

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи


магістра

(ступінь вищої освіти)


на тему «Удосконалення та дослідження системи керування електроприводом брикетування залістистих кварцитів»

Виконав: студент 2 курсу, групи 601МЕ  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Проскурня Є. С. 

(прізвище та ініціали)

Керівник Єрмілова Н. В. 

(прізвище та ініціали)

Рецензент Шефер О. В.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2025 рік

## АНОТАЦІЯ

Магістерська робота присвячена удосконаленню та дослідженню системи керування електроприводом брикетування залізистих кварцитів. У роботі детально проаналізовано технологічний процес брикетування, визначено склад установки та роль кожного елемента, особливо електропривода, у забезпеченні стабільності, продуктивності та енергоефективності виробництва.

Проведено розрахунково-конструкторське обґрунтування вибору асинхронного двигуна, частотного перетворювача та механічних компонентів електропривода з урахуванням навантажень і режимів роботи брикет-преса.

Створено математичні та віртуальні моделі електропривода з частотним регулюванням, проведено моделювання динамічних характеристик, розрахунок часу пуску та дослідження стабільності системи під різними навантаженнями.

У дослідницькій частині розроблено функціональну та структурні схеми системи керування, включаючи контур регулювання потокозчеплення ротора, ПІ-регулятор та еталонну модель, а також проведено аналіз ефективності скалярного керування електроприводом.

Отримані результати підтвердили ефективність запропонованих технічних рішень і продемонстрували можливість їх практичного застосування для підвищення продуктивності, надійності та енергоефективності роботи установки брикетування, що створює підґрунтя для подальших досліджень і оптимізації систем автоматичного керування.

**Ключові слова:** електропривод, брикетування, залізисті кварцити, асинхронний двигун, частотний перетворювач, математична модель, система керування, скалярне керування, динамічні характеристики, енергоефективність.

## ABSTRACT

The master's thesis is devoted to the improvement and investigation of the control system of the electric drive for briquetting ferruginous quartzites. The work provides a detailed analysis of the briquetting technological process, identifies the composition of the installation, and examines the role of each component, particularly the electric drive, in ensuring stability, productivity, and energy efficiency of the production process.

A design and calculation justification was carried out for the selection of the asynchronous motor, frequency converter, and mechanical components of the electric drive, taking into account the loads and operating modes of the briquette press. Mathematical and virtual models of the electric drive with frequency control were developed, including simulation of dynamic characteristics, calculation of starting time, and investigation of system stability under various load conditions.

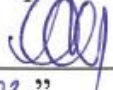
In the experimental part, functional and structural schemes of the control system were developed, including the rotor flux control loop, a PI controller, and a reference model, as well as an analysis of the effectiveness of scalar control of the electric drive. The obtained results confirmed the efficiency of the proposed technical solutions and demonstrated the possibility of their practical application to improve the productivity, reliability, and energy efficiency of the briquetting installation, providing a basis for further research and optimization of automatic control systems.

**Keywords:** electric drive, briquetting, ferruginous quartzites, asynchronous motor, frequency converter, mathematical model, control system, scalar control, dynamic characteristics, energy efficiency.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
 Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та  
 робототехніки  
 Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій  
 Рівень вищої освіти Магістр  
 Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматики,  
 електроніки та телекомунікацій

  
 О.В. Шефер  
 “ 03 ” / “ 09 ” 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**  
 Проскурні Євгенію Станіславовичу

1. Тема проекту (роботи) на тему «Удосконалення та дослідження системи керування електроприводом брикетування залізистих кварцитів»

керівник проекту (роботи) Єрмілова Наталя Василівна, к.т.н., доцент  
 затверджена наказом вищого навчального закладу від “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 року  
 № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 22.12.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Максимальна потужність електроприводу – до 650 кВт; струм навантаження частотного перетворювача – не більше 1200А; час пуску електропривода – до 3 с; час перехідного процесу за моментом – не більше 2,5 с; передбачити крок зміни частоти в межах 5%.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Технологія та опис системи брикетування залізистих кварцитів. Вибір двигуна електропривода брикет-преса та перевірка його на нагрів. Вибір перетворювача частоти. Розрахунок механічної частини електроприводу. Моделювання асинхронного електропривода брикет-преса. Віртуальна модель приводу з частотним перетворювачем. Розроблення та дослідження функціональної схеми електроприводу. Розроблення математичної моделі електроприводу для розв'язки каналів регулювання. Конструювання структурної схеми АД з контуром регулювання потокозчеплення ротора. Структурна схема з ПІ-регулятором і еталонної моделлю. Розроблення математичної моделі асинхронного електроприводу. Впровадження скалярного управління електроприводом брикет-преса. Висновки по роботі.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів): Мета, предмет та об'єкт дослідження. Структурні схеми та моделі дво- та три-масових гнучких систем. Модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в нерухомій системі координат. Графік пуску ЕП з урахуванням

демпфування. Графіки зміни швидкості ротора та електромагнітного моменту. Графіки зміни струму статора та потокощеплення. Віртуальна модель асинхронного електроприводу. Динамічні характеристик під час пуску з навантаженням. Модель контуру регулювання потокощеплення. Діаграми Бode та Найквіста. Структурна схема та модель контуру регулювання струму. Структурна схема та модель з ПІ регулятором. Графік перехідних процесів. Математична модель асинхронного електроприводу. Частотні характеристики електроприводу. Структурна схема та модель системи ПЧ-АД зі скалярним управлінням. Механічні характеристики при частотному регулюванні швидкості. Висновки.

6. Дата видачі завдання 15.09.2025 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Термін	Категорія	Обсяг	
1	Технологія та опис системи брикетування залізистих кварцитів.	07.10.25		15%	Пл. 1
2	Вибір двигуна електропривода брикет-преса та перевірка його на нагрів. Вибір перетворювача частоти.	21.10.25	I	25%	Пл. 2, 3
3	Розрахунок механічної частини електроприводу.	04.11.25		40%	Пл. 4
4	Моделювання асинхронного електропривода брикет-преса. Віртуальна модель приводу з частотним перетворювачем.	11.11.25		50 %	Пл. 5,6
5	Розроблення та дослідження функціональної схеми електроприводу та математичної моделі для розв'язки каналів регулювання.	18.11.25	II	60%	Пл. 7
6	Конструювання структурної схеми АД з контуром регулювання потокощеплення ротора. Структурна схема з ПІ-регулятором і еталонної моделлю. Розроблення математичної моделі асинхронного електроприводу.	25.11.25		70%	Пл. 8,9
7	Впровадження скалярного управління електроприводом брикет-преса.	09.12.25		90%	Пл. 10,11
8	Оформлення пояснювальної записки.	22.12.25	III	100%	Пл. 12-14

Магістрант

  
(підпис)

Проскурня Є. С.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Єрмілова Н. В.  
(прізвище та ініціали)

( підпис )

( прізвище та ініціали )

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Єрмілова Н. В.  
( підпис ) ( прізвище та ініціали )

