 ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

6.1 Вибір перетворювача частоти

Найбільш підходящим перетворювачем до двигуна K21F315L41 є перетворювач SINAMICS S120 ServoControl фірми Siemens [30 – 32]. Цей тип перетворювача має модульну конструкцію, отже, необхідно зробити вибір модулів відповідно до поставленого завдання.

Централізовані приводні системи пропонують широкий силовий спектр в модульній конструкційній техніці. За допомогою різних модулів регулювання можуть реалізовуватися різні поєднання приводів з головною системою управління. В таблиці 6.1 наведені деякі технічні дані перетворювача SINAMICS S120.

Таблиця 6.1 – Технічні параметри перетворювача SINAMICS S120

Електричні дані		Механічні дані	
Напруга мережі	3 AC 380 В до 480 В $\pm 10\%$ ($-15\% < 1$ хв)	Вібраційне навантаження:	
		– транспортування;	EN 60721–3-2, клас 2М3
		– експлуатація	EN 60721-3-3, клас 3М4
Частота мережі	50/60 Гц, $-6/+6\%$	Модулі	
Категорія перенапруги	Клас III по EN 60664-1	Мережеві модулі в форматі книги	
		– номінальна напруга	3 AC 380 В до 480 В
		Мережеві модулі Active в форматі книги	
		– номінальна імпульсна частота	8 kHz

6.2 Мережеві модулі, що підключаються

Регульовані модулі живлення / рекуперації (з IGBT в напрямку подачі і рекуперації) зі східчастими перетворювачами створюють підвищену,

стабілізовану напругу DC, що означає, що підключені мережеві модулі не залежать від допустимих відхилень напруги.

У стандартній конфігурації мережеві модулі Active мають наступні інтерфейси:

- 1 x силове підключення через гвинтові клеми з вбудованою пластиною підключення екрану (максимум до номінальної потужності 16 кВт 21.5 HP);
- 1 x підключення для електронного живлення через крайовий блок сполучення 24 В входить в обсяг поставки;
- 1 x підключення до мережі DC через вбудовані шини DC;
- 3 x гнізда DRIVE-CLiQ;
- 2 x підключення PE (захисне заземлення).

Виберемо базовий модуль живлення шасі 6SL3330 – 1TE38 2AA0 [33] з параметрами, вказаними в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Параметри модуля живлення шасі 6SL3330 – 1TE38 2AA0

Параметр	Значення
Потужність живлення при 3 AC 400 В	400 кВт
Максимальна потужність живлення	600 кВт
Вхідний струм, при напрузі мережі 400 В	710А
Максимальний вхідний струм, при напрузі мережі 400 В	1065 А
Максимальне споживання струму DC – 24 В (живлення електроніки)	1,1 А

6.3 Вибір мережевих силових компонентів

Мережеві силові компоненти використовуються для захисту підключених компонентів від динамічної або тривалої перенапруги і для того, щоб дотримувалися запропоновані граничні значення.

Разом з мережевими дроселями і узгодженою структурою системи мережеві фільтри обмежують кондуктивні перешкоди, які створюються силовими модулями до значень, допустимих для промислових блоків живлення (клас А1 по EN 61800

– 3) на місці монтажу. Мережеві фільтри підходять тільки для прямого підключення до мереж TN (заземлення). Вибираємо мережевий фільтр 6SL3000 – 0BE41 – 2AA0 [34] з параметрами, вказаними в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Параметри мережевого фільтра 6SL3000 – 0BE41 – 2AA0

Параметр	Значення
Номінальна потужність базового модуля живлення	710 кВт
Номінальний струм	1600 А
Втрати потужності	0,182 кВт
Напруга	від 380 до 480 В

Мережевий дросель вибираємо типу 6SL3000 – 0CE37 – 0AA0 [35] з параметрами, вказаними в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Параметри мережевого дроселя 6SL3000 – 0CE37 – 0AA0

Параметр	Значення
Номінальна потужність подачі мережного модуля	400 кВт
Максимальний струм по нагріванню	773 А
Втрати потужності	0,31 кВт
Напруга	400 В

6.4 Вибір модулів двигуна

У стандартній конфігурації однодвигунні модулі мають такі інтерфейси:

- 2 x підключення до мережі DC через вбудовані шини DC;
- 1 x підключення для електронного живлення через вбудовану шину 24 В DC;
- 3 x гнізда DRIVE - CLiQ;
- 1 x підключення двигуна штекерне або за допомогою гвинтових болтів в залежності від номінального вихідного струму;
- 2 x вхідні клеми безпечної зупинки (відкриваючі імпульси);
- 1 x управління безпечним гальмуванням двигуна;
- 1 x вхід датчика температури (КТУ84 - 130);

—2 x підключення PE (захисне заземлення);

Статус модулів двигуна відображається на двох кольорових дисплеях LED. Вибираємо модуль 6SL3320 – 1TE36 – 1AA0 [36], який найбільш задовольняє параметрам двигуна. Його параметри зведено до таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Технічні параметри модуля двигуна 6SL3320 – 1TE36 – 1AA0

Параметр	Значення
Номінальний вихідний струм I_{rated} , А	605
Максимальний вихідний струм I_{max} , А	885
Номінальна потужність при напрузі мережі 600 В DC, кВт	510 ... 750
Максимальне споживання струму (при 24 В DC), А	1,0
ККД	0,986
Підключення двигуна U2, V2, W2	штекер (X1), макс. 30 А
Підключення DC контуру DCP, DCN	фланцеве з'єднання для підключення шин
Максимальна довжина силового кабелю двигуна, м	300 (неекранованого) 450 (екранованого)

6.5 Компоненти зв'язку DC

Компонентами зв'язку DC є:

- гальмівний модуль;
- гальмівні резистори;
- модуль регулювання живлення.

Гальмівний модуль (і зовнішній гальмівний резистор) необхідний для приведення приводів в стан керованої зупинки в разі короткого замикання мережі (наприклад, аварійне відведення) або для обмеження напруги мережі DC під час короткочасної рекуперації, якщо, наприклад, здатність мережевих модулів до рекуперації була відключена або встановлена наполовину. Гальмівний модуль захищає силову електроніку і відповідний контур управління. Під час роботи енергія мережі DC перетворюється у втрати тепла у зовнішньому гальмівному

резисторі, розташованому за межами електрошафи. Гальмівний модуль працює автономно. Гальмівні модулі можуть працювати паралельно. Вони також можуть використовуватися для швидкої розрядки мережі DC. Вибираємо гальмівний модуль типу 6SL3300 – 1AE32 – 5BA0 [37], параметри якого приведені в таблиці 6.6.

Таблиця 6.6 – Параметри гальмівного модуля 6SL3300 – 1AE32 – 5BA0

Параметр	Значення
Номінальна потужність, кВт	50
Максимальна потужність, кВт	250
Допустиме навантаження по струму шини 24 В DC, мА	10
Макс. струм навантаження на кожен цифровий вихід, мА	500
Напруга	DC 24 V

Надлишкова потужність в мережі DC утилізується гальмівним резистором. Гальмівний резистор підключається до гальмівного модулю. Це означає, що результуючі втрати тепла можуть бути відведені за межі електрошафи. Вибираємо гальмівний резистор типу 6SL3000 – 1BE32 – 5AA0 [38], параметри якого приведені в таблиці 6.7.

Таблиця 6.7 – Параметри гальмівного резистора 6SL3000 – 1BE32 – 5AA0

Параметр	Значення
Номінальна потужність P_{rated}	50 кВт
Пікова потужність P_{max}	250 кВт
Період включення для пікової потужності	15 с
Максимальний струм	378 А
Клас захисту	IP 20

6.6 Модуль управління CU320

Комунікація і функції управління для одного або декількох модулів двигуна та мережевих модулів Active виконуються в блоці управління CU320. У стандартній конфігурації блоки управління призначені для багатоцільового

використання. Компоненти DRIVE – CLiQ, наприклад, модулі двигуна і мережеві модулі Active, можуть бути підключені до блоку управління CU320. Кількість модулів залежить від необхідних експлуатаційних характеристик, включаючи тип режиму і додаткові функції. Комунікація між блоком управління CU320 і підключеними компонентами здійснюється через DRIVE – CLiQ.

Якщо для конкретного завдання необхідно кілька блоків управління, то їх кількість може бути збільшена відповідно. В цьому випадку блоки управління підключаються, наприклад, через PROFIBUS до вище стоячого контролера. Рекомендовано номер 6SL – 3040 – 0MA00 – 0AA1 [39] з карткою CompactFlash для CU320 6SL – 3054 – 0AA00 – 1AA0. Також встановлено проміжний тримач для CU320: 6SL – 3064 – 1BB00 – 0AA0.

6.7 Модуль сенсора

Модуль сенсора для монтажу в шафу SMC10 при невтручання мають такі інтерфейси:

- 1 й інтерфейс DRIVE - CLiQ;
- 1 підключення сенсора включаючи визначення температури (КТУ84 - 130), через SUB – D роз'єм або клеми;
- 1 підключення для живлення електроніки надходить із гнізда DC – 24 В;
- 1 підключення РЕ / захисного провідника;

Багатокольоровий світло-діод показує стан модуля датчика SMC30. Модулі датчиків SMC30 можуть монтуватися на профільну монтажну шину 35×15/7,5 по EN 50022.

Вибираємо модуль сенсора типу 6SL – 3055 – 0AA00 – 5CA1 [40], параметри якого приведені в таблиці 6.8.

Таблиця 6.8 – Параметри модуля сенсора 6SL – 3055 – 0AA00 – 5CA1

Параметр	Значення
Максимальне споживання струму SMC30, без урахування датчика, А	0,6

Максимальний переріз, що підключається, мм ²	2,5
Максимальний захисний запобіжник, А	20
Потужність втрат, Вт	< 10

6.8 Додаткові системні компоненти

Комунікаційна панель SVC10 використовується для сполучення блоку управління CU320, а значить і приводів з протоколом CAN (мережа області контролера). Відповідне програмне забезпечення приводів надає зміст інформаційних повідомлень у відповідності з профілем приводів CAN open і профілем входів / виходів. Вибираємо типу 6SL3055 – 0AA0 – 2CA0 [41].

6.9 Силові кабелі

Силові кабелі MOTION – CONNECT можуть використовуватися для підключення асинхронних двигунів до модулів двигуна. Виберу кабель марки 6FX5002 – 5CS41 – 0 [42] з параметрами, приведеними в таблиці 6.9.

Таблиця 6.9 – Параметри силового кабелю 6FX5002 – 5CS41 – 0

Параметр	Значення
Кількість жил × переріз	4 × 4
Розмір роз'єму	1,5
Допустиме навантаження по струму до IEC 60204	1: 28 А

6.10 Сигнальні кабелі

Кабелі DRIVE CLiQ використовуються для підключення компонентів зі штекерами DRIVE – CLiQ, які мають окремий або зовнішній блок живлення 24 В DC. Кабелі DRIVE – CLiQ для підключення мережевих модулів / модулів двигуна з блоком управління входять в обсяг поставок відповідних мережевих модулів / модулів двигуна.

Обираємо сигнальний кабель DRIVE – CLiQ типу 6SL3060 – 4AA10 – 0AA0 [43] довжиною 0,95 м і кабель DRIVE – CLiQ типу 6SL3060 – 4AJ20 – 0AA0 [43]

довжиною 2,8 м.

Кабелі MOTION - CONNECT DRIVE - CLiQ використовуються, якщо компоненти зі штекерами DRIVE – CLiQ повинні відповідати високим вимогам, таким як, механічна напруга або масло-стійкість, наприклад, для з'єднань за межами електрошафи між:

- модулями двигуна і сенсорними модулями;
- модулями двигуна і двигунами з інтерфейсом DRIVE – CLiQ.

Кабелі MOTION – CONNECT DRIVE – CLiQ мають жили 24 В DC. Вибираємо типу 6FX502 – 2CD01 – 0.

Готові кабелі MOTION – CONNECT використовуються, якщо сенсори положення двигунів без інтерфейсу DRIVE – CLiQ підключаються до сенсорних модулів.

Вибір шин Profibus – DP. Обираємо діагностичний повторювач для Profibus – DP 12 Мбіт/сек двожильний з фланцем на стороні двигуна довжиною 5 м: 6ES7972 – 0BA41 – 0XA0 [44].

6.11 Блоки живлення

Обираємо модульний блок живлення 1AC, 2AC, 120/230 V AC / 24 V DC, 20 А, 120/230 з рекомендованим номером 6EP1336 – 3BA00 [45].

Трифазна вхідна напруга з діапазоном допустимих відхилень ~ 320...550 В. Світлодіодна індикація. Обрана реакція на коротке замикання: обмеження струму або захисне відключення. Можливість підключення додаткового буферного модуля (6EP1961 – 2BA00), сигнального модуля (6EP1961 – 2BA10) і модуля резервування (6EP1961 – 2BA20).

Застосування блоків живлення SITOP modular = 24 В/20 А дозволяє отримати цілий ряд переваг:

- продовження терміну служби підключених приймачів електроенергії: відсутність коливань напруги і наявність електронних захистів;
- мінімальне виділення тепла: високий ККД блоку живлення;
- простота установки.

6.12 Індикаторна панель оператора

Вибираємо панель оператора BOP20 з рекомендованим номером 6SL3055 – 0AA00 – 4BA0 [46]. Розширена панель оператора BOP20 – це пристрій вводу / виводу для перетворювачів серії SINAMICS. BOP20 і перетворювач частоти SINAMICS здійснюють зв'язок по послідовному інтерфейсу RS 232 з протоколом PPI. Для з'єднання може використовуватися нуль-модемного кабелю.

BOP20 може не використовуватися, якщо привід працює, наприклад, тільки через PROFIBUS, а локальна індикація в шафі не потрібна. В цьому випадку BOP20 може використовуватися просто в цілях пусконаладження і для отримання діагностичної інформації, тоді вона монтується в інтерфейс RS 232 на блоці управління CU320. На дисплеї відображаються статуси роботи, установки і актуальні значення, параметри, індекси, помилки і аварійний сигнали. Для роботи панелі BOP20 необхідно зовнішнє живлення 24 В (максимальна потужність, що споживається, – 200 мА).

6.13 Вибір автоматичного вимикача

Автоматичний вимикач C60N і C32H-DC є компактним струмообмежувальним комутаційним апаратом, оптимізований для фідерних зборок. Автоматичні вимикачі використовуються для комутації і захисту трифазних двигунів до 45 кВт при АС 400 В, а також для інших споживачів з номінальними струмами до 100 А.

Автоматичні вимикачі C60N і C32H-DC [47] фірми SCHNEIDER стійкі до кліматичних впливів. Вони призначені для використання в закритих приміщеннях, де немає ускладнюючих експлуатаційних умов (наприклад, пил, їдкі пари, шкідливі гази). Для використання в запилених і вологих приміщеннях слід передбачати спеціальні заходи захисту. Автоматичні вимикачі C60N і C32H – DC допускають введення живлення зверху чи знизу.

Допустимі температури навколишнього середовища, максимальна комутаційна здатність, струми розчеплення та інші граничні умови для застосування наведені в технічних даних і характеристиках розчеплення.

Обираємо двополюсний автоматичний вимикач для захисту систем С60N, 6 А, Сс підвищеної здатністю відключення. Для захисту двигуна вибираємо двополюсний автоматичний вимикач С32Н – DC, 6 А, Сс підвищеної здатністю відключення.