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
<b>1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....</b>	<b>8</b>
1.1 Опис системи брикетування залізистих кварцитів.....	8
1.1.1 Склад установки брикетування залізистих кварцитів.....	8
1.1.2 Технологія брикетування залізистих кварцитів.....	13
1.2 Висновки за розділом та постановка завдань на магістерську роботу.....	15
<b>2 РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....</b>	<b>16</b>
2.1 Вибір двигуна електропривода брикет-преса залізистих кварцитів.....	16
2.1.1 Вибір двигуна.....	16
2.1.2 Перевірка двигуна на нагрів.....	18
2.2 Вибір перетворювача частоти.....	19
2.3 Розрахунок механічної частини електроприводу.....	21
2.4 Моделювання асинхронного електропривода брикет-преса.....	35
2.4.1 Модель асинхронного двигуна в нерухомій системі координат.....	35
2.4.2 Розрахунок часу пуску електроприводу.....	46
2.4.3 Віртуальна модель приводу з частотним перетворювачем.....	49
2.5 Висновки за розділом.....	53
<b>3 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА.....</b>	<b>54</b>
3.1 Розроблення та дослідження функціональної схеми електроприводу.....	54
3.1.1 Математична модель електроприводу для розв'язки каналів регулювання.....	59
3.1.2 Структурна схема АД з контуром регулювання потокозчеплення ротора.....	60
3.1.3 Структурна схема з ПІ-регулятором і еталонної моделлю.....	72
3.1.4 Математична модель асинхронного електроприводу.....	76
3.2 Скалярне управління електроприводом брикет-преса.....	84
3.3 Висновки за розділом.....	92
ВИСНОВКИ.....	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	95
ДОДАТКИ.....	97

## ВСТУП

Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат (ПГЗК) був побудований з метою збільшення сировинної бази чорної металургії на мінеральних ресурсах Кременчуцької магнітної аномалії (КМА).

Відмінною особливістю технології переробки залізистих кварцитів на комбінаті є метод повного самоподрібнення руди. При цьому виключається традиційне середнє дроблення руди, що надходить на збагачення. Технологія збагачення залізистих кварцитів полягає в тристадійному подрібненні в млинах, класифікації та п'ятистадійного збагаченні на магнітних сепараторах. Кінцева крупність подрібненого продукту становить 44 мкм. Технологічний цикл переробки залізистих кварцитів на комбінаті закінчується виробництвом окатишів або горячобрикетованого заліза. Виробництво окатишів включає в себе процеси шіхтопідготовки, огрудкування, контрольного грохочення сирих окатишів, випалювання в чотирьох випалювальних машинах ОК-306 і сортування обпалених окатишів. При виробництві горячобрикетованого заліза обпалені окатиші додатково обробляються (металізуються) в шахтній печі.

Споживачами продукції комбінату є всі найбільші в країні підприємства. Більше 85% своєї продукції "Полтавський ГЗК" експортує в Австрію, Румунію, Польщу, Болгарію, Чехію, Словаччину, Сербію і Чорногорію, Італію та інші країни. Вітчизняний і зарубіжний досвід свідчить про те, що за своїми якісними показниками залізородна продукція комбінату є однією з кращих в Європі.

**Метою магістерської роботи** є підвищення ефективності роботи електропривода установки брикетування залізистих кварцитів шляхом удосконалення системи керування. Для досягнення цієї мети передбачається розробка, моделювання та дослідження модернізованої системи керування, яка забезпечує підвищення надійності, енергоефективності та точності регулювання технологічного процесу, з урахуванням специфіки переробки залізистих кварцитів.

**Об'єктом дослідження** є процес керування електроприводом механізму брикетування залізистих кварцитів.

**Предмет дослідження** - система автоматичного керування ЕП у технологічному процесі брикетування залізистих кварцитів, алгоритми функціонування та характеристики.

## 4 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 4.1 Опис системи брикетування залістистих кварцитів

#### 4.1.2 Склад установки брикетування залістистих кварцитів

Установка з виробництва брикетів із гарячих металізованих окатишів (рис. 1.1) складається з наступних систем:

- а) системи завантаження металізованих окатишів;
- б) системи брикетувального преса зі шнековим живильником;
- в) системи поділу брикетів;
- г) системи охолодження брикетів.

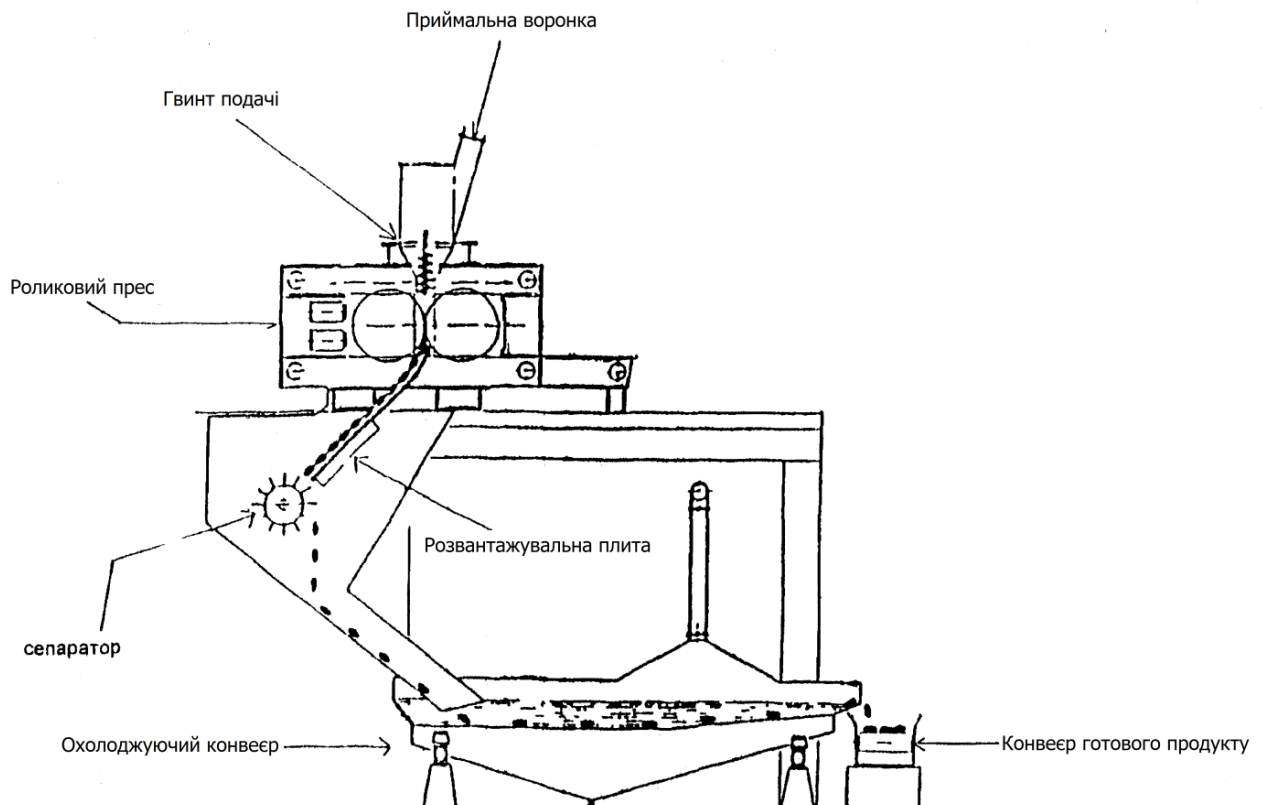


Рисунок 1.1 - Установка з виробництва брикетів

*Система завантаження металізованих окатишів*

Металізовані окатиші з реактора через барабанний дозатор розвантажуються в герметичний бункер металізованих окатишів. Потім, надходять в атмосферно-проміжний бункер. Далі, металізовані окатиші проходять через бункер - розподільник, де розподіляються в систему брикетування.