6.14 Вибір запобіжників для захисту установки

Обираємо плавку вставку LVHRC з рекомендованим номером 3NE4 337 800 VAC з $I_{\text{ном}} = 710 \text{ A}$ і $U_{\text{ном}} = 500 \text{ В}$ [48].

Тримачі для плавких вставок вибираємо LVHRC з рекомендованим номером 3NE1102.

Обираємо роз'єднувач-запобіжник 3KL6230-1AB02, 690VAC, 800A, 3/2 [49].

7 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЛИСТОПРАВИЛЬНОЇ МАШИНИ

7.1 Опис електропривода з векторною системою управління в системі координат (d – q)

Застосування принципу векторного управління дозволяє створювати високо-динамічні електромеханічні системи широкого застосування з практично будь-яким потрібним діапазоном регулювання швидкості. Векторне управління, як правило, забезпечує закон частотного керування. Потрібні статичні і динамічні властивості електропривода досягаються шляхом використання розподільного регулювання механічними (момент, швидкість) і магнітними (магнітний потік або потокозчеплення) координатами. При векторному керуванні враховується взаємне положення узагальнених векторів електромагнітних величин.

У силовій схемі електроприводів з векторним керуванням зазвичай використовується перетворювач частоти на основі випрямляча і інвертора напруги (для невеликих потужностей можливо також застосування безпосередніх перетворювачів частоти), формування вихідної напруги якого відбувається з використанням принципу широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Функціональна схема системи векторного керування короткозамкненим асинхронним двигуном (АД) для випадку, коли всі регульовані координати можуть бути виміряні, наведена на рисунку 7.1. Система має два канали управління: модулем вектора потокозчеплення ротора і кутовою швидкістю ротора, кожен з каналів має по два контури регулювання.

Завдання сигналів здійснюється в системі координат (d – q), орієнтованої за вектором потокозчеплення ротора $\tilde{\Psi}_r$, тобто $\psi_{rd} = |\tilde{\Psi}_r| = \Psi_r$, $\psi_{rq} \equiv 0$.

На рисунку 7.1 введено такі позначення: НВ, ШІМ-ІН - некерований випрямляч і інвертор напруги з ШІМ-комутацією перетворювача частоти; АД – асинхронний двигун; ДС, ДПР, ВР – датчики струму, потокозчеплення ротора і швидкості відповідно; ПК – перетворювачі координат; ВА – векторний аналізатор; БК – блок компенсації; РШ, РП, РСd, РСq – регулятори швидкості,

потокосцеплення ротора, d- і q-складових струму статора відповідно; ЗІ – задавач інтенсивності.

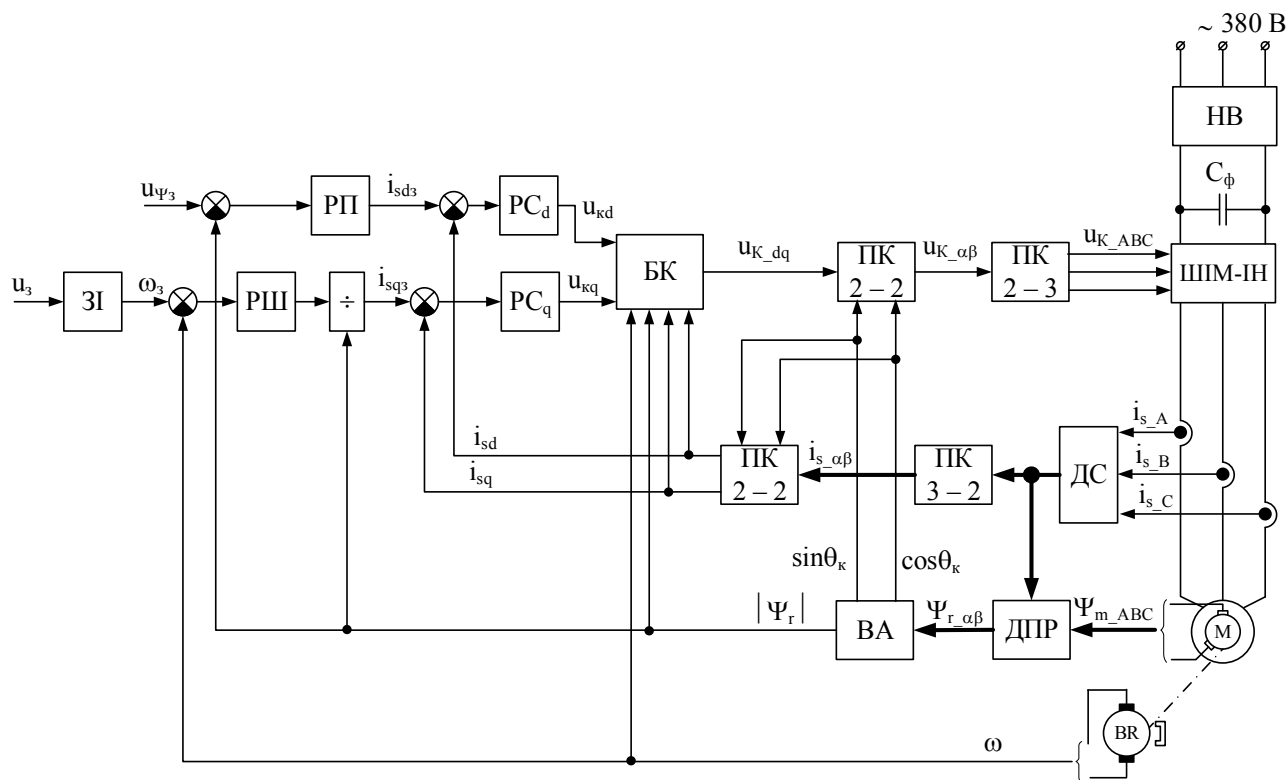


Рисунок 7.1 – Загальна функціональна схема системи векторного керування короткозамкненим АД

Перетворення сигналів до природної трифазної системи координат статора виконується послідовно – шляхом використання перетворювачів координат (ПК) 2-2 (спочатку до нерухомої ортогональної системі координат a, b) і 2-3 (потім до нерухомої системи A, B, C).

Отримання складових струму статора, який був визначений за допомогою датчиків струму (ДС), в системі координат (d – q) здійснюється шляхом зворотних перетворень. Регулятори внутрішніх контурів регулювання складових струму статора зазвичай виконуються пропорційно-інтегральними.

Шляхом застосування датчиків Холла або вимірювальних обмоток виконується вимірювання складових головного потокосцеплення в системі координат A, B, C. Складові потокосцеплення ротора обчислюються в датчику потокосцеплення ротора (ДПР) за такими залежностями (без урахування коефіцієнта передачі датчиків Холла) [18]:

$$\begin{cases} \Psi_{r\alpha} = k_r^{-1} \Psi_{m\alpha} - L_{r\sigma} i_{s\alpha}, \\ \Psi_{r\beta} = k_r^{-1} \Psi_{m\beta} - L_{r\sigma} i_{s\beta}, \end{cases} \quad (7.1)$$

де $\Psi_{m\alpha}$ – складові головного потокозчеплення в системі координат $(\alpha - \beta)$.

Виділення сигналів амплітуди і фази вектора здійснюється в векторному аналізаторі (ВА). Сигнал, пропорційний до модуля вектора потокозчеплення ротора, заводиться на блок порівняння регулятора потокозчеплення (РП) (який зазвичай виконується ПІ-типу), а гармонійні сигнали і беруть участь в перетвореннях координат 2-2 шляхом їх заведення у відповідні координатні перетворювачі (ПК 2 - 2).

Вимірювання швидкості обертання ротора АД виконується за допомогою датчика швидкості або тахогенератора (BR), встановленого на валу двигуна. Регулятор швидкості (РШ) зазвичай виконується пропорційним (П-типу) або пропорційно-інтегральним (ПІ-типу), залежно від необхідності надання системі астатичних властивостей. Блок розподілу на вході контуру регулювання q -складової струму статора, є невід'ємною і обов'язковою частиною регулятора швидкості, оскільки потокозчеплення ротора знаходиться в знаменнику дробу, що визначає коефіцієнт підсилення регулятора швидкості.

Сигнали з виходів регуляторів швидкості (i_{sq3}) і потокозчеплення (i_{sd3}) можуть бути обмежені на відповідних рівнях: обмеження i_{sd3} потрібно для недопущення збільшення струму намагнічування більше його номінального значення, обмеження ж i_{sq3} – від появи неприпустимо великих коливань і усталених значень електромагнітного моменту двигуна.

Сигнал завдання на швидкість обертання ротора двигуна отримується за допомогою задатчика інтенсивності (ЗІ), завдання на потокозчеплення може бути організовано незалежно (завдання конкретної бажаної величини потокозчеплення ротора в однозонній системі) або в функції завдання на швидкість.

Динамічні властивості даної системи векторного керування стають прийнятними тільки при наявності блоку компенсації (БК), який виконує

відділення каналів регулювання шляхом нейтралізації впливів внутрішніх зворотних зв'язків (ВЗЗ) АД. Ця компенсація виконується (аналогічно компенсації впливу проти-ЕРС двигуна в системах електропривода постійного струму) шляхом завдання аналогічних сигналів з протилежним знаком на вхід інвертора напруги. Як правило, на практиці компенсуються не всі ВЗЗ, а лише найбільш впливові, до числа яких відносяться перехресні ВЗЗ і протидії ЕРС двигуна. Взагалі, властивості системи векторного керування АД будуть тим більш якісними, чим більшу кількість існуючих ВЗЗ компенсовано.

Слід зазначити, що, на відміну від розглянутого засобу (умовно йому надамо назву безпосередньої компенсації), компенсація ВЗЗ може бути виконана відповідно до так званого принципу попереджуючого управління, суть якого полягає в тому, що в блок компенсації (БК) заводиться не сигнал з датчиків потрібних величин, а відповідні сигнали завдання з системи управління.

Своєрідним недоліком векторного управління з орієнтацією по вектору потокозчеплення (в нашому випадку – ротора) є необхідність якомога більш точного вимірювання або оцінки амплітудної величини і кутового положення цього вектора. Обмеження і недоліки, пов'язані з вимірюванням потокозчеплення (як за допомогою датчиків Холла, так і вимірювальних обмоток) [28, 29], призводять до того, що найчастіше для визначення потоку використовують математичні моделі або спостерігачі стану. Все розглянуте є абсолютно правомірним при організації при необхідності в системі векторного керування короткозамкненим АД законів частотного управління або, і (з урахуванням особливостей регулювання і вимірювання) в разі аналогічного управління АД з фазним ротором з боку ротора. Система управління матиме подібну структуру, але ускладнену через більшої кількості ВЗЗ двигуна, які потрібно компенсувати.

Загальними недоліками систем векторного керування є складність керуючих і функціональних пристроїв при перетворенні координат і фаз, а також виконання компенсаційних зв'язків при широкому діапазоні регулювання швидкості і навантаженні електроприводу.

7.2 Спрощена функціональна схема електроприводу з векторною системою управління в системі координат (d – q)

Для побудови моделі електроприводу з векторною системою управління використовуємо отриману раніше модель асинхронного двигуна в системі координат (d – q).

Спрощена функціональна схема системи, призначена для визначення структури і параметрів регуляторів і для розрахунку перехідних процесів, наведена на рисунку 7.2. Схема побудована з використанням математичного опису ненасиченого асинхронного двигуна для електроприводу з датчиками струму і швидкості.

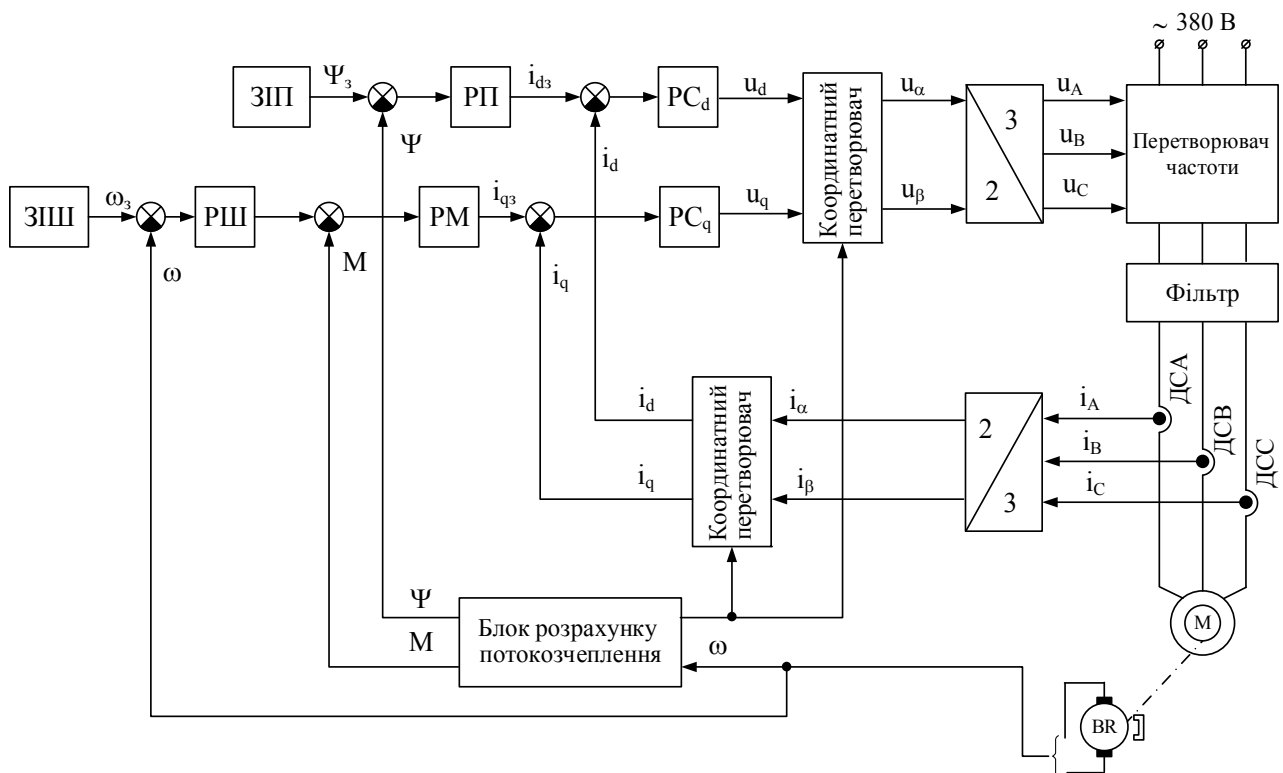


Рисунок 7.2 – Спрощена функціональна схема системи векторного керування короткозамкненим асинхронним двигуном

На рисунку 7.2 введені такі позначення: ЗІЗ – задатчик інтенсивності зміни швидкості; ЗІП – задатчик інтенсивності зміни потокозчеплення; РШ – регулятор швидкості, який приймає на вхід неузгодженість між заданим значенням

швидкості і сигналом по швидкості з виходу системи, на виході – формує завдання по моменту; РП – регулятор потокозчеплення, на вхід якого надходить неузгодженість між заданим і наявним (розрахованим) потокозчепленням, на виході регулятор формує завдання по току статора в проекції на вісь d ; РМ – регулятор моменту, що отримує на вході неузгодженість між і наявним (розрахованим) значенням моменту, на виході він утворює завдання по току статора в проекції на вісь q ; РС d – регулятор струму по осі d , на виході формує завдання по напрузі для перетворювача частоти; РТ q – регулятор струму по осі q , на виході формує завдання по напрузі для перетворювача частоти; ДСА – датчик струму фази А; ДСВ – датчик струму фази В; ДСС – датчик струму фази С; АД – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором; ТГ – тахогенератор (датчик швидкості).