#### *Система брикетувального преса зі шнековим живильником*

Завантаження преса здійснюється шнековим живильником, призначеним для подачі необхідної кількості гарячого металізованого продукту на ділянку пресування для забезпечення, необхідного крутного моменту.

Шнековий живильник приводиться в дію гідродвигуном з регульованою швидкістю. Швидкість регулюється за рахунок збільшення або зменшення подачі потоку масла на гідродвигун. Вал шнекового живильника розташований вертикально в маленькій завантажувальній воронці. Вал верхнім кінцем вставлений в порожнистий вал гідродвигуна, розташованого над завантажувальною воронкою і закріплений за допомогою усадочного диска.

Верхня частина вала має водяне охолодження. Вхід і вихід води з'єднуються ротаційним з'єднанням (муфтою), розташованим на верхньому кінці вала.

Завантажувальна воронка встановлена на верхніх елементах конструкції преса. Впускна труба розташована під кутом  $20,5^{\circ}$  від вертикальної площини. Воронка і впускна труба ізолювані. На воронці є ізолюваний інспекційний люк.

Перехідний конус шнекового живильника кріпиться до конструкції преса під завантажувальною лійкою. Воронка і перехідний конус шнекового живильника з'єднані шліцьовим з'єднанням, призначеним для компенсації теплового розширення. Корпус шнекового живильника має водяне охолодження.

#### *Склад брикетувального пресу:*

##### *Рама брикетного преса*

Рама брикетного преса являє собою сталеву конструкцію. Вона складається з двох бічних половин рами з верхньої та нижньої траверсами, а

також поперечними рухомими траверсами. Верхня і нижня траверси кожної половини рами з'єднуються центральними елементами, одночасно служать для розміщення дистанційних пластин. Ці дистанційні пластини, звані прокладками, дозволяють точно встановлювати розчин валків. На кінцях верхня і нижня поперечки з'єднуються траверсами з шарнірними головками і знімними болтами. Отвори прямокутної рами бічних половин мають оброблену поверхню, яка служить опорною поверхнею для кожухів підшипників валків. У рамі розміщуються також циліндричні блоки напірної гідравлічної системи для плаваючих валків.

### Валки брикетного преса

Брикетний прес оснащений комплектом з двох валків, плаваючого валка і нерухомого валка. Привід валків брикет-преса здійснюється за допомогою електродвигуна з регульованою швидкістю. Двигун з'єднується з редуктором, який з'єднаний з валками брикет-преса.

Валки виготовлені з кованої сталі і мають цільні опорні підшипники. Корпус кожного валка має литі сегменти із зносостійкої і жаростійкої сталі. Сегменти встановлені навколо по корпусу валка і закріплені двома затискними кільцями.

Валки встановлені на підшипниках що само поєднуються з консистентним мастилом і знімними муфтами. На боці зчеплення підшипники нерухомі, а на вільній стороні рухливі. Підшипники валків заповнені мастилом і автоматично змащуються в процесі роботи брикет-преса. Корпуси підшипників нерухомого валка встановлені таким чином, що вони не можуть рухатися, на відміну від корпусу підшипників плаваючого валка, які можуть переміщатися перпендикулярно від мінімальної відстані 4 мм, коли валки в закритому положенні і до 50 мм, коли валки у відкритому положенні. Рух здійснюється за рахунок гідравлічного поршня, розташованого перпендикулярно валу плаваючого валка на рамі корпусів підшипників.

Як вал валків, так і затискні кільця мають водяне охолодження. В положому штоку валків проведена внутрішня труба, закріплена за допомогою поворотної головки. Вприскування охолоджуючої води проводиться на стороні рухомого підшипника (вільний кінець). Вода проходить в середині труби до боку нерухомого підшипника, охолоджуюча вода повертається між порожнистим штоком і зовні внутрішньої охолоджуючої труби до центру валка, де зовні охолоджуючої труби розташована кільцева пробка. Ця пробка направляє потік води до затискного кільця на стороні зчеплення, звідси вода прямує до затискного кільця на вільній стороні і потім охолоджуюча вода проходить до валу на протилежній стороні, виходячи через другу половину похилого штока валка в зворотній колектор охолоджуючої води.

#### Гідравлічна система плаваючого валка

Брикетний прес має гідравлічну систему по обидва боки корпусів підшипників плаваючого валка і нерухомого валка.

Робота гідравлічної системи полягає в забезпеченні якомога більш рівномірного розчину між обома валками. Дія шнекового живильника в момент, коли він заштовхує гарячі металізовані окатиші в зону пресування, має тенденцію розділити обтискні валки, але гідравлічна система утримує валки в положенні, протилежному зусиллю шнекового живильника.

#### Системи розділення брикетів

Роздільник брикетів складається з ротора, виконаного з кованої сталі з нагвинченими молотами, валом, підтримуваними опорами, з самовирівнювальними підшипниками валка, і опорної конструкції для установки під пресом на окремій платформі. Молоти, виконані з жаростійкої та зносостійкої сталі з зносостійким наплавленням. Для захисту підшипників від зайвого перегріву вал ротора має підведення охолоджувальної води.

Привід ротора здійснюється гідродвигунів з регульованою швидкістю, оснащеним індикацією швидкості.

#### Розвантажувальний лоток

Розвантажувальний лоток валків розташований між валковим пресом і роздільником стрічки. Його призначення - направляти брикетну стрічку до роздільника стрічки. Розвантажувальний лоток валків входить в корпус роздільника стрічки. Розвантажувальний лоток і плита з наконечником мають жароміцну і зносостійку обшивку. На кінці розвантажувального лотка розташована плита з наконечником. Обидва кінці розвантажувального лотка і плита з наконечником мають додаткове зносостійке наплавлення.

### Притискний пристрій

Притискний пристрій (притиск) повинно запобігати вискакування брикетної стрічки з розвантажувального лотка в момент, коли по ній б'є молот роздільника стрічки. Притиск приводиться в дію за допомогою пневмоциліндра. Для підйому притиску, на циліндр подається тиск через направляючий клапан, що порушується електромагнітним клапаном, для опускання, тиск на циліндрі скидається за рахунок вентиляції повітря в атмосферу таким чином, що притиск під власною вагою опуститься в нормальне робоче положення.

### *Система охолодження брикетів*

Система брикетувальних машин має систему водяного охолодження, що подає воду для охолодження машин на таке обладнання:

- плаваючий валок;
- нерухомий валок;
- головні підшипники;
- бічні плити;
- опорна плита приводу шнекового живильника;
- вал шнекового живильника;
- Корпус шнекового живильника;
- теплообмінник холодильника масла головного редуктора;
- вал роздільника;
- гідроагрегати шнекового живильника і роздільника.

Система охолодження брикетування через трубу центрального розподілу з'єднується з розподільником охолоджуючої води. З розподільника охолоджуючої води вода через труби та гнучкі шланги подається індивідуальним споживачам.

У всіх подаючих трубопроводах є запірний клапан, який може повністю відкриватися і пропускати потік охолоджувальної води.

#### *Байпас системи брикетування*

Байпасна лінія системи брикетування призначена для обводу брикетувальних машин і зазвичай використовується під час пуску установки, коли продукт ще не досяг відповідних умов по температурі і металізації, або в разі аварії на одній з брикетувальних машин. З бункера-розподільника, в який надходять гарячі DRI з проміжного бункера, матеріал може подаватися або в брикетувальні машини, або на байпасну лінію.

### **4.1.3 Технологія брикетування залістистих кварцитів**

Процес виробництва брикетного заліза з гарячого металізованого заліза в промислових масштабах розпочато недавно.

У зв'язку з високою пористістю і низькою механічною міцністю, відновлені залізородні окатиші мають тенденцію до вторинного окислювання і поділу на дрібні частинки при транспортуванні та зберіганні; це призводить до таких проблем як зниження продуктивності, небажана виробнича середовище і тепловиділення при вторинному окисленні.

Є два основних поняття, пов'язаних з механікою, застосовуваної в системі брикетування.

1. Ефект стиснення менш щільного і високо гранульованого матеріалу (DRI) за допомогою двох валків, що мають порожнини, які обертаються і натискаючи один на одного за допомогою шнекового живильника, вдавлюють

матеріал у порожнини; матеріал, який потрапив в них, змушений зменшувати свій об'єм.

Після стиснення гранульованого матеріалу простір в його внутрішній структурі і між його гранулами мінімальні. Складові металеві частинки зв'язалися, утворюючи більш щільний твердий матеріал, що має профіль, визначений порожнинами валків. Температура спресованого матеріалу дуже важлива, так як стиснення відбувається більш ефективно, коли матеріал м'який. Таким чином, у випадку з металізованим залізом, його температура повинна бути не менше  $600^{\circ}\text{C}$ , чим м'якше матеріал, тим краще зв'язування і вище щільність.

2.Ефект множення зусилля в гідравлічній системі пропорційно відповідним площам поршня, що подається під дією масла при певному тиску.

В системі брикетування зусилля, за допомогою якого валки брикетувальної машини тиснуть один на одного, передається маслом при високому тиску, а шнековий живильник приводиться в дію від гідродвигуна.

Система розвантаження реактора призначена для відводу гарячого металізованої заліза з проміжного бункера в бункер-розподільник, звідки матеріал подається на чотири брикетувальні машини або на аварійну байпасну лінію, яка по черзі передає на барабанний дозатор, розвантажуючи на конвеєри охолодження.

При нормальному режимі роботи проміжний бункер забезпечує нормальну подачу гарячого металізованого заліза в бункер-розподільник. Матеріал проходить через запірний клапан кожної машини і надходить у верхню частину брикетувальної машини. Двома шнековими живильниками матеріал подається на ділянку пресування, на якому формується брикетна смуга. Матеріал надсилається на сегменти валкового преса за допомогою бічних плит і завантажувальної воронки, призначеної для запобігання попадання матеріалу повз валків машини.

Брикетна стрічка виходить з валків по діагоналі через розвантажувальний жолоб валків, що направляє брикетну стрічку на роздільник стрічки або роздільник брикетів, на якому брикетна стрічка ділиться на окремі брикети.

Після поділу брикети через сполучний канал проходять на охолоджуючий конвеєр, де вони охолоджуються за рахунок прямого контакту з охолоджуючою водою технологічного процесу. Гаряча охолоджуюча вода технологічного процесу через перелив повертається в зумпф, звідки насосами вона відкачується назад у відповідну систему. Пар, що утворився при прямому контакті охолоджуючої води технологічного процесу з гарячими брикетами, скидається в атмосферу природною тягою. Після охолодження брикетів, вони розвантажуються в систему стрічкових конвеєрів, за якими матеріал буде транспортуватися на склад відкритого зберігання.

## **1.5 Висновки за розділом та постановка завдань на магістерську роботу**

Розглянуто технологічні особливості процесу брикетування залізистих кварцитів та проведено аналіз структури і принципу дії існуючої системи електропривода. Встановлено, що процес брикетування є важливою технологічною операцією, яка забезпечує переробку дрібнодисперсних відходів збагачення залізистих кварцитів у брикети, придатні для подальшого використання у металургійному виробництві. Детально охарактеризовано основні етапи процесу – підготовку сировини, змішування, пресування та сушіння готових виробів.

Визначено роль електропривода як ключової ланки в забезпеченні стабільності технологічного процесу та енергоефективності роботи обладнання.

Виявлено, що існуючі системи керування електроприводом установки мають певні недоліки: недостатню точність регулювання, обмежені можливості автоматизації та низьку адаптивність до змін технологічних умов. Це зумовлює необхідність подальшого удосконалення системи керування та вирішення

наступних завдань, з метою підвищення продуктивності, надійності та зниження енерговитрат:

- Вибрати та обґрунтувати електродвигун привода брикет-преса;
- Обґрунтувати та вибрати перетворювач частоти;
- Розрахувати механічну частину електропривода;
- Виконати моделювання асинхронного електропривода брикет-преса;
- Виконати синтез структурних схем;
- Розробити скалярне управління електродвигуном брикет-преса;

## 2 РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

### 2.1 Вибір двигуна електропривода брикет-преса залізистих кварцитів

#### 2.1.1 Вибір двигуна

#### 2.1.2 Розрахунок моменту стиснення

Момент стиснення окатишів:

$$M_c = 2 \cdot P \cdot a, \quad (2.1)$$

де  $P = 2640 \text{ кН}$  - зусилля стискування, чинне на один валок  
«Плече» зусилля стиснення:

$$a = \psi \cdot L, \quad (2.2)$$

де  $\psi = 0.5$  - коефіцієнт «плеча»;

$L$  - довжина осередку деформації, м;

$$a = 0,5 \cdot 0,12 = 0,06 (\text{м});$$

$$M_c = 2 \cdot 2640 \cdot 0,06 = 316,8 (\text{кН} \cdot \text{м}).$$

#### 2.1.2.2 Розрахунок потужності двигуна

Визначаємо момент необхідний для подолання контактних сил тертя:

$$M_{mp} = M_{mp1} + M_{mp2} + M_{mp3} + M_{mp4}, \quad (2.3)$$

де  $M_{mp1}$  – момент сили тертя в підшипниках валків;

$M_{mp2}$  – момент сили тертя в шпинделях і муфтах;