Перетворювач частоти характеризується коефіцієнтом передачі по напрузі і чистим запізненням на деякий час, яке визначається періодом ШІМ інвертора. Для спрощення розрахунків вважається, що струми i_A , i_B , i_C відповідно, $i_{s\alpha}$ та $i_{s\beta}$ вимірюються без-інерційними датчиками струму з деяким коефіцієнтом передачі $k_{дс}$. Вважається також, що величини M і потокозчеплення ротора ψ_r , які визначаються за моделлю, точно відтворюють реальний електромагнітний момент двигуна і потокозчеплення ротора в масштабах, заданих коефіцієнтами зворотних зв'язків і відповідно. Датчик швидкості має коефіцієнт передачі. При моделюванні будемо розглядати контури регулювання струму по каналах потокозчеплення і швидкості, а також контур регулювання потокозчеплення, контур регулювання моменту і контур регулювання швидкості.

7.3 Структурна схема електропривода з векторною системою управління в системі координат ($d - q$) і налаштування її контурів регулювання

Для побудови структурної схеми електропривода з векторною системою управління в системі координат ($d - q$) скористаємося наведеною в попередньому пункті функціональною схемою, структурною схемою асинхронного двигуна в

системі координат $(d - q)$ і структурною схемою двомасової математичної моделі. Така структурна схема буде враховувати жорсткість вала, що передає обертання від двигуна до редуктора. Крім того, на цій структурній схемі припускається $U_{rd} = U_{rq} = 0$, оскільки двигун має короткозамкнений ротор.

Розглянемо налаштування контурів регулювання і розрахунок динамічних характеристик в системі векторного керування швидкістю асинхронного двигуна. Структурна схема контуру струму без урахування перехресних зв'язків показана на рисунку 7.3. Налаштування виконаємо без урахування впливу перехресних зв'язків.

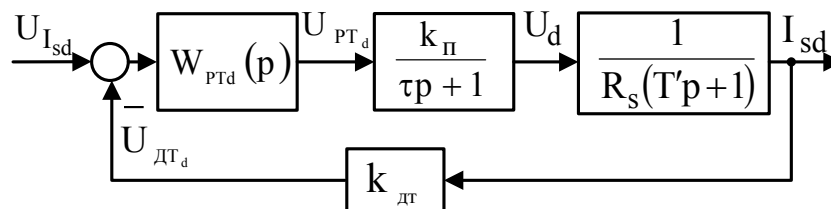


Рисунок 7.3 – Структурна схема контуру струму по осі d

При заданій частоті ШІМ, значення чистого запізнення перетворювача частоти становить значення τ , обернено пропорційне частоті широтно-імпульсної модуляції. У зоні частот, де $\omega < 1/\tau$ фазочастотна характеристика ланки чистого запізнювання близька до фазочастотних характеристик аперіодичної ланки з постійною часу τ .

Передавальна функція розімкнутого контуру струму статора по осі d записується у вигляді:

$$W_{I_d}(p) = W_{PTd}(p) \frac{k_{п}}{\tau p + 1} k_{дт} \frac{1}{R_s(T'p + 1)}, \quad (7.2)$$

де $k_{п}$ – коефіцієнт передачі частотного перетворювача;

τ – постійна часу частотного перетворювача;

$k_{дт}$ – коефіцієнт передачі датчика струму;

$W_{PTd}(p)$ – Передавальна функція регулятора струму по осі d ;

R_s, T' – параметри двигуна.

Під час розрахунків параметрів регулятора струму можна найменшу некомпенсовану постійну часу $T_{\mu i}$ прийняти рівною τ . Виходячи з настройки контуру на модульний оптимум, регулятор буде компенсувати частину об'єкта [28]:

$$W_{I_{d(k)}}(p) = (T_{\mu i}p + 1) \frac{k_p}{T_{\mu i}p + 1} k_{дг} \frac{1}{R_s(T'p + 1)} = \frac{k_p k_{дг}}{R_s(T'p + 1)}. \quad (7.3)$$

Тоді передавальна функція регулятора може бути визначена наступним чином:

$$W_{pT_d}(p) = \frac{1}{2T_{\mu i}p W_{I_{d(k)}}(p)} = \frac{T'p + 1}{2 \frac{T_{\mu i}}{R_s} k_p k_{дг} p}. \quad (7.4)$$

Отримаємо пропорційно-інтегральний регулятор струму (ПІ-регулятор). З розрахунків, проведених вище, видно, що $T_r \gg T'$ ($T_r = 4$ с, $T' = 0,04$ с), тому в контурі регулювання струму по осі q можна застосувати такий же ПІ-регулятор (рисунок 7.4).

Розглянемо контур регулювання потокозчеплення ротора. Для нього контур регулювання струму по осі d буде внутрішнім. Передавальна функція замкнутого контуру струму, налаштованого на модульний оптимум, може бути представлена у вигляді коливної ланки з передавальною функцією:

$$W_{I_{d(3)}}(p) = \frac{1}{k_{дг}(2T_{\mu i}^2 p^2 + 2T_{\mu i}p + 1)} \approx \frac{1}{k_{дг}(2T_{\mu i}p + 1)}. \quad (7.5)$$

Для розрахунку параметрів регулятора в контурі, що містить підпорядкований замкнутий контур (в даному випадку – контур струму статора по осі d), рекомендується розглядати його як аперіодичну ланку з еквівалентною малою постійною часу, рівній подвоєною малій постійній часу підпорядкованого контуру.

Структурна схема контуру регулювання потокозчеплення ротора приведена на рисунку 7.5. Якщо внутрішній контур мав малу некомпенсовану постійну часу $T_{\mu i} = \tau$, то зовнішній $T_{\mu \psi} = 2T_{\mu i}$.

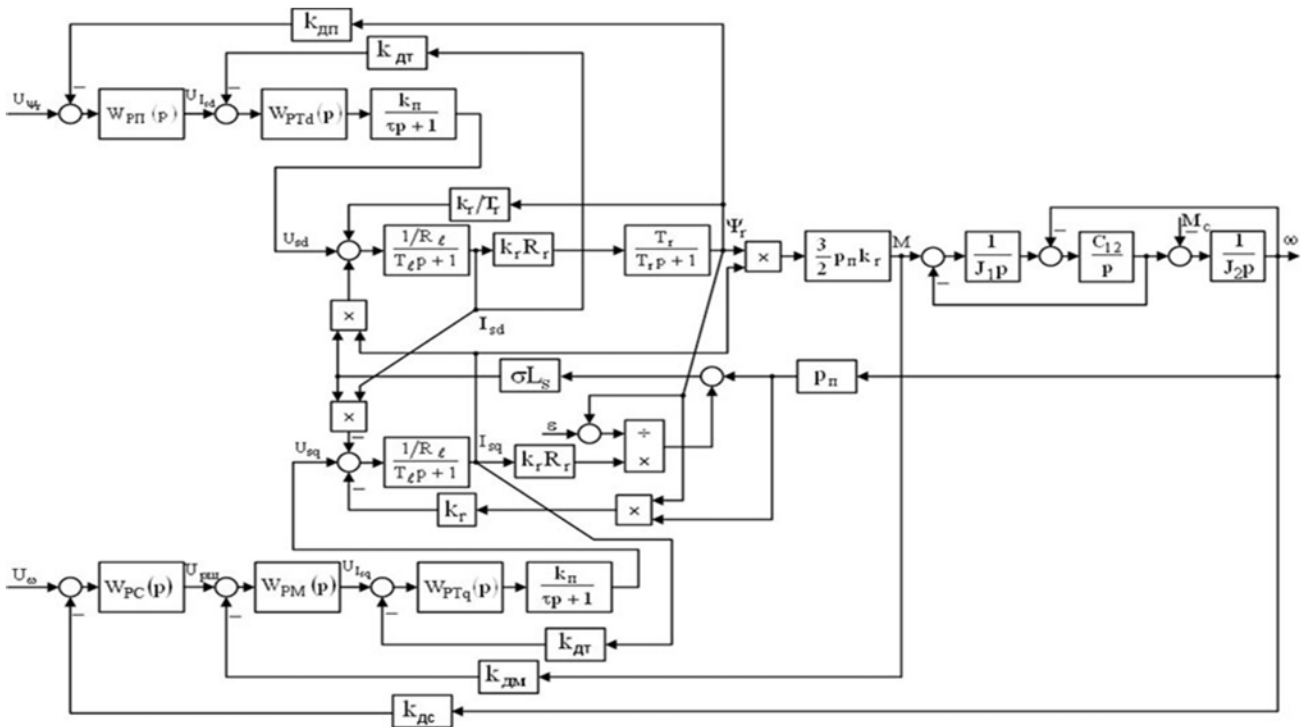


Рисунок 7.4 – Структурна схема електромеханічної системи з екторним керування асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором

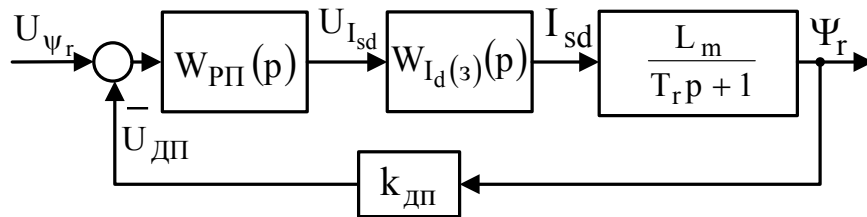


Рисунок 7.5 – Структурна схема контуру потокозчеплення

Виходячи з настройки контуру на модульний оптимум, регулятор буде компенсувати частину об'єкта:

$$W_{\psi_{r(k)}}(p) = (T_{\mu\psi} p + 1) \frac{1}{k_{дт} (T_{\mu\psi} p + 1)} k_{дп} \frac{L_m}{T_r p + 1} = \frac{L_m k_{дп} / k_{дт}}{T_r p + 1}. \quad (7.6)$$

Тоді передавальна функція регулятора потокозчеплення може бути визначена наступним чином:

$$W_{PP}(p) = \frac{1}{2 T_{\mu\psi} p W_{\psi_{r(k)}}(p)} = \frac{T_r p + 1}{2 \frac{T_{\mu\psi}}{k_{дс}} L_m k_{дп} p}. \quad (7.7)$$

Таким чином, виходячи з формули (7.7), регулятор потокозчеплення також буде пропорційно-інтегральним.

Налаштуємо контур регулювання електромагнітного моменту двигуна. Вважаючи, що в системі встановлено номінальне потокозчеплення, спростимо структурну схему, замінивши нелінійні блоки в каналі регулювання швидкості коефіцієнтами з множниками, рівними встановленому потокозчепленню. Спрощена структурна схема приведена на рисунку 7.5. Виходячи з неї, контур моменту можна представити у вигляді, показаному на рисунку 7.6.

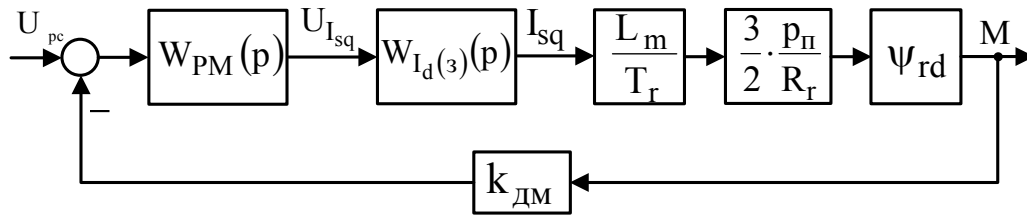


Рисунок 7.6 – Структурна схема контуру моменту

Замкнутий контур струму по осі q можна представити у вигляді:

$$W_{I_q(3)}(p) = W_{I_d(3)}(p) = \frac{1}{k_{дт} (2T_{\mu i} p + 1)}. \quad (7.8)$$

Об'єкт контуру моменту (рисунку 7.6) не має великих постійних часу. Його передавальна функція матиме вигляд:

$$W_M(p) = \frac{1}{k_{дт} (2T_{\mu i} p + 1)} \cdot \frac{L_m}{T_r} \cdot \frac{3p_{\pi}}{2R_r} \Psi_{rd} k_{дм}. \quad (7.9)$$

Так як в контурі потокозчеплення, некомпенсована постійна часу контуру моменту складає $T_{\mu M} = 2T_{\mu i}$. Для настройки контуру, що не має великих постійних часу, слід застосувати інтегральний регулятор з передавальною функцією:

$$W_{PM}(p) = \frac{\beta_{рм}}{p}, \quad (7.10)$$

де $\beta_{рм}$ – динамічний коефіцієнт регулятора моменту:

$$\beta_{рм} = \frac{1}{2T_{\mu M}} \cdot \frac{1}{W_M(p)} \Big|_{p=0} = \frac{k_{дс} T_r R_r}{3T_{\mu M} L_m \Psi_{rd} p_{\pi} k_{дм}}. \quad (7.11)$$

Тоді передавальна функція регулятора моменту буде:

$$W_{PM}(p) = \frac{k_{дт} T_r R_r}{3T_{\mu M} L_m \Psi_{rd} p_{п} k_{дм} p}. \quad (7.12)$$

Виконаємо налаштування контуру швидкості. Об'єкт регулювання для цього контуру матиме інтегруючі властивості, тому для налаштування застосуємо ПІ-регулятор з передавальною функцією:

$$W_{PC}(p) = \beta_{рш} \frac{T_{pc} p + 1}{T_{pc} p}, \quad (7.13)$$

де $T_{pc} = 4T_{\mu\omega} = 16T_{\mu i}$ – постійна часу регулятора швидкості;

$\beta_{рш}$ – динамічний коефіцієнт регулювання швидкості:

$$\beta_{рш} = \frac{k_{дм} J_1}{2T_{\mu\omega} k_{дс}}. \quad (7.14)$$

Звідки

$$W_{PC}(p) = \frac{k_{дм} J_1}{8T_{\mu i} k_{дс}} \cdot \frac{16T_{\mu i} p + 1}{16T_{\mu i} p}. \quad (7.15)$$

Спрощена структурна схема каналу регулювання швидкості електромеханічної системи з векторним регулюванням приведена на рисунку 7.7.