$M_{mp3}$  – момент сили тертя в шестеренній кліті;

$M_{mp4}$  – момент сили тертя в силовому редукторі;

$$M_{mp1} = P \cdot d_{ш} \cdot \mu_n, \quad (2.4)$$

де  $d_{ш}$  – діаметр «втулки - цапфи» підшипників валків, м;

$\mu_n = (0.003 \dots 0.005)$  - коефіцієнт тертя для підшипників;

$$M_{mp1} = 2640 \cdot 0,22 \cdot 0,004 = 2,32 \text{ (кНм)}.$$

При виконанні технологічних розрахунків досить точною формулою є:

$$M_{mp2,3,4} = 0,2 \cdot M_c; \quad (2.5)$$

$$M_{mp2,3,4} = 0,2 \cdot 316,8 = 63,36 \text{ (кНм)};$$

$$M_{mp} = 2,32 + 63,36 = 65,83 \text{ (кНм)}.$$

Визначаємо момент двигуна:

$$M_{\text{дв}} = M_c + M_{mp} M_n, \quad (2.6)$$

де  $M_n$  – момент, створюваний силами натягу стисливих окатишів; між кліткові натяги враховані в зусиллі стиснення.

Тому:

$$M_{\text{дв}} = M_c + M_{mp} = 316,8 + 65,83 = 382,48 \text{ (кНм)}.$$

«Приводимо» моменти до валу двигуна:

$$M'_{\text{дв}} = M_{\text{дв}} / i; \quad (2.7)$$

$$M'_{\text{дв}} = 382,48 / 106,71 = 3,58 \text{ (кНм)}.$$

Швидкість двигуна визначається виходячи з:

$$n_{\text{дв}} = \frac{60 \cdot v \cdot i}{\pi \cdot D_k}, \quad (2.8)$$

де  $v$  - швидкість протяжки, м / с;

$D_k$  - діаметр обтиснутого валка.

$$n_{\text{дв}} = \frac{60 \cdot 0,68 \cdot 106,71}{3,14 \cdot 1,01} = 1373 \text{ (об / хв)}.$$

Потужність приводного двигуна:

$$P_{\text{дв}} = \frac{\kappa_3 \cdot M'_{\text{дв}} \cdot \pi \cdot n_{\text{дв}}}{30}, \quad (2.9)$$

де  $\kappa_3$  – коефіцієнт запасу.

$$P_{\text{дв}} = \frac{1,2 \cdot 3,58 \cdot 3,14 \cdot 1373}{30} = 618,03 (\text{кВт}).$$

За отриманими даними вибираємо приводний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу 1LA8 405-4AB60 фірми Siemens з наступними паспортними даними:

Таблиця 2.1

Параметр	Величина
Тип двигуна	1LA8 405-4AB60
Номінальна потужність $P_H$ , кВт	630
Номінальна швидкість $n_H$ , об/хв	1492
Синхронна швидкість $n_0$ , об/хв	1500
Число полюсів $P$	4
ККД $\eta$ , %	97
Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$	0,88
Номінальний момент $M_H$ , Н·м	4030
Пусковий момент $M_P$	$1,9 M_H$
Максимальний момент $M_{MAX}$	$2,7 M_H$
Пусковий струм $I_P$	$6,8 I_H$
Момент інерції $J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>	14
Маса $m$ , кг	3000

### 2.1.3 Перевірка двигуна на нагрів

В даному випадку двигун працює в режимі тривалого навантаження з постійним моментом на валу. При цьому режимі температура досягає сталого

значення і двигун при цій температурі залишається під навантаженням як завгодно тривалий час.

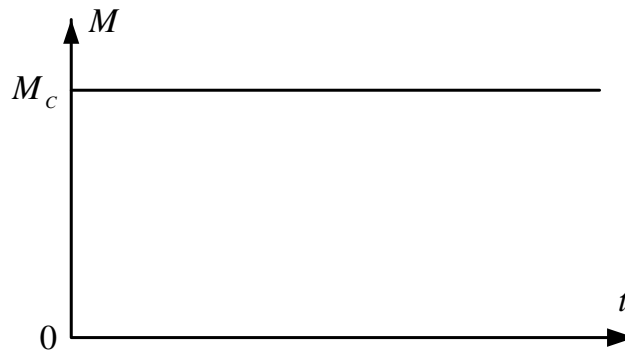


Рисунок 2.1- Навантажувальна діаграма механізму

При незмінному статичному навантаженні повинні виконуватися умови:

$$M_c \leq M_{ном}; \quad (2.10)$$

$$P_c \leq P_{ном}, \quad (2.11)$$

де  $M_c, P_c$  – момент і потужність статичного навантаження;

$M_{ном}, P_{ном}$  – момент і потужність, що розвиваються двигуном при номінальному режимі S1. [3,190]

$$3580H \cdot m \leq 4030(H \cdot m);$$

$$618,03кВт \leq 630(кВт).$$

Умови перевірки виконуються, отже, двигун обраний правильно.

## 2.2Вибір перетворювача частоти

При виборі перетворювача частоти повинні враховуватися:

- вид приводу;
- напруга мережі;
- розрахунковий струм  $I_p$  перетворювача.

Розглянутий вид приводу повинен забезпечувати сталість швидкості обертання двигуна відповідно до завдання. При цьому швидкість у різних

випадках може змінюватись в широких межах.

Розрахунковий струм перетворювача визначається наступним чином [2]:

$$I_p = (0,565 + 0,15 \cdot \lambda) \cdot I_{нагр}, \quad (2.12)$$

де  $\lambda$  – кратність максимального моменту двигуна (перевантажувальна здатність) (див. табл. 2.1);

$I_{нагр}$  – номінальний струм двигуна під навантаженням, А.

$$I_p = (0,565 + 0,15 \cdot 2,7) \cdot 615 = 596,55(A).$$

До асинхронного двигуна необхідно підібрати перетворювач частоти з номінальним робочим струмом:

$$I_{Hнч} > I_p \quad (2.13)$$

і номінальним робочим напругою:

$$U_{Hнч} > U_1, \quad (2.14)$$

де  $U_1$  – напруга мережі, В ( $U_1 = 400 В$ ).

Таким чином номінальні параметри перетворювача повинні відповідати таким умовам:

$$I_{Hнч} > 596,55(A);$$

$$U_{Hнч} > 400(B).$$

В якості перетворювача частоти вибираємо перетворювач Simovert Masterdrive VC (серія Vector Control) фірми SIEMENS.

Simovert Masterdrives Vector Control - це перетворювачі частоти з ланкою постійного струму з повністю цифровим керуванням на основі IGBT - транзисторів які, спільно з трифазними асинхронними двигунами фірми Siemens дозволяють створювати надійні, економічні привода для будь-яких галузей промисловості, в тому числі і для гірничо-збагачувального виробництва . Серія перетворювачів Simovert Masterdrives Vector Control складається з модульних, високоефективних компонентів. Комбінуючи ці компоненти можна досягти найбільшої ефективності протікання технологічного процесу.