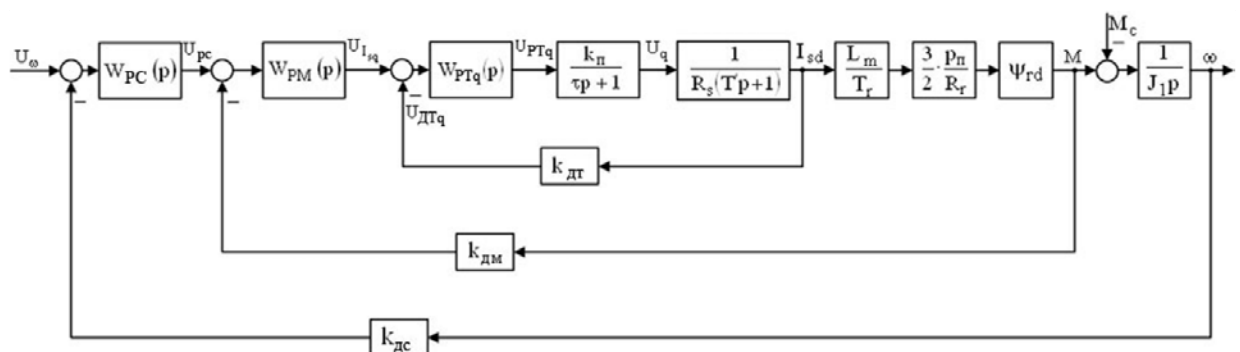


Рисунок 7.7 – Спрощена структурна схема каналу регулювання швидкості електромеханічної системи з векторним регулюванням

7.4 Розрахунок коефіцієнтів регуляторів струму, потокозчеплення ротора, моменту і швидкості

Вихідні дані, необхідні для розрахунку коефіцієнтів регуляторів для наочності занесені до таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Вихідні дані для розрахунку коефіцієнтів регуляторів

№	Назва параметра	Позначення та значення
1	Постійна часу ротора	$T_r = 4 \text{ с}$
2	Приведена постійна часу ротора	$T' = 0,04 \text{ с}$
3	Активний опір статора	$R_s = 0,0043 \text{ Ом}$
4	Приведений активний опір ротора	$R_r = 0,0035 \text{ Ом}$
5	Номінальний струм фази статора	$I_H = 438,9 \text{ А}$
6	Номінальна фазна напруга	$U_\phi = 220 \text{ В}$
7	Напруга задання на перетворювач	$U_3 = 5 \text{ В}$
8	Коефіцієнт передачі перетворювача	$k_{\pi} = U_\phi / U_3 = 220 / 5 = 4$
9	Коефіцієнт передачі датчика струму	$k_{дт} = U_3 / I_H = 5 / 438,9 = 0,0011 \text{ В/А}$
10	Найменша некомпенсована постійна часу в контурі струму при частоті ШІМ –перетворення 4 кГц	$T_{\mu i} = \tau = 1 / 4000 = 0,00025 \text{ с}$
11	Індуктивність головного магнітного контуру	$L_m = 0,01369 \text{ Гн}$
12	Номінальне потокозчеплення	$\psi_{rd} = I_H L_m = 438,9 \cdot 0,01369 = 6,008 \text{ Вб}$
13	Коефіцієнт передачі датчика потокозчеплення	$k_{дп} = U_3 / \psi_{rd} = 5 / 6,008 = 0,832 \text{ В/Вб}$
14	Найменша некомпенсована постійна часу в контурі потокозчеплення	$T_{\mu \psi} = 2 T_{\mu i} = 2 \cdot 0,00025 = 0,0005 \text{ с}$
15	Коефіцієнт передачі датчика моменту	$k_{дм} = U_3 / M_H = 5 / 1608 = 0,0031 \text{ В/Нм}$

16	Найменша некомпенсована постійна часу в контурі моменту	$T_{\mu M} = 2 T_{\mu i} =$ $= 2 \cdot 0,00025 = 0,0005 \text{ c}$
17	Коефіцієнт передачі датчика швидкості	$k_{дс} = U_3 / \omega_H =$ $= 5 / 155,43 = 0,0321 \text{ Вс}$
18	Найменша некомпенсована постійна часу в контурі швидкості	$T_{\mu \omega} = 2 T_{\mu M} =$ $= 2 \cdot 0,0005 = 0,001 \text{ c}$

Використовуючи дані з таблиці 7.1, визначимо коефіцієнти регуляторів струму по осі d і по осі q:

$$W_{PT_d}(p) = W_{PT_q}(p) = \frac{0,04p + 1}{2 \cdot \frac{0,00025}{0,0043} \cdot 44 \cdot 0,0321p} = \frac{0,04p + 1}{0,164p}$$

Коефіцієнти регулятора потокозчеплення:

$$W_{PI}(p) = \frac{4p + 1}{2 \cdot \frac{0,0005}{0,0321} \cdot 0,01369 \cdot 0,832p} = \frac{4p + 1}{0,00035p}$$

Розрахуємо динамічний коефіцієнт регулятора:

$$\beta_{PM} = \frac{0,0321 \cdot 4 \cdot 0,0035}{3 \cdot 0,0005 \cdot 0,01369 \cdot 6,008 \cdot 3 \cdot 0,0031} = 316,99$$

Тоді регулятор моменту матиме передавальну функцію:

$$W_{PM}(p) = \frac{316,99}{p}$$

Динамічний коефіцієнт регулятора швидкості:

$$\beta_{PC} = \frac{0,0031 \cdot 5,9}{2 \cdot 0,001 \cdot 0,0321} = 284,89$$

Постійна часу регулятора швидкості:

$$T_{PC} = 4T_{\mu \omega}, \tag{7.16}$$

$$T_{pc} = 4 \cdot 0,001 = 0,004 \text{ (с)}.$$

Передавальна функція регулятора швидкості:

$$W_{PC}(p) = \beta_{pc} \frac{T_{pc}p + 1}{T_{pc}p}, \quad (7.17)$$

$$W_{PC}(p) = 284,89 \frac{0,004p + 1}{0,004p}.$$

8 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЛИСТОПРАВИЛЬНОЇ МАШИНИ

8.1 Моделювання системи електропривода без врахування технологічних особливостей роботи установки

Використовуючи модель асинхронного двигуна в трифазній системі координат (d – q) з урахуванням жорсткості ексцентрикового валу у вигляді маскованої підсистеми в MATLAB Simulink, а також структурну схему електромеханічної системи з векторним керуванням, складемо модель базової електромеханічної системи з векторним керуванням при постійному значенні потокозчеплення ротора (рисунок 8.1).

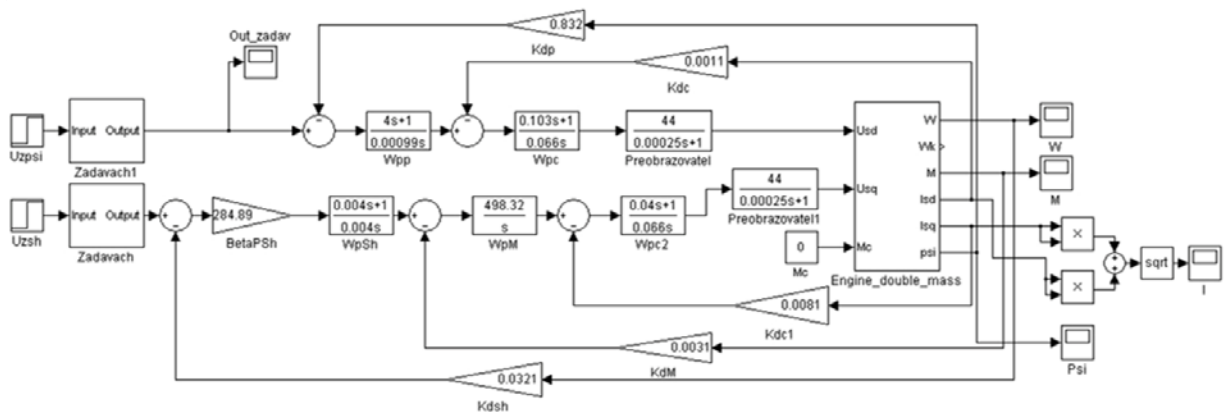


Рисунок 8.1 – Модель базової електромеханічної системи в MATLAB Simulink з векторним керуванням при постійному значенні потокозчеплення ротора

Номінальна напруга завдання перетворювача при моделюванні будемо вважати рівною 5 В. З огляду на тахограму, яку повинен відпрацьовувати електропривод, візьмемо тривалість наростання сигналу в задатчику інтенсивності меншу найменшого часу розгону і гальмування (менше 0,35 с) – 0,05 с. Доповнена модель асинхронного двигуна в трифазній системі координат (d - q) з урахуванням жорсткості ексцентрикового валу у вигляді маскованої підсистеми в MATLAB Simulink приведена на рисунку 8.2.

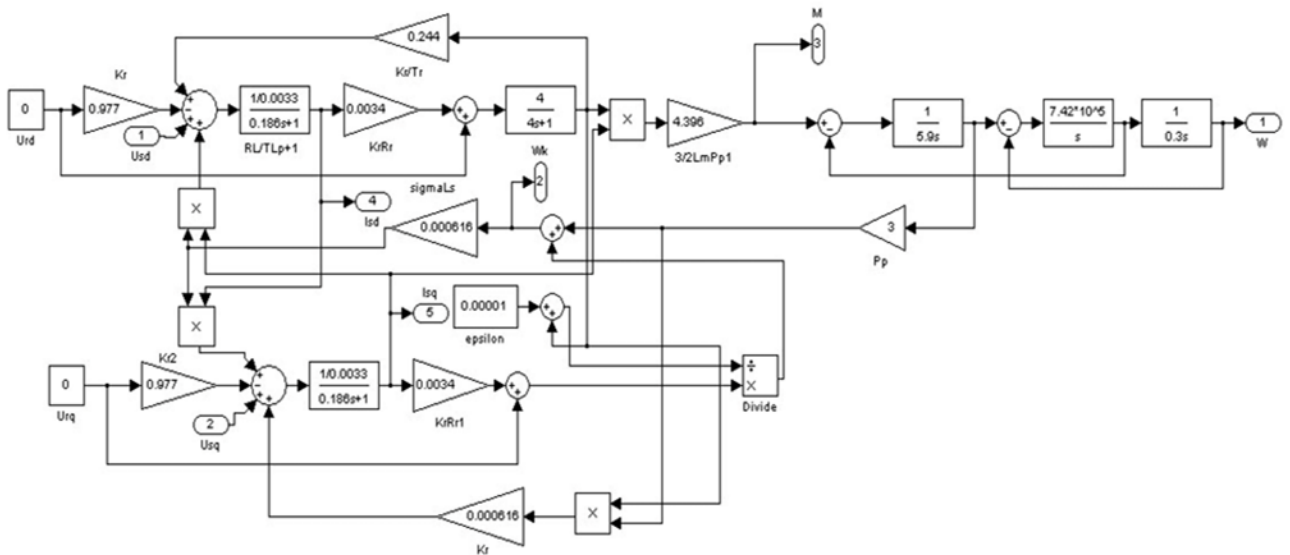


Рисунок 8.2 – Доповнена модель асинхронного двигуна в трифазній системі координат (d - q) з урахуванням жорсткості ексцентрикового вала у вигляді маскованої підсистеми в MATLAB Simulink

Модель задатчика інтенсивності в MATLAB Simulink приведена на рисунку 8.3.

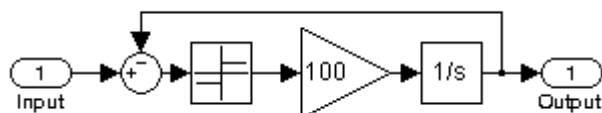


Рисунок 8.3 – Модель задатчика інтенсивності в MATLAB Simulink

Напруга на виході задатчика інтенсивності наростає за 0,05 с до заданого значення 5 В – знімається з блоку Out_zadav. При цьому блок Uzpsi формує ступінчастий сигнал без затримки, а блок Uzsh – із затримкою на час досягнення завданням за поточкозчепленням номінального значення, тобто на 0,05 с.

Результати моделювання приведені на рисунках 8.4 – 8.8.

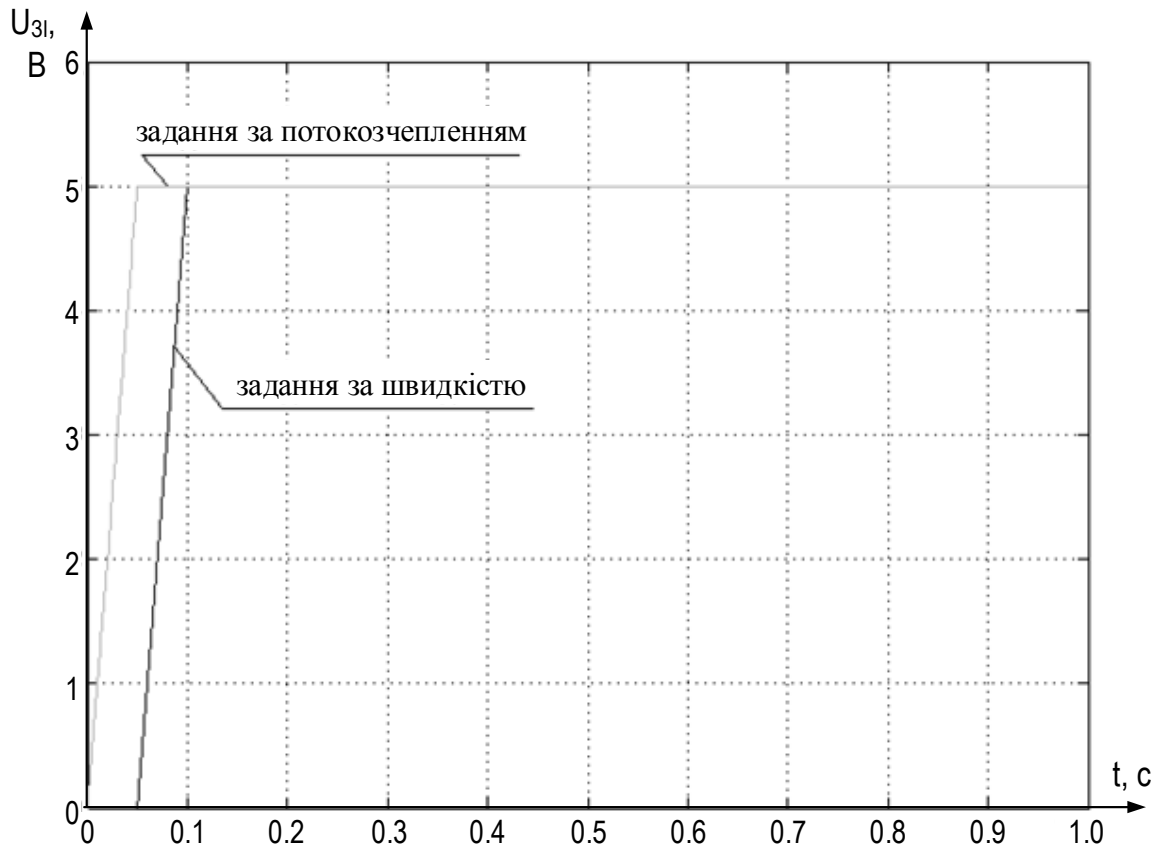
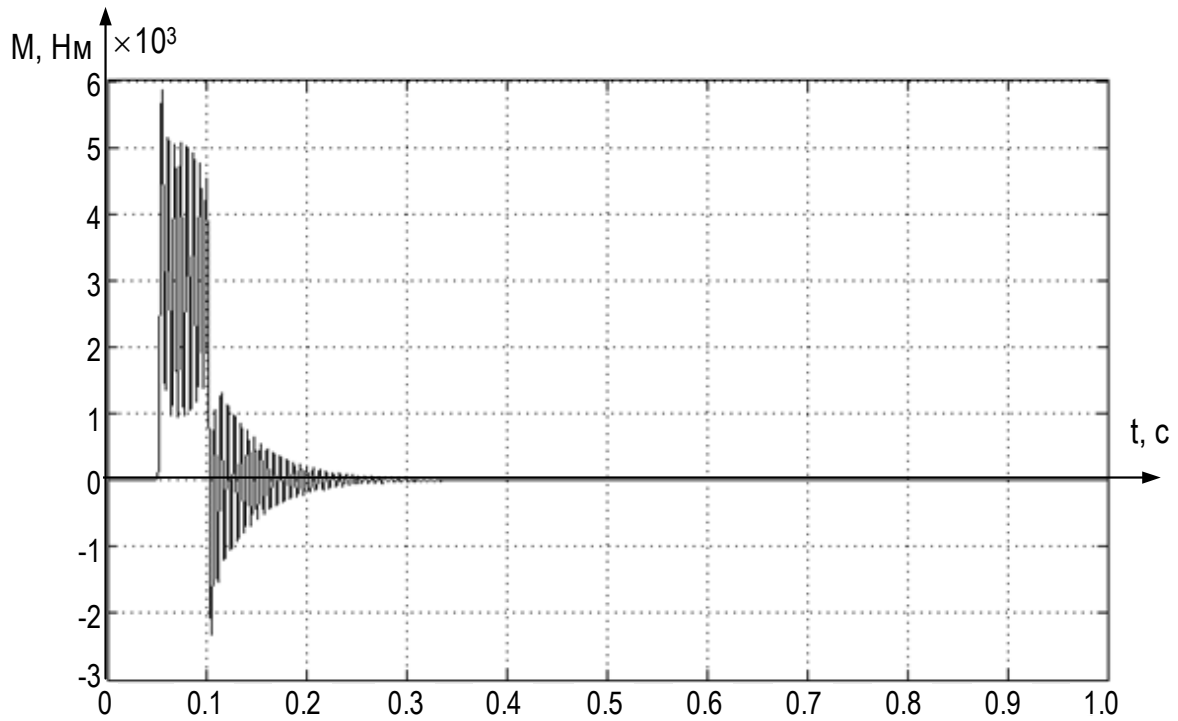