Таблиця 2.2

Характеристики перетворювача частоти Simovert Masterdrive VC (серія Vector Control) фірми SIEMENS

Параметр	Величина
Перетворювач частоти	6SE7141-3EJ62-3BA0
Номінальна потужність $P_n$ , кВт	710
Номінальна напруга $U_n$ , В	380-480
Номінальний вихідний струм $I_{нв}$ , А	1300
Базовий струм навантаження $I_b$ , А	1183
Струм перевантаження $I_{max}$ , А	1768
Вхідний струм $I_{вх}$ , А	1430
Втрати при 2,5 кГц	20,3
ККД $\eta$ , %	0,96-0,98
Необхідний витрата охолоджуючого повітря, $\frac{m^3}{c}$	1,9
Рівень шуму зі стандартною ступенем захисту IR20/IR00, дБ	85
Габаритні розміри Ш*В*Г	2700*2000*600
Зразкова вага $m$ , кг	1800

### 2.3 Розрахунок механічної частини електроприводу

На рис. 2.2 представлена кінематична схема приводу брикет-преса. Привід складається з електродвигуна, муфти, циліндричного п'ятиступінчастою редуктора і зубчастої напівмуфти.

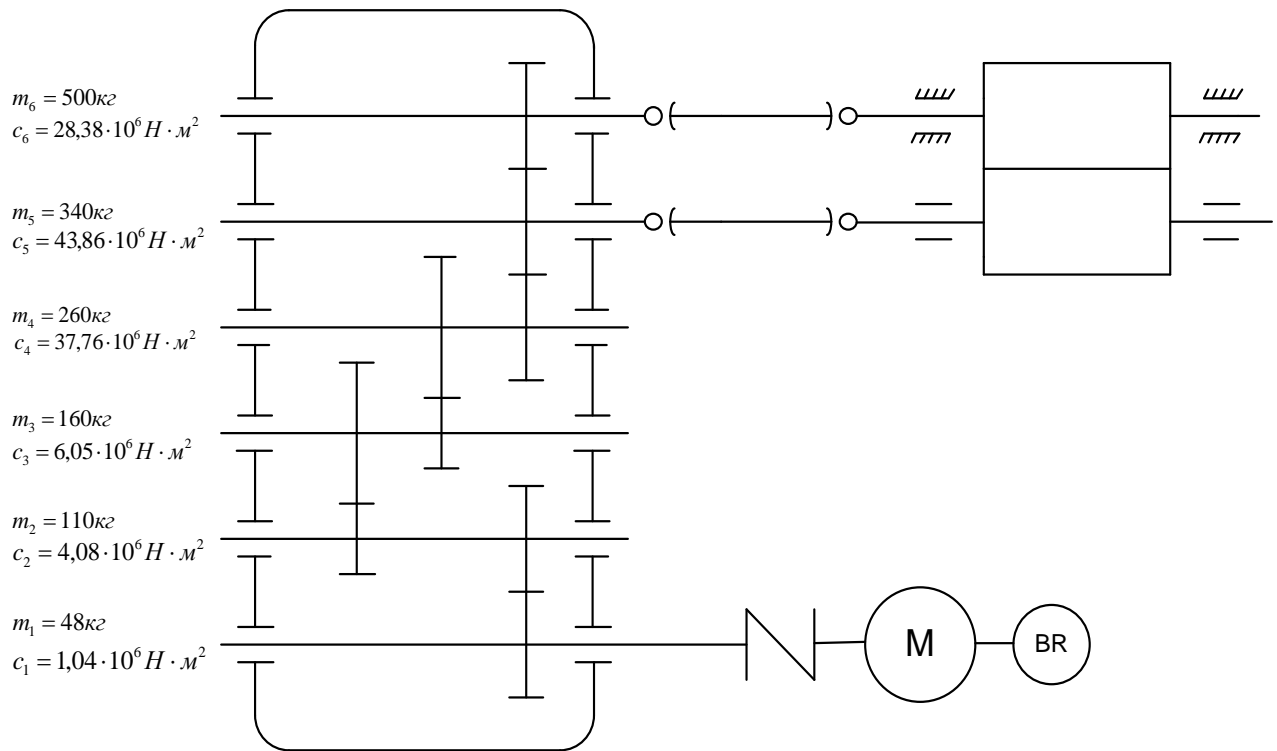


Рисунок 2.2 - Кінематична схема приводу брикет-преса

Таблиця 2.3

## Параметри механічних ланок

Швидкохідний вал:	
маса $m_1$ , кг	48
діаметр $d_1$ , м	0,110
довжина $l_1$ , м	1,1
Другий вал:	
маса $m_2$ , кг	110
діаметр $d_2$ , м	0,145
довжина $l_2$ , м	0,85
Третій вал:	
маса $m_3$ , кг	160
діаметр $d_3$ , м	0,16
довжина $l_3$ , м	0,85

Четвертий вал:	
маса $m_4$ , кг	260
діаметр $d_4$ , м	0,26
довжина $l_4$ , м	0,95
Тихохідний вал:	
маса $m_5$ , кг	340
діаметр $d_5$ , м	0,28
довжина $l_5$ , м	1,1

Продовження таблиці 2.3

Вал механізму:	
маса $m_6$ , кг	500
діаметр $d_6$ , м	0,28
довжина $l_6$ , м	1,7
Передаточне число ступені:	
другий $i_2$	3,633
третій $i_3$	3,278
четвертий $i_4$	3,125
п'ятий $i_5$	2,867
шостий $i_6$	1

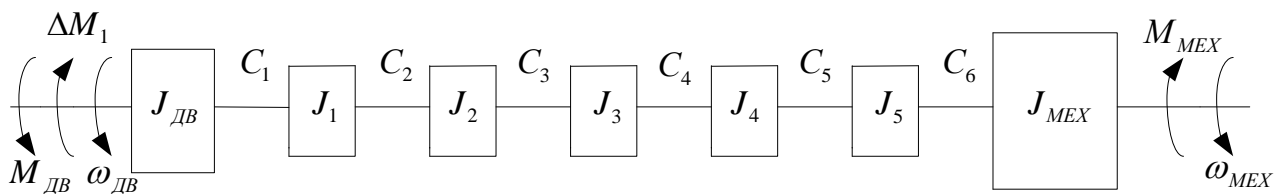


Рисунок 2.3 - Розрахункова схема механічної частини електроприводу

Момент інерції швидкохідного вала:

$$J_1 = \frac{m_1 \cdot d_1^2}{8}; \quad (2.15)$$

$$J_1 = \frac{48 \cdot 0,110^2}{8} = 0,0726 (\text{кг} \cdot \text{м}^2).$$

Момент інерції другого валу:

$$J_2 = \frac{m_2 \cdot d_2^2}{8};$$

$$J_2 = \frac{110 \cdot 0,145^2}{8} = 0,289 (\text{кг} \cdot \text{м}^2).$$

Момент інерції третього валу:

$$J_3 = \frac{m_3 \cdot d_3^2}{8};$$

$$J_3 = \frac{160 \cdot 0,16^2}{8} = 0,512 (\text{кг} \cdot \text{м}^2).$$

Момент інерції четвертого валу:

$$J_4 = \frac{m_4 \cdot d_4^2}{8};$$

$$J_4 = \frac{260 \cdot 0,26^2}{8} = 2,197 (\text{кг} \cdot \text{м}^2).$$

Момент інерції тихохідного валу:

$$J_5 = \frac{m_5 \cdot d_5^2}{8};$$

$$J_5 = \frac{340 \cdot 0,28^2}{8} = 3,332 (\text{кг} \cdot \text{м}^2).$$

Момент інерції другого валу приведений до валу двигуна:

$$J_{2\Pi} = \frac{J_2}{i_2^2}; \tag{2.16}$$

$$J_{2\Pi} = \frac{0,289}{3,633^2} = 0,0219 (\text{кг} \cdot \text{м}^2).$$

Момент інерції третього вала приведений до валу двигуна:

$$J_{3\Pi} = \frac{0,512}{11,909^2} = 3,61 \cdot 10^{-3} (\text{кг} \cdot \text{м}^2).$$

Момент інерції четвертого валу приведений до валу двигуна:

$$J_{4\Pi} = \frac{J_4}{i_4^2};$$

$$J_{4\Pi} = \frac{2,197}{37,216^2} = 1,586 \cdot 10^{-3} (\text{кг} \cdot \text{м}^2).$$

Момент інерції тихохідного валу приведений до валу двигуна:

$$J_{5\Pi} = \frac{J_5}{i_5^2};$$

$$J_{5\Pi} = \frac{3,332}{106,71^2} = 2,927 \cdot 10^{-4} (\text{кг} \cdot \text{м}^2).$$

Момент інерції редуктора приведений до валу двигуна:

$$J_p = J_{2\Pi} + J_{3\Pi} + J_{4\Pi} + J_{5\Pi}; \quad (2.17)$$

$$J_p = 0,0219 + 3,61 \cdot 10^{-3} + 1,586 \cdot 10^{-3} + 2,927 \cdot 10^{-4} = 2,739 \cdot 10^{-2} (\text{кг} \cdot \text{м}^2).$$

Момент інерції механізму приведений до валу двигуна:

$$J_{\text{Мех.П.}} = J_{\text{Мех.}} / i - J_p; \quad (2.18)$$

$$J_{\text{Мех.П.}} = 8000 / 106,71 - 2,739 \cdot 10^{-2} = 74,942 (\text{кг} \cdot \text{м}^2).$$

Жорсткість першого зв'язку:

$$C_1 = \frac{\pi \cdot G_T}{32 \cdot l_1} \cdot d_1^4; \quad (2.19)$$

$$C_1 = \frac{3,14 \cdot 8 \cdot 10^{10}}{32 \cdot 1,1} \cdot 0,110^4 = 1044835 (\text{Н} \cdot \text{м}^2).$$

Жорсткість другого зв'язку:

$$C_2 = \frac{\pi \cdot G_T}{32 \cdot l_2} \cdot d_2^4;$$

$$C_2 = \frac{3,14 \cdot 8 \cdot 10^{10}}{32 \cdot 0,85} \cdot 0,145^4 = 4082468 (\text{Н} \cdot \text{м}^2).$$

Жорсткість третього зв'язку:

$$C_3 = \frac{\pi \cdot G_T}{32 \cdot l_3} \cdot d_3^4;$$

$$C_3 = \frac{3,14 \cdot 8 \cdot 10^{10}}{32 \cdot 0,85} \cdot 0,160^4 = 6052442 (H \cdot m^2);$$

Жорсткість четвертого зв'язку:

$$C_4 = \frac{\pi \cdot G_T}{32 \cdot l_4} \cdot d_4^4;$$

$$C_4 = \frac{3,14 \cdot 8 \cdot 10^{10}}{32 \cdot 0,95} \cdot 0,260^4 = 37760648 (H \cdot m^2).$$

Жорсткість п'ятого зв'язку:

$$C_5 = \frac{\pi \cdot G_T}{32 \cdot l_5} \cdot d_5^4;$$

$$C_5 = \frac{3,14 \cdot 8 \cdot 10^{10}}{32 \cdot 1,1} \cdot 0,280^4 = 43864087 (H \cdot m^2).$$

Жорсткість шостого зв'язку:

$$C_6 = \frac{\pi \cdot G_T}{32 \cdot l_6} \cdot d_6^4;$$

$$C_6 = \frac{3,14 \cdot 8 \cdot 10^{10}}{32 \cdot 1,7} \cdot 0,280^4 = 28382644 (H \cdot m^2).$$

Перетворення жорсткостей і моментів інерції до трьох масової системи.

Перетворення до шести масової системи:

$$J_{45} = J_5 \cdot \frac{C_5}{C_5 + C_6}; \quad (2.20)$$

$$J_{45} = 3,332 \cdot \frac{43864087}{43864087 + 28382644} = 2,023 (кг \cdot м^2);$$

$$J_{45E} = J_4 + J_{45}; \quad (2.21)$$

$$J_{4-5E} = 2,197 + 2,023 = 4,22 (кг \cdot м^2);$$

$$J_{56} = J_5 \cdot \frac{C_6}{C_5 + C_6};$$

$$J_{56} = 3,332 \cdot \frac{28382644}{43864087 + 28382644} = 1,309 (\text{кг} \cdot \text{м}^2);$$

$$J_{56E} = J_5 + J_{56};$$

$$J_{56E} = 3,332 + 1,309 = 4,641 (\text{кг} \cdot \text{м}^2);$$

$$C_{56E} = \frac{C_5 \cdot C_6}{C_5 + C_6};$$

(2.22)

$$C_{56E} = \frac{43864087 \cdot 28382644}{43864087 + 28382644} = 17232320 (\text{Н} \cdot \text{м}^2).$$

Перетворення до п'ятимасової системи:

$$J_{345} = J_{45E} \cdot \frac{C_4}{C_4 + C_{56E}};$$

$$J_{345} = 4,22 \cdot \frac{37760648}{37760648 + 17232320} = 2,898 (\text{кг} \cdot \text{м}^2);$$

$$J_{345E} = J_3 + J_{345};$$

$$J_{345E} = 0,512 + 2,898 = 3,41 (\text{кг} \cdot \text{м}^2);$$

$$J_{45-56} = J_{45E} \cdot \frac{C_{5-6E}}{C_4 + C_{5-6E}};$$

$$J_{45-56} = 4,641 \cdot \frac{17232320}{37760648 + 17232320} = 1,45 (\text{кг} \cdot \text{м}^2);$$

$$J_{45-56E} = J_{45E} + J_{45-56};$$

$$J_{45-56E} = 4,22 + 1,45 = 5,674 (\text{кг} \cdot \text{м}^2);$$

$$C_{456E} = \frac{C_4 \cdot C_{56E}}{C_4 + C_{56E}};$$

$$C_{456E} = \frac{37760648 \cdot 17232320}{37760648 + 17232320} = 11,83 \cdot 10^6 (\text{Н} \cdot \text{м}^2).$$