Рисунок 8.4 – Напряга на виході підсистеми задатчика інтенсивності



Рисунок

8.5 – Зміна моменту при пуску в холостому режимі

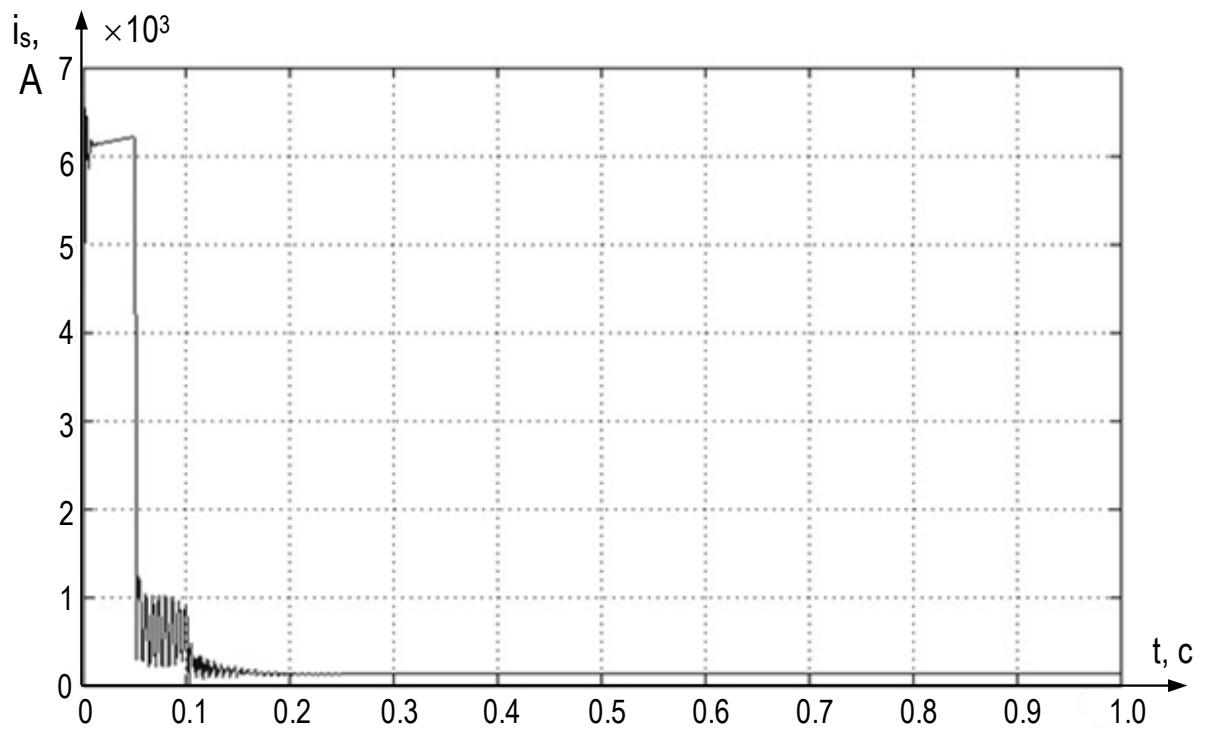


Рисунок 8.6 – Зміна струму статора при пуску в холостому режимі

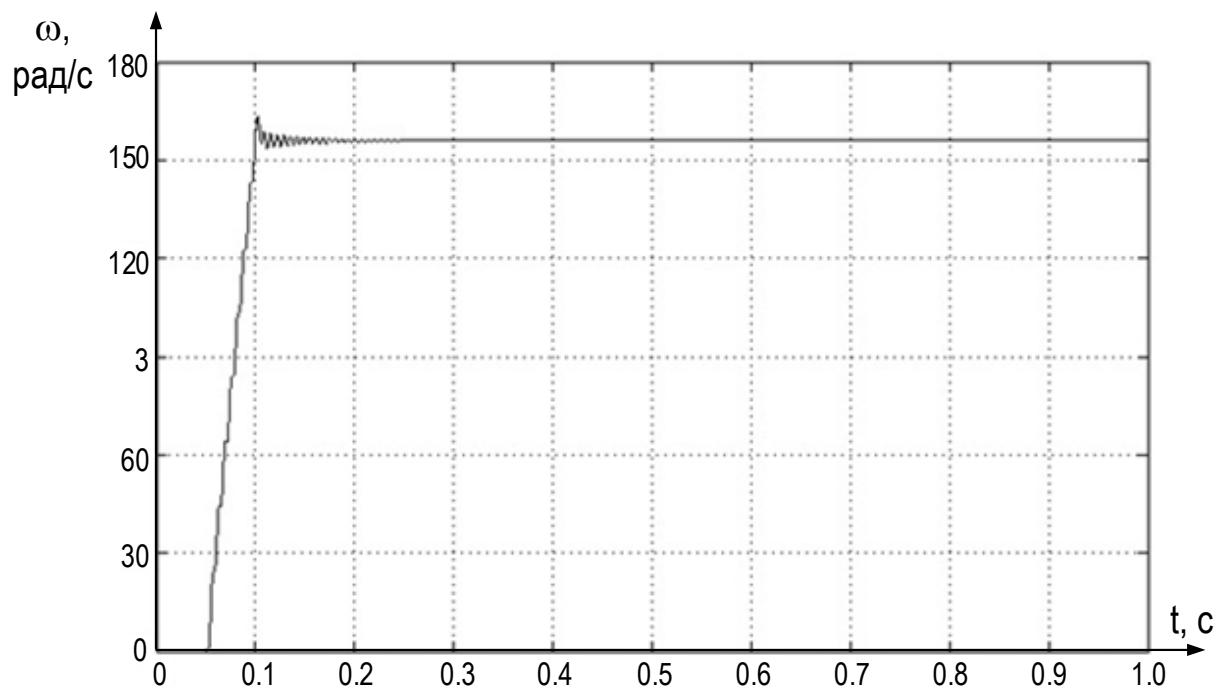


Рисунок 8.7 – Перехідна функція по швидкості при пуску в холостому режимі

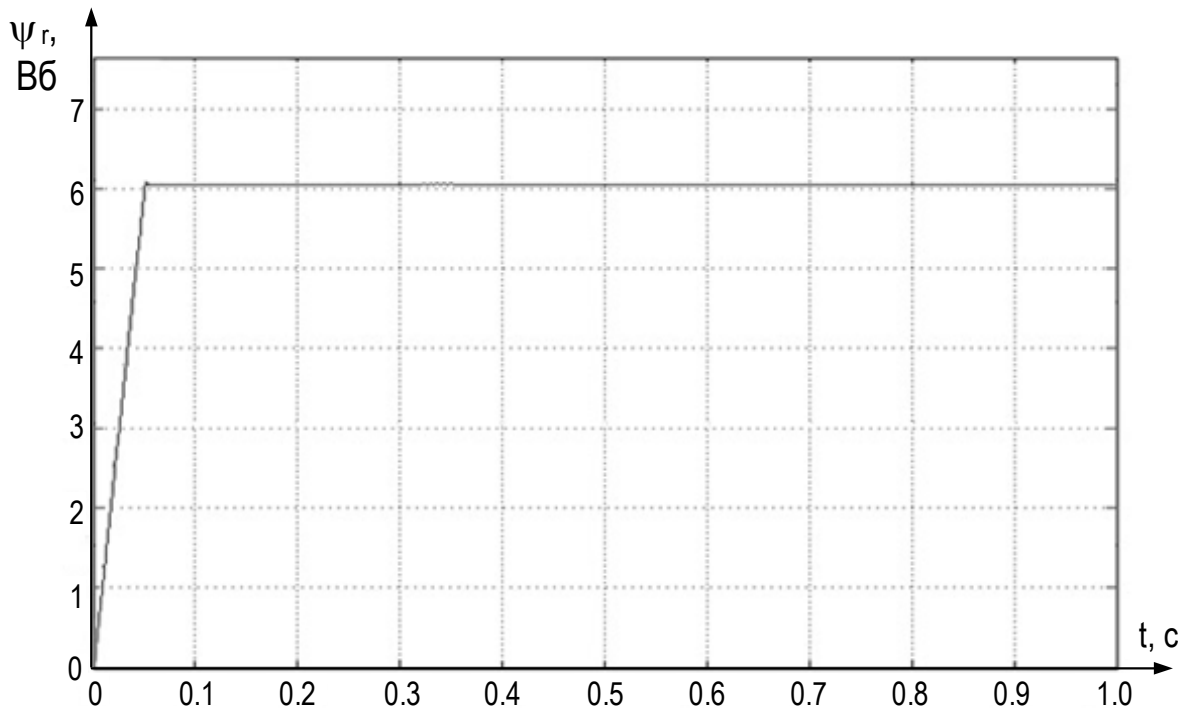


Рисунок 8.8 – Перехідна функція по потокозчепленню ротора при пуску в холостому режимі

Аналізуючи отримані динамічні характеристики можна зробити висновок, що швидкодія системи з векторним керуванням при пуску виявилася значно вища швидкодії асинхронного двигуна, що включається в трифазну мережу. Так, тривалість перехідного процесу по швидкості в електромеханічній системі з векторним керуванням становить близько 0,12 с, тоді як в електромеханічній системі без векторного управління вона дорівнювала 17 с, тобто швидкодія збільшується в 141 разів. Це говорить про компенсацію великих постійних часу електропривода за допомогою регуляторів. При цьому пере-регулювання по швидкості складає 4,6 %, що є допустимим для технологічного процесу.

З графіків можна зробити висновок, що максимальне значення пускового моменту не перевищує допустиме, а максимальне значення струму при пуску становить також не перевищує допустимого значення струмового перевантаження. Тому умови пуску можна вважати прийнятними.

З перехідної функції по потокозчепленню ротора можна зробити висновок, що воно підтримується на номінальному рівні $\psi_{rd} = 6,008$ Вб. Це значення в

базовій електромеханічній системі не є функціонально пов'язаним з моментом навантаження, яке додається до валу двигуна.

Статичні характеристики замкнутого електропривода приведені на рисунку 8.9. побудовані для трьох різних значень напруги завдання, починаючи від 1 В до 5 В. Всі вони проходять паралельно з віссю моменту.

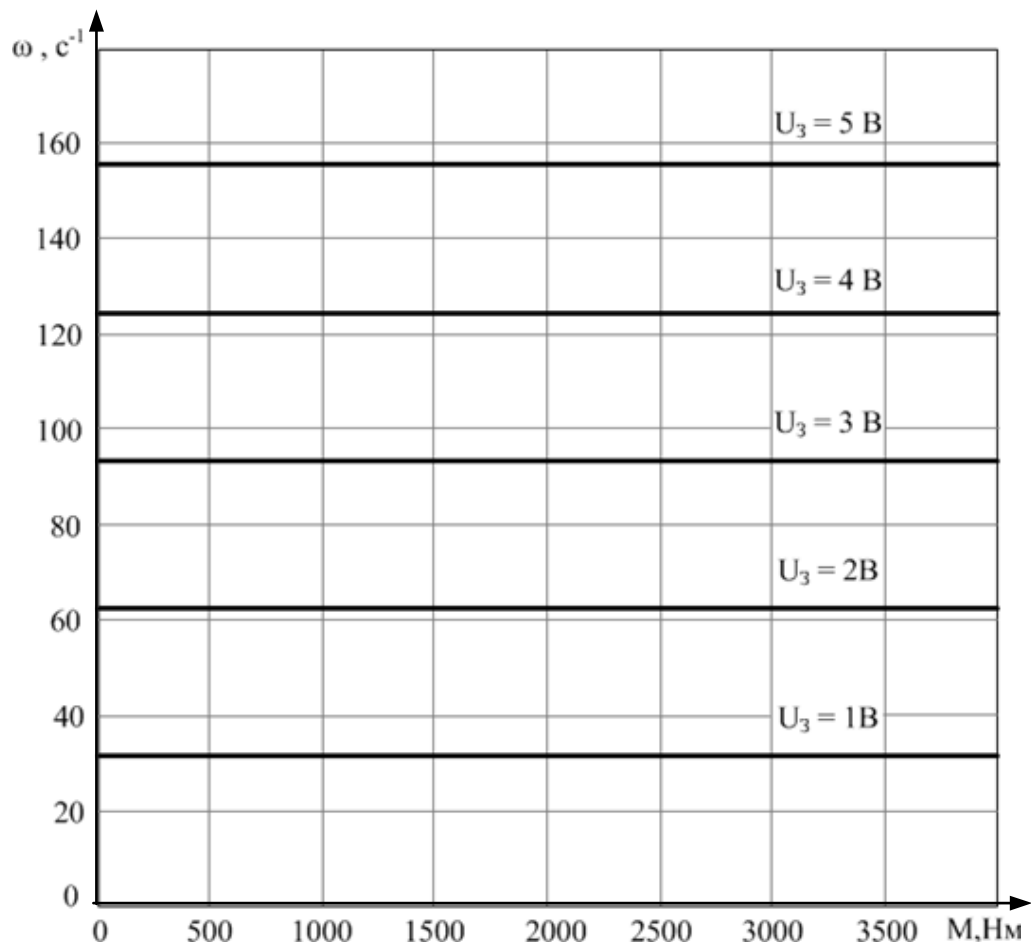


Рисунок 8.9 – Статичні характеристики замкнутого електропривода

8.2 Моделювання системи електропривода при відпрацюванні тахограм технологічного процесу правки металу з врахуванням зміни статичного моменту навантаження і моменту інерції

Для моделювання тахограм можна використовувати блок Signal Builder з середовища MATLAB Simulink. Цей блок дозволяє сформуванню сигнал завдання по набору точок, проміжки між якими заповнюються прямолінійними відрізками (рисунки 8.10, 8.11).

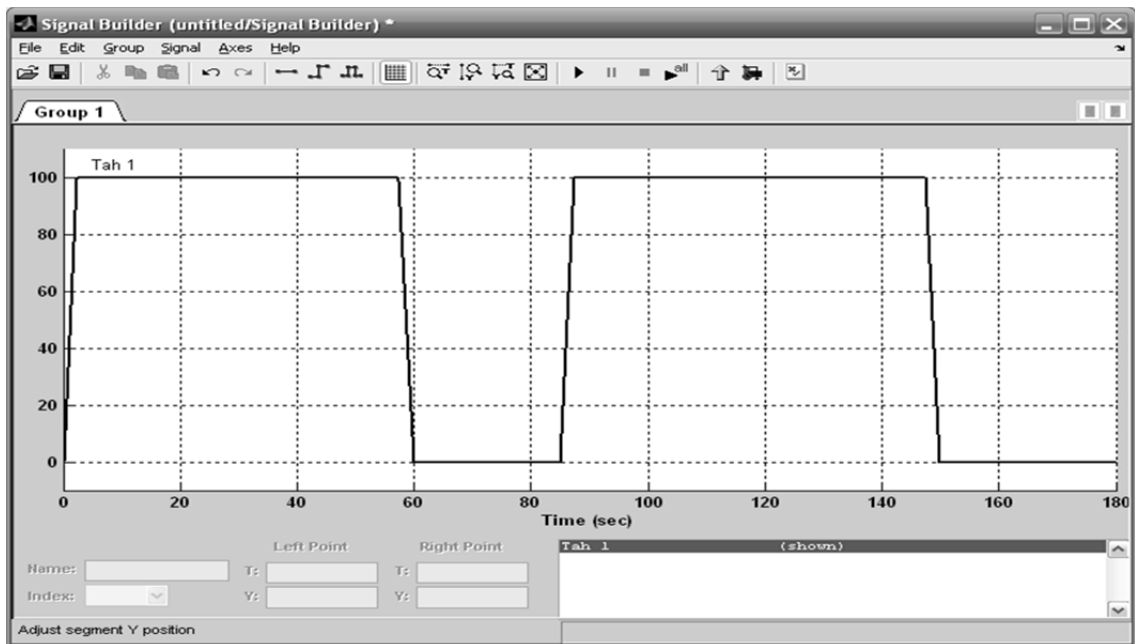


Рисунок 8.10 – Тахограма роботи електроприводу пресового обладнання машини для смуги шириною 1600 мм, яка рухається зі швидкістю 1 м/с при довжині листа 2 м

Тахограма на рисунку 8.10 відповідає прокатці смуги шириною 1600 мм, яка рухається зі швидкістю 1 м/с, на листи довжиною 2 м. При цьому привод повністю не зупиняється, а тільки знижує швидкість обертання після чергової правки. У блоці Signal Builder задані два цикли правки.

На рисунку 8.11 зображений процес правки смуги, який змінюється залежно від кількості робочих роликів. Після завершення правки привод зупиняється. Для врахування зміни статичного моменту сформуємо відповідну функцію. Приведення цього моменту до валу двигуна і переведення його в систему СІ можна скористатися формулою:

$$M_{с.дв} = \frac{9,8065 \cdot M_{с.маш(СГС)}}{i \cdot \eta}, \quad (8.1)$$

де $M_{с.маш(СГС)}$ – статичний момент навантаження, приведений до валу листопривальної машини в системі СГС;

$M_{с.дв}$ – статичний момент навантаження, приведений до валу двигуна в системі СІ.

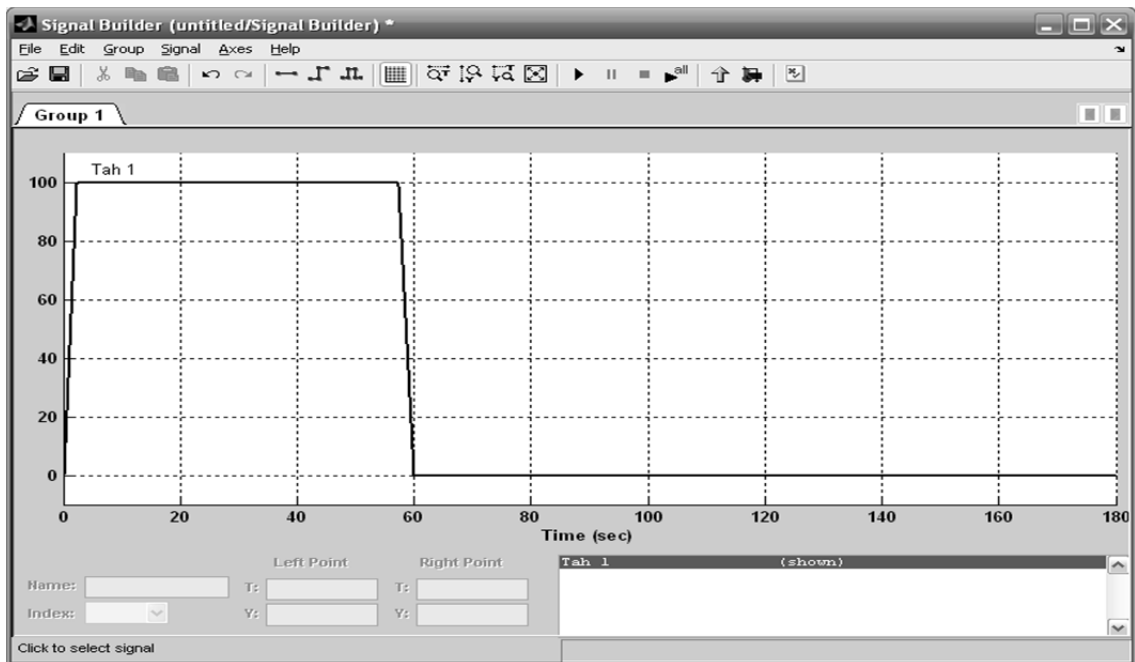


Рисунок 8.11 – Тахограма роботи електроприводу пресового обладнання машини для смуги шириною 1600 мм, яка рухається зі швидкістю 1 м/с з зупинкою після кожного циклу правки

Обертання валу на 360° відповідає одному циклу правки, який становить 2 с. Статичний момент завантаження приведений, до валу двигуна, показаний на рисунку 8.12.

Зміна статичного моменту, показаного на рисунку 8.12, приводиться до тахограми роботи приводу, наведеної на рисунку 8.10, тобто правка відбувається протягом часу від 2,4 с до 35,4 с після початку циклу роботи. У цей час момент є максимальним і становить 1866 Нм, що розраховано вище. При цьому обертання на 360° відповідає 2 с, а значення проміжних точок залежності, отримані зіставленням ординат тахограми (рисунок 8.10) і експериментальної діаграми зміни статичного моменту.

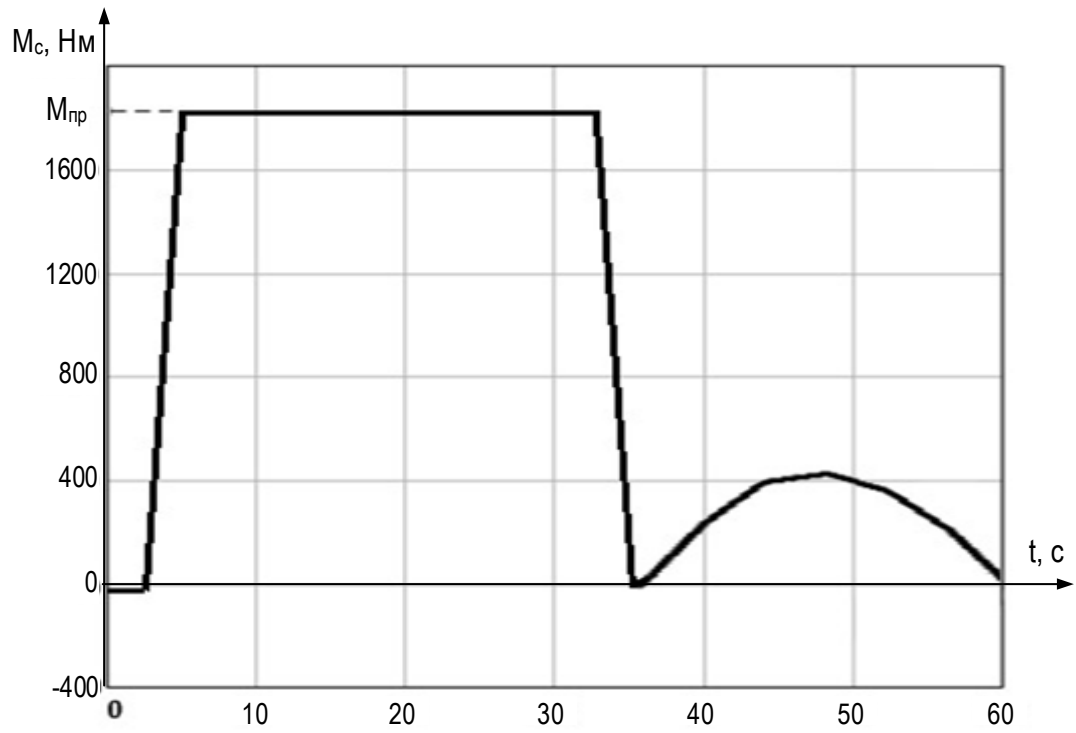


Рисунок 8.12 – Залежність статичного моменту на валу двигуна протягом одного циклу правки смуги

9 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

У практиці господарювання підприємства приймаються різноманітні рішення, пов'язані з інвестуванням виробництва і соціальної інфраструктури. З огляду на це заведено розрізняти загальну (абсолютну) і порівняльну (відносну) ефективність капіталовкладень.

Абсолютна ефективність капіталовкладень відбиває загальну величину їх віддачі на підприємстві. Її розрахунки потрібні для оцінки очікуваного або фактичного ефекту від реальних інвестицій за певний період.

Ефективність капітальних вкладень загальна (абсолютна) – економічна категорія, яка визначає доцільність капітальних вкладень при плануванні й аналізі результатів їх освоєння. Виявляється у зіставленні економічного ефекту від капітальних вкладень з витратами на його досягнення і порівняння з відповідним нормативом.

Ефект капітальних вкладень залежно від рівня управління може виявлятися як приріст прибутку або зниження собівартості. Для капітальних вкладень у матеріальну базу сфери нематеріального виробництва ефект вимірюється в натуральних показниках (одиниця потужності, пропускної здатності, місткості об'єктів, у вартісному оцінюванні (обсяг реалізації продукції чи послуг, величина додаткового прибутку). Загальна ефективність капітальних вкладень – розраховують як відношення величини ефекту до обсягу капітальних вкладень, що зумовлюють ефект.

Для визначення абсолютної ефективності застосовують два взаємозв'язані показники:

- 1) коефіцієнт економічної ефективності капіталовкладень;
- 2) період окупності капіталовкладень, він є оберненим до коефіцієнта абсолютної економічної ефективності.

В таблиці 9.1 приведено розрахунок капітальних вкладень на розробку системи керування електроприводом листоправильної машини.

Таблиця 9.1 – Капітальні витрати на електроустаткування

Найменування обладнання	Кошторисна вартість, грн.
Двигун (2 шт.)	366880
Перетворювач частоти	1491360
Кабелі, апаратура захисту, сенсори та ін.	130 000
Всього	1988240
Монтажні та налагоджувальні роботи (10%)	198824
Всього капітальні вкладення	2187064

Отже, капітальні витрати $E_k = 2187064$ грн.

Експлуатаційні витрати включають витрати на забезпечення нормального функціонування певного технічного рішення в період його експлуатації протягом одного року .

Експлуатаційні витрати E включають:

- 1) амортизаційні відрахування E_a ;
- 2) заробітна плата $E_{зп}$ обслуговуючого персоналу (основна, додаткова, нарахування на заробітну плату);
- 3) витрати на силову електроенергію E_e ;
- 4) витрати на поточний ремонт $E_{пр}$;
- 5) інші витрати $E_{ін}$.

Тобто:

$$E = E_a + E_{зп} + E_e + E_{пр} + E_{ін}. \quad (9.1)$$

Річні амортизаційні відрахування становлять (норма амортизації 10% в рік):

$$E_a = 10\% \cdot E_k, \quad (9.2)$$

$$E_a = 0,1 \cdot 2187064 = 218706,4 \text{ (грн)}$$

В Україні з 2002 року запроваджена єдина тарифна сітка розрядів і коефіцієнтів з оплати праці працівників установ, закладів та організацій окремих

галузей бюджетної сфери. Вона складається з 25 тарифних розрядів, що поширюються на всіх працівників підприємства (керівників, спеціалістів, службовців, робітників).

Згідно ПУЕ обслуговувати установки до 1000 В може робітник, у якого розряд не нижче четвертого, група допуску не нижча третьої групи по електробезпеці.

Витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу розраховуємо за формулою:

$$E_{зп} = E_{зо} + E_{зд} + E_{зн}. \quad (9.3)$$

де $E_{зо}$ – основна заробітна плата по тарифу;

$E_{зд}$ – додаткова заробітна плата;

$E_{зн}$ – нарахування на заробітну плату.

$$E_{зо} = N \cdot T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{еф}} \cdot K_c \cdot \beta. \quad (9.4)$$

де N – кількість робітників, що обслуговують установку ($N = 1$ чол.);

T_1 – погодинна тарифна ставка робітника 1-го розряду
($T_1 = 22$ грн/год.);

K – тарифний коефіцієнт ($K = 1,97$);

$\Phi_{\text{еф}}$ – ефективний фонд робочого часу на обслуговування електропривода за рік (приймаємо рівним 110 год.);

K_c – коефіцієнт співвідношення, встановлений Генеральною угодою між профспілками і урядом ($K_c = 1$);

β – частка часу, який витрачає робітник на обслуговування установки в загальному часі своєї роботи ($\beta = 1$).

Розраховуємо основну заробітну плату по тарифу:

$$E_{зо} = 1 \cdot 22 \cdot 1,97 \cdot 110 \cdot 1 \cdot 1 = 4767,4 \text{ (грн)}.$$

Додаткова заробітна плата $E_{зд}$ становить 10% основної заробітної плати:

$$E_{зд} = 4767,4 \cdot 0,1 = 476,7 \text{ (грн)}.$$

Розрахунок нарахувань на заробітну плату зведемо в таблицю 9.2.

Таблиця 9.2 – Розрахунок нарахувань на заробітну плату

Показник	Сума
Основна заробітна плата, $E_{зо}$ грн.	4767,4
Додаткова заробітна плата, $E_{зд}$ грн.	476,7
Разом основна і додаткова заробітна плата, $(E_{зо}+E_{зд})$ грн.	5244,1
Єдиний внесок на загальнообов'язкове соціальне страхування, (38%) грн.	1992,8
Всього нарахування, грн	7236,9

Таким чином, з (9.3) маємо:

$$E_{зп} = 4767,4 + 476,7 + 1992,8 = 7236,9 \text{ (грн).}$$

$$E_{зп} = 4767,4 + 476,7 + 1992,8 = 7236,9 \text{ (грн).}$$

Серед існуючих методів зниження витрат на виробництво можна знайти резерви зниження собівартості продукції при проведенні заходів з енергозбереження, енергоефективності економії електроенергії на виробництві і підприємстві.

Для того, щоб забезпечити економію електроенергії на підприємстві без шкоди для основної діяльності, заходи з енергозбереження на підприємстві повинні носити комплексний і систематичний характер. Також вони можуть вимагати значних капітальних вкладень.

Витрати на силову електроенергію знаходимо за формулою:

$$E_e = \frac{P}{\eta} \cdot B \cdot \Phi_{ef} \cdot K_{вм} \cdot K_3. \quad (9.5)$$

де B – вартість електроенергії (травень 2016 р. для II класу напруги $B = 2,02$ грн./кВт·год.);

P – номінальна потужність;

η – коефіцієнт корисної дії ($\eta = 0,961$);

$T_{\text{эф}}$ – ефективний фонд часу роботи в рік;

$K_{\text{вм}}$ – коефіцієнт ввімкнення (використання за часом $K_{\text{вм}}=0,8$);

K_3 – коефіцієнт завантаження (використання за потужністю).

Номинальна потужність складає 250 кВт. Коефіцієнт ввімкнення приймаємо рівним 0,8, а коефіцієнт завантаження рівний 0,9.

Ефективний фонд робочого часу при режимі роботи в 1 зміну протягом 95% часу за рік становить:

$$\Phi_{\text{эф}} = 220 \cdot 8 \cdot 0,95 = 1672 \text{ (год)}.$$

Отже, за формулою (9.5) маємо:

$$E_{\epsilon} = \frac{250}{0,961} \cdot 2,02 \cdot 1672 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 632611,03 \text{ (грн / рік)}.$$

Поточний ремонт нетривалий. Він повинен бути закінчений протягом невеликого проміжку часу, відведеного за графіком (ремонтна зміна, ремонтні добу і т. д.).

В обсяг поточного ремонту входить:

- 1) розбирання окремих вузлів механізму в межах відведеного часу для ремонту;
- 2) заміна окремих швидко зношуються вузлів і деталей;
- 3) промивка та чистка окремих вузлів механізму, що вимагають невеликого обсягу робіт;
- 4) заміна масла, регулювання механізмів, усунення підвищених зазорів, метизи всього агрегату і т. п.

Витрати на проведення ремонтних робіт включають витрати на комплектуючі і запасні частини та інші елементи, які підлягають заміні та витрати на оплату праці персоналу, який проводить ремонтні роботи. Для визначення витрат на оплату праці робітників-ремонтників необхідно розрахувати трудомісткість ремонтних робіт. Трудомісткість ремонтних робіт визначається згідно графіка планово-попереджувальних ремонтів (таблиця 9.3), у якому

зазначено тривалість міжремонтних періодів та трудомісткість кожного виду ремонту.

Таблиця 9.3 – Графік ремонтів

Найменування обладнання	Види ремонтів по місяцях												Трудомісткість, люд·год.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Система керування			3				3				3		9
Двигун		2				2					2		6
Кабельна мережа				2				2				2	6
Апарати захисту		2				2				2			6
Сенсори	3				3				3				9
Загальна трудомісткість												48	

Вважаємо, що ремонтні роботи проводить електромонтер шостого розряду. З врахуванням того, що нам відома трудомісткість робіт (таблиця 9.3), основну заробітну плату розрахуємо за формулою:

$$E_{30} = T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{эф}}, \quad (9.6)$$

$$E_{30} = 22 \cdot 1,97 \cdot 48 = 2080,32 \text{ (грн).}$$

Нарахування на заробітну плату (38%):

$$E_{38} = 2080,32 \cdot 0,38 = 790,52 \text{ (грн).}$$

Всього витрати на заробітну плату для проведення ремонтних робіт становлять:

$$E_{3p} = 2080,32 + 790,52 = 2870,84 \text{ (грн).}$$

Витрати на матеріали, комплектуючі та запасні частини для поточного ремонту приймають рівними 15% витрат від основної заробітної плати. Тобто,

витрати на матеріали для ремонтів становить:

$$E_M = 2080,32 \cdot 0,15 = 312,1 \text{ (грн)}.$$

Всього витрати на поточний ремонт обладнання становлять:

$$E_{\text{пр}} = E_{\text{зп}} + E_M, \quad (6.7)$$

$$E_{\text{пр}} = 2870,84 + 312,1 = 3182,94 \text{ (грн)}.$$

Розмір інших витрат приймаємо рівним 5% від загальної суми попередніх витрат. Тобто:

$$E_{\text{ін}} = (E_a + E_{\text{зп}} + E_e + E_{\text{пр}}) \cdot 5\%, \quad (6.8)$$

$$E_{\text{ін}} = (218706,4 + 7236,9 + 1265222,1 + 3182,94) \cdot 0,05 = 74717,4 \text{ (грн)}.$$

Розрахунок загальної суми експлуатаційних витрат за формулою (6.1) наведено в таблиці 9.4.

Таблиця 9.4 – Розрахунок сумарних експлуатаційних витрат

Найменування витрат	Сума
Амортизаційні відрахування E_a , грн.	218706,4
Заробітна плата $E_{\text{зп}}$ обслуговуючого персоналу, грн.	7236,9
Витрати на електроенергію E_e , грн.	1265222,1
Витрати на поточний ремонт $E_{\text{пр}}$, грн.	3182,94
Інші витрати $E_{\text{ін}}$, грн.	74717,4
Всього експлуатаційні витрати E , грн.	1569065,7

Висновок: у даному розділі проведено розрахунок капітальних вкладень створення системи керування електроприводом листоправильної машини. Була розрахована основна заробітна плата, витрати на електроенергію, на планові ремонти та інші витрати. Оскільки, прибуток від засобу невідомий, або не розраховується як такий, то термін окупності неможливо розрахувати, тому зупиняємося на експлуатаційних витратах.

10 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У даній випускній кваліфікаційній роботі розробляється мікропроцесорна система керування електроприводом листопрямильної машини. Розглянемо умови праці оператора листопрямильної машини.

Згідно ГОСТ 12.003-74 на нього впливають наступні шкідливі та небезпечні виробничі фактори.

Фізичні:

- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищена та понижена температура повітря робочої зони;
- підвищена та понижена рухомість повітря;
- підвищена та понижена вологість повітря;
- нестача природного освітлення;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень вібрації;
- небезпечний рівень напруги в електричному колі, замикання якого може виникнути через тіло людини.

Психофізіологічні:

- фізичні перевантаження (статичні);
- нервово-психічні перевантаження (монотонність праці, емоційні перевантаження).

10.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

10.1.1 Санітарно-гігієнічні вимоги до робочого середовища користувача ЕОМ

Основним обладнанням на робочому місці оператора лінії обробки листового металу є відеомонітор, клавіатура, робочий стіл, стілець (крісло); допоміжним – пюпітр, підставка для ніг шафи, полиці та ін. Вимоги до них

відображені у нормативних документах: ВСНиПРВЦ; ГОСТ 12.2.032-78; ГОСТ 22269-76.

Під просторовою орієнтацією робочого місця розуміється розміщення у певному порядку елементів основного та допоміжного обладнання відносно одне одного та працюючої людини. Просторова організація робочого місця в основному визначається розмірами та формою сенсорного та моторного простору, формою та параметрами елементів робочого місця та просторовим розташуванням елементів відносно працюючого.

Робочі місця з ВДТ повинні розташовуватися на відстані не менше як 1,5 м від стіни з віконними прорізами, від інших стін – на відстані 1 м, між собою на відстані не менше як 1,5 м. При розміщенні робочих місць необхідно виключити можливість прямого засвічування екрана джерелом природного освітлення. Джерело природного освітлення (вікно) не повинно також потрапляти у зону прямого спостереження користувача. Відносно світлових отворів робочі місця доцільно розташовувати таким чином, щоб природне світло падало на нього збоку, переважно зліва. При розміщенні ВДТ на робочому місці потрібно забезпечити простір для користувача величиною не менше як 850 мм з урахуванням виступаючих частин обладнання та застосування (при необхідності) спецодягу.

Робоче місце оператора листопрямильної машини розміщене у цеху механічної обробки листового металу. Розміри приміщення 36x12x5 м. Стеля, стіни пофарбовані у світло-зелений колір. Підлога – дерев'яна. Площа приміщення $36 \times 12 = 432 \text{ м}^2$. Площа, яку займає обладнання у приміщенні становить 357 м^2 . Так-як у приміщенні вісім робочих місць, то на одного оператора припадає 9 м^2 площі та 45 м^3 об'єму. Це задовольняє існуючим нормам (СН 245-71), згідно яким на одного працюючого повинно бути не менше 15 м^3 об'єму та $6,0 \text{ м}^2$ площі.

Робота оператора лінії обробки листового металу вимагає можливості повороту та регулюванням нахилу екрана. Ця вимога тим більш важлива, чим численнішими та різноманітнішими є заплановані випадки застосування ВДТ.

Установка рівня екрана над столом та його розташування повинні забезпечуватися за допомогою вторинних пристроїв на робочому місці.

Необхідно стало розташовувати клавіатуру на робочому столі, не допускаючи її хитання. Разом з тим має бути передбачена можливість її поворотів та переміщень. Положення клавіатури та кут її нахилу повинні відповідати побажанням користувача.

Для операторів на робочому місці було виділено 21 просторових параметрів, які представлені в таблиці 10.1 та на рисунку 10.1.

Таблиця 10.1 – Параметри робочого місця

Просторові параметри	L, мм
Висота сидіння	400-500
Висота клавіатури від підлоги	600-750
Кут нахилу клавіатура	7-15 °
Ширина основної клавіатура	не>400
Глибина основний клавіатура	не>200
Видалення клавіатури від краю столу	80-100
Просторові параметри	L, мм
Висота екрана від рівня підлоги	950-1000
Кут нахилу екрану і нормалі	0-30 °
Відстань екрану від краю столу	500-700
Висота поверхонь для записів	670-850
Площа поверхні для записів	600x400
Кут нахилу поверхні для записів	0-100
Глибина простору для ніг в колінах	<400
Глибина простору на рівні ступень	<600
Висота простору для ніг в колінах	<600
Висота простору на рівні ступень	<100
Ширина простору для ніг на рівні	<500
Висота підставки для ніг	50-130

Кут підставки для ніг	0-25
Ширина підставки для ніг	300
Глибина підставки для ніг	400

Розташування технічних засобів повинно давати можливість користувачеві виконувати прості функції лівою рукою з метою зниження великих навантажень на праву руку під час ведення записів, роботи з клавіатурою та інших операцій.

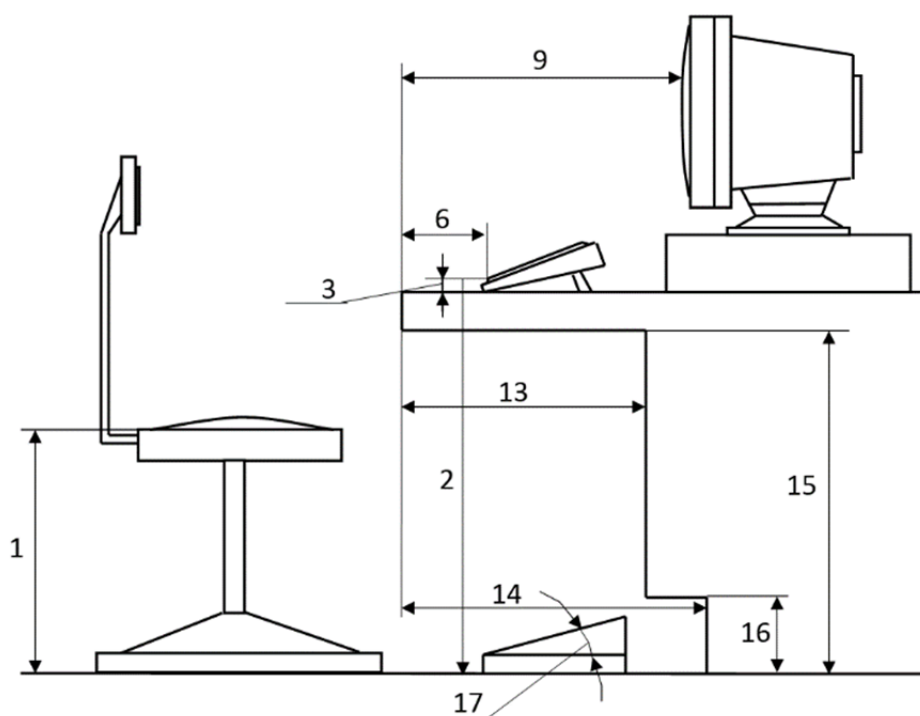


Рисунок 10.1 – Організація робочого місця оператора ПЕОМ

Конструкція робочого столу повинна забезпечувати можливість оптимального розміщення на робочій поверхні обладнання, що використовується, з урахуванням його кількості, розмірів, конструктивних особливостей та характеру роботи, яка виконується. Корисно мати модульне, рухоме робоче місце. Площа столу залежить від всіх необхідних для роботи компонентів, що розміщуються, та повинна допускати можливість вільного переміщення пристроїв. Поверхня столу має бути матовою з малим відбиттям та теплоізолюючою.

Робоче крісло забезпечує підтримання робочої пози у положенні сидючи, і чим триваліше це положення протягом робочого дня, тим жорсткішими мають бути вимоги до створення зручних та правильних робочих сидінь.

Існує цілий ряд публікацій щодо конструювання різних типів робочих крісел. Незважаючи на розбіжність думок дослідників у визначенні деяких параметрів, виділяють загальні рекомендації конструювання крісла: необхідність регулювання найбільш важливих його елементів – висоти сидіння, висоти спинки сидіння та кута нахилу спинки. Причому процес регулювання має бути нескладним. Не слід надмірно збільшувати кількість регульованих параметрів крісла, оскільки це позначатиметься на його стійкості. Для надання більшої стійкості та попередження перекидання при відхиленні тіла на спинку крісла у багатьох європейських країнах використовують стільці на п'яти ніжках.

Встановлення правильної висоти сидіння є першочерговим завданням під час організації робочого місця. Цей параметр визначає інші просторові параметри – висоту положення екрана, клавіатури, поверхні для записів тощо. Висота поверхні сидіння визначається висотою підколінної ямки над підлогою, вимірною у положенні сидючи при куті згинання коліна 90° . Висоту сидіння необхідно регулювати.

Конструкція робочого стільця (крісла) повинна забезпечувати підтримання раціональної робочої пози під час виконання основних виробничих операцій, створювати умови для зміни пози. З метою попередження втоми необхідно забезпечити зниження статичного напруження м'язів шийно-плечової ділянки та спини.

Тип робочого стільця повинен обиратись залежно від характеру та тривалості роботи. Він має бути підйомно-поворотним і регулюватися по висоті та кутах нахилу сидіння і спинки, а також відстані спинки від переднього краю сидіння. Регулювання кожного параметра має бути незалежним і мати надійну фіксацію. Всі важелі та ручки пристосування (для регулювання) мають бути зручними в управлінні.

Висота поверхні сидіння повинна регулюватись у межах 400 – 550 мм. Ширина та глибина його поверхні має бути не менше як 400 мм. Поверхня сидіння має бути плоскою, передні краї – закругленими. Сидіння та спинка крісла мають бути напівм'якими, з неслизьким, таким, що не електризується та повітропроникним покриттям, матеріал якого забезпечує можливість легкого очищення від забруднення. Слід передбачити можливість зміни кута нахилу поверхні сидіння у межах від 15° уперед та 5° назад.

Опорна поверхня спинки стільця повинна мати висоту 280 – 320 мм, ширину – не менше як 380 мм та радіус кривизни горизонтальної площини – 400 мм. Кут нахилу спинки у вертикальній площині повинен регулюватися у межах (- 30°) – (+ 30°) від вертикального положення. Відстань спинки від переднього краю сидіння повинна регулюватися у межах 260 – 400 мм.

З метою зниження статичного напруження м'язів рук доцільно використовувати стаціонарні або зйомні підлокітники довжиною не менше як 250 мм, шириною у межах 50–70 мм, що мають регулюватися по висоті над сидінням у межах 200–260 мм та регулюватися по параметру внутрішньої відстані між підлокітниками у межах 350–500 мм. В окремих випадках підлокітники доцільно виконувати у вигляді складового елемента робочого столу.

Зручність переміщень у просторі робочої зони, зумовлених характером виробничої діяльності, забезпечується за рахунок спеціальних коліщаток на ніжках стільця (звичайних або гальмівних) або шляхом ковзання по поверхні підлоги, що залежить від матеріалу її покриття.

Робоче місце має бути обладнане стійкою підставкою для ніг, параметри якої просто регулюються. Вона має бути розташована по всій ширині ділянки, що відводиться для ніг. Поверхня підставки має бути рифленою, а по передньому краю мати бортик висотою 10 мм.

Робоче місце оператора обладнане легко переміщуваним пюпітром для розташування на ньому документів. Пюпітр має бути розміщений на одному рівні з екраном та віддалений від очей користувача приблизно на таку ж відстань (припустима розбіжність цих відстаней не більше як 100 мм). Місце установки

пюпітра має бути обрано таким чином, щоб він не вібрував. Пюпітр має бути стійким, щоб можна було робити короткі записи від руки (підкреслення, невеликі виправлення).

Величина площини пюпітра має бути не меншою за розміри найбільшого з джерел інформації, що застосовуються користувачем. При необхідності перегортання оригіналу обидві його сторони повинні розташовуватися на підставці. Технічна документація повинна кріпитися за допомогою спеціальних зажимів. Поверхня пюпітра має бути матовою, щоб навіть при малих розмірах документа не було відбиття світла.

Пюпітр повинен мати лінійку, що легко пересувається по рядках, прозору та зручну для використання. Окрім того, її пересування не повинно викликати сковзання документа.

10.1.2 Заходи по забезпеченню електробезпеки

При несправності електрообладнання та при ремонтних роботах приладів у приміщенні людину може вразити електричний струм, тому на більшості промислових підприємств, в адміністративно-побутових приміщеннях (корпусах) і в житловому секторі використовується чотири провідна трифазна електромережа з заземленим нульовим проводом.

Якщо мережа чотири-провідна трифазна, то величина напруги такої мережі позначається 380х220 В (фазна напруга (фаза – "0") – 220 В, а між-фазна лінійна (фаза – фаза) – 380 В).

Групи технічних рішень щодо запобігання електротравмам:

1) технічні рішення із запобігання електротравм від контакту з нормально струмоведучими елементами електроустаткування – проектом передбачені захисні елементи корпусів електрообладнання для запобігання контакту персоналу з нормально струмоведучими елементами або ж для зменшення тяжкості наслідків при такому контакті;

2) технічні рішення щодо запобігання електротравмам при переході напруги на нормально не струмовідні елементи електроустаткування – необхідно

застосовувати для однофазних споживачів електричної енергії напругою 220 В нульовий захисний провідник;

3) електрозахисні засоби.

Відповідно з ГОСТ 12.1.013-78 умови роботи у приміщенні без підвищеної небезпеки: підлога дерев'яна, суха, вологість не підвищена тощо.

ВИСНОВКИ

У роботі обґрунтована та розроблена система векторного керування електроприводом листоправильної машини, зі зміною статичного моменту навантаження та моменту інерції з метою підвищення енергетичної ефективності листоправильної машини ЛПМ 2300. У ході роботи виконані такі завдання:

– розглянуто класифікацію допоміжних механізмів прокатних станів, одним з яких є листоправильна машина;

– проаналізовано призначення, кінематичні схеми і технічні характеристики листоправильних машин ЛПМ 2300;

– розглянуті загальні вимоги до електроприводу листоправильних машин і висунуті вимоги до системи керування електроприводом листоправильної машини ЛПМ 2300;

– проведені електромеханічні розрахунки і вибрано двигуни K21F315L4 для приведення в рух листоправильної машини;

– побудована навантажувальна діаграма роботи приводу листоправильної машини;

– визначені параметри схеми заміщення асинхронного двигуна і побудована його статична характеристика;

– розраховані динамічні параметри двигуна;

– проаналізовано роботу асинхронного двигуна в динамічних режимах на базі моделі в нерухомій щодо статора системі координат ($\alpha - \beta$);

– проаналізовано роботу асинхронного двигуна в динамічних режимах на базі моделі системи координат ($d - q$), яка обертається з частотою обертання ротора;

- проведено математичне моделювання асинхронного двигуна в системі координат (d – q) з урахуванням жорсткості ексцентричного валу;
- проаналізовані технічні характеристики електрообладнання машини, частотного перетворювача Sinamics і схеми його підключення;
- виконано математичний опис електропривода з векторною системою управління в системі координат (d – q);
- побудована функціональна і структурна схеми електроприводу з векторною системою управління в системі координат (d – q) і виконана настройка її контурів регулювання;
- розраховані коефіцієнти регуляторів і проведено моделювання електромеханічної системи з векторним керуванням при постійному значенні потокозчеплення ротора.

У роботі також розглянуті економічні питання та питання з охорони праці.

ЛІТЕРАТУРА

1. Півняк Г.Г. Автоматизований електропривод у прокатному виробництві / Г.Г. Півняк, О.С. Бешта, М.П. Фількін. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2008. – 224 с.
2. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для вузов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.
3. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. Белов, А.Д. Новиков. – М.: Академия, 2007. – 576 с.
4. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1./Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 388 с.
5. Матвійчук В.А., Стаднік М.І., Рубаненко О.О. Електропривод виробничих машин і механізмів. Навчальний посібник з виконання курсової роботи. – Вінниця: ВНАУ, 2016. – с.

6. Г.М. Калетнік, С.Т. Олійнічук, О.П. Скорук, О.В. Климчук, В.І. Яцковський, Д.М. Токарчук, І.А. Здор Альтернативна енергетика України: особливості функціонування і перспективи розвитку: Колективна монографія / [за ред. проф. Г.М. Калетніка]. – Вінниця: «Едельвейс і К», 2012. – 250 с.
7. Ярошенко Л.В. Лабораторний практикум з електропривода та електрообладнання: Навчальний посібник. – Вінниця: РВВ ВНАУ, 2010. – 192 с.
8. Листоправильные машины – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.stanki-snab.ru/listopravilnaya-mashina>
9. Листоправильная машина – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.deka-stanki.ru/stati/listopravilnaja-mashina/>
10. Листоправильная машина – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://stanokprom.ru/listopravilnaya-mashina>
11. Листоправильная машина – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://acl-russia.ru/katalog_produkcii/acl/listopravilnaya_mashina_acl/
12. Листоправильные машины – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://kpo-ural.ru/atalog/rezhuschee/mashiny/>
13. Есаков В.П. Электрооборудования и электропривод промышленных установок / В.П. Есаков. – М.: Высшая школа, 1981. – 248 с.
14. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – М.: Энергия, 1978. – 832 с.
15. Справочник по электрическим машинам / Подобщ. ред. Копилова И. П., Клокова В. К. Т.1.2. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
16. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. – Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. – 298 с.
17. Усольцев А. А. Векторное управление асинхронными двигателями / А. А. Усольцев. – С-П.: ГИТМО, 2002.
18. Півняк Г. Г. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтно-імпульсною модуляцією / Г. Г. Півняк, О. В. Волков. – Дніпропетровськ, НГУ, 2006. – 470 с.

19. Козярчук А.Е. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов / А.Е. Козярчук. – СПб: Санкт-Петербургская электротехническая компания, 2002. – 88 с.
20. Фираго Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
21. Асинхронные электродвигатели – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electronpo.ru/>
22. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – Москва: АСАДЕМА, 2004. – 202 с.
23. Терехов В. М. Системы управления электроприводов : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. М. терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. – 3-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 304 с.
24. Задорожний Н.А. Элементы теории электромеханического взаимодействия в двухмассовых системах электропривода с упругими механическими связями: Учеб. пособие по дисциплине «Теория электропривода» для студентов специальности «Электромеханические системы автоматизации и электропривод» дневной формы обучения. Ч. 2. – Краматорск: ДГМА, 2007. – 148с.
25. Sinamics модуль торможения – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://siemens71.ru/new/cat.php?fn=10041006_F&art=6SL3300-1AE32-5AA0
26. Siemens sinamics 6SL 3040 0MA00 0AA1 con Flash Card – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ebay.com/itm/Siemens-sinamics-6SL-3040-0MA00-0AA1-con-Flash-Card-/181639278831>
27. Siemens 6SL3055-0AA00-6AA0 DRIVE-CLiQ Hub Module DMC20 6SL 3055-0AA00-6AA0 – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.amazon.de/Siemens-6SL3055-0AA00-6AA0-DRIVE-CLiQ-Module-3055-0AA00-6AA0/dp/B00O9QHPQS>
28. 6ES7972-0BA41-0XA0 – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://siemens-hmi.ru/mlfb/10030053_6ES7972-0BA41-0XA0.php

29. Sitop modular 10. Стабілізир. Блок питания модульної конструкції – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://siemens71.ru/new/cat.php?fn=7500343_F&art=6EP1334-3BA00
30. Sinamics базова панель оператора bor20 – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://siemens71.ru/new/?fn=10045511_F&art=6SL3055-0AA00-4BA0
31. Основи охорони праці. Підручник. / К. Н. Ткачук та ін. За редакцією К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. – К.: Основа, 2003. – 472 с.
32. Кобилянський О. В. Охорона праці в електроенергетиці. Довідник / О.В. Кобилянський. – Вінниця: ВНТУ, 2005. – 165 с.
33. Ткачук К.Я. Справочник по охоране труда на промышленном предприятии / К.Я. Ткачук, Ф.И. Иванчук, Р.С. Сбарно, Л.Г. Степанов. – К.: Техника, 1991. – 285 с.
34. Васильчук М.В. Безпека життєдіяльності. Нормативні документи для навчальних закладів / М.В. Васильчук, упоряд. Ю.В. Бадюк, 2010. – 1024 с.
35. Нові нормативні акти у сфері охорони праці // Довідник спеціаліста з охорони праці. - 2012. - N 3. - С. 4-7; № 4. – С. 6-9.
36. Правила пожежної безпеки в Україні [Текст], 2007. - 216 с.
37. Типове положення про службу пожежної безпеки: затверджено наказом МНС України від 29 вересня 2003 р. № 369 // Охорона праці і пожежна безпека. - 2012. - N 5. - С. 24-27.
38. Сердюк В.Р. Збірник законодавчих та нормативних актів з питань охорони праці / В.Р. Сердюк. – Вінниця : Континент-ПРИМ, 1995. – 231 с.

ДОДАТКИ

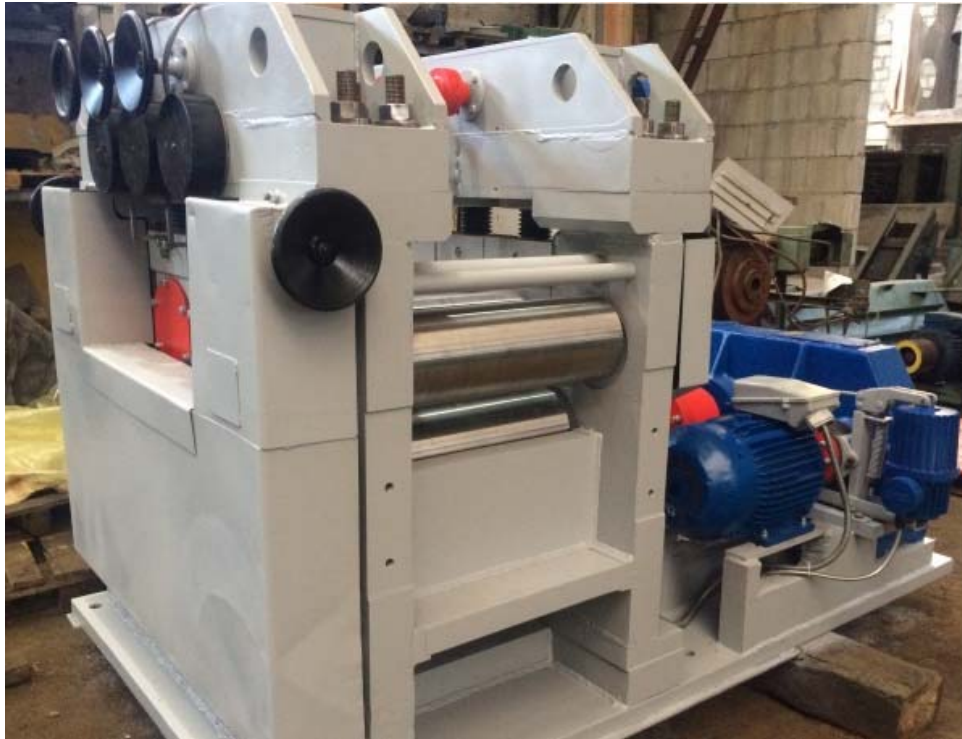
Ілюстративні матеріали



Листоправильна машина ЛВ - 6 (шестивалкова)



Листоправильна машина ЛВ 5 - 1200



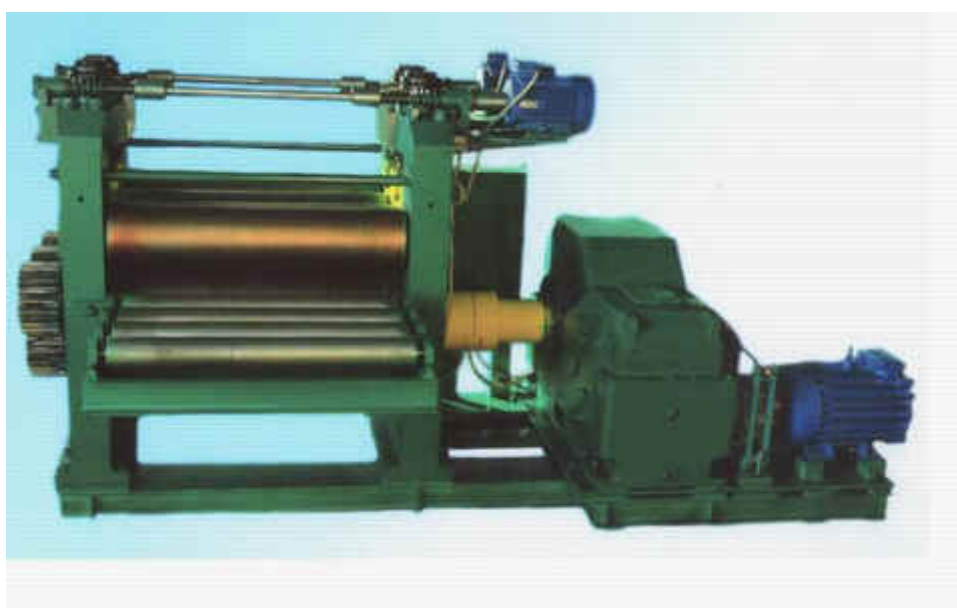
Листопрямильна машина ПС 01



Машина для вирівнювання листів Serie R



Листоправильна машина FLV-0680



Листоправильна машина 30x1600