Перетворення до чотиримасової системи:

$$J_{2345} = J_{345E} \cdot \frac{C_3}{C_3 + C_{456E}};$$

$$J_{2345} = 3,41 \cdot \frac{6052442}{6052442 + 11,83 \cdot 10^6} = 1,154 (\text{кг} \cdot \text{м}^2);$$

$$J_{2345E} = J_2 + J_{2345};$$

$$J_{345E} = 0,289 + 1,154 = 3,754(\text{кг} \cdot \text{м}^2);$$

$$J_{345-456} = J_{345E} \cdot \frac{C_{456E}}{C_3 + C_{456E}};$$

$$J_{345-456} = 5,674 \cdot \frac{11,83 \cdot 10^6}{6052442 + 11,83 \cdot 10^6} = 3,754(\text{кг} \cdot \text{м}^2);$$

$$J_{345-456E} = J_{345E} + J_{345-456};$$

$$J_{345-456E} = 3,41 + 3,754 = 7,163(\text{кг} \cdot \text{м}^2);$$

$$C_{3456E} = \frac{C_3 \cdot C_{456E}}{C_3 + C_{456E}};$$

$$C_{3456E} = \frac{6052442 \cdot 11,83 \cdot 10^6}{6052442 + 11,83 \cdot 10^6} = 4,004 \cdot 10^6(\text{Н} \cdot \text{м}^2).$$

Перетворення до тримасової системи:

$$J_{12345} = J_{2345E} \cdot \frac{C_2}{C_2 + C_{3456E}};$$

$$J_{12345} = 1,154 \cdot \frac{4082468}{4082468 + 4,004 \cdot 10^6} = 0,728(\text{кг} \cdot \text{м}^2);$$

$$J_{12345E} = J_1 + J_{12345};$$

$$J_{12345E} = 0,0726 + 0,728 = 0,801(\text{кг} \cdot \text{м}^2);$$

$$J_{2345-345456} = J_{2345E} \cdot \frac{C_{3456E}}{C_2 + C_{3456E}};$$

$$J_{2345-345456} = 3,754 \cdot \frac{4,004 \cdot 10^6}{4082468 + 4,004 \cdot 10^6} = 2,484(\text{кг} \cdot \text{м}^2);$$

$$J_{2345-345456E} = J_{2345E} + J_{2345-345456};$$

$$J_{2345-345456E} = 1,443 + 2,484 = 3,927(\text{кг} \cdot \text{м}^2);$$

$$C_{23456E} = \frac{C_2 \cdot C_{3456E}}{C_2 + C_{3456E}};$$

$$C_{3456E} = \frac{4082468 \cdot 4,004 \cdot 10^6}{4082468 + 4,004 \cdot 10^6} = 2,021 \cdot 10^6 (H \cdot M^2).$$

Приймаємо  $C_{12} = C_1 = 1,045 \cdot 10^6 H \cdot M^2$ ,  $C_{23} = C_{3456E} = 2,021 \cdot 10^6 (H \cdot M^2)$ ,

$J_I = J_{ДВ} = 14 (кг \cdot M^2)$ ,  $J_{II} = J_{12345E} = 0,801 (кг \cdot M^2)$ ,  $J_{III} = J_{2345-345456E} = 3,927 (кг \cdot M^2)$ .

Структурна схема тримасової гнучкої системи показана на рис. 2.5.

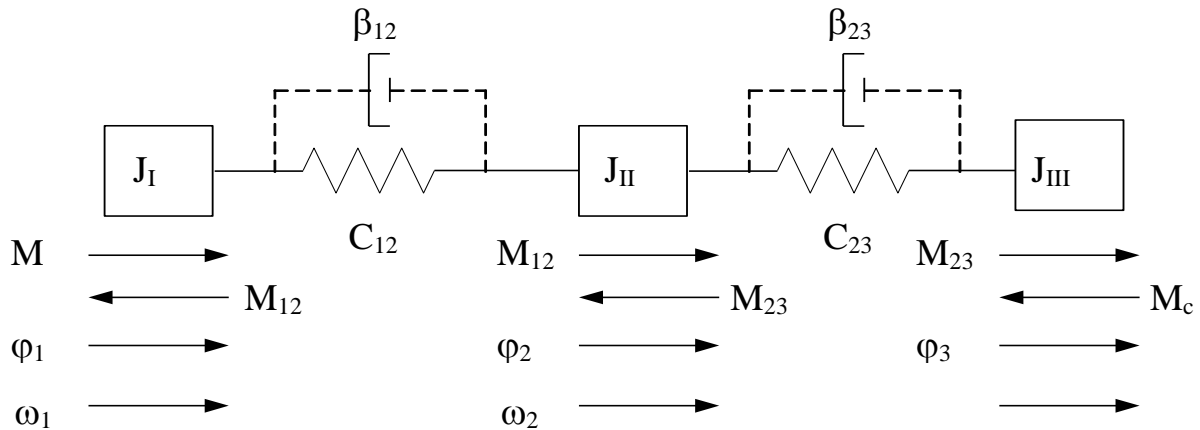


Рисунок 2.4 - Розрахункова схема тримасової гнучкої системи

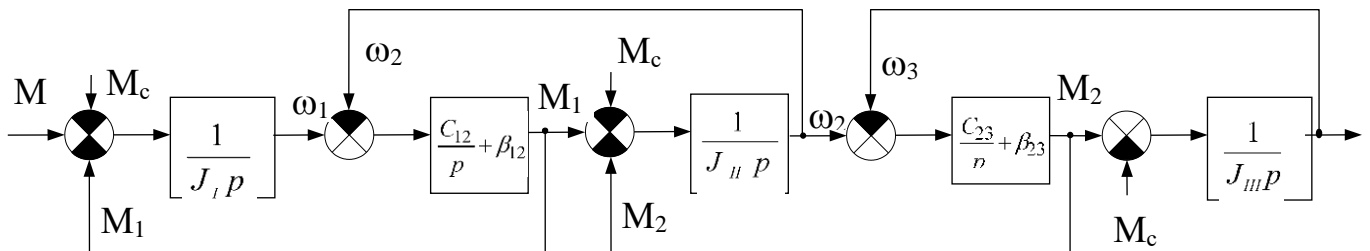


Рисунок 2.5 - Структурна схема тримасової гнучкої системи

Вирішивши біквдратне рівняння, отримуємо корні які характеризують рівняння системи:

$$p_1 = 0;$$

$$p_{2,3} = \pm j \sqrt{\frac{a}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2b}{a^2}} \right)} = \pm j \sqrt{\frac{4,417 \cdot 10^6}{2} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 8,982 \cdot 10^{11}}{(4,417 \cdot 10^6)^2}} \right)} = \pm j 745,489,$$

$$\begin{aligned}
 \text{де } a &= \frac{c_{12}J_3(J_1 + J_2) + c_{23}J_1(J_2 + J_3)}{J_1J_2J_3} = \\
 &= \frac{1,045 \cdot 10^6 \cdot 3,93 \cdot (14 + 0,801) + 2,021 \cdot 10^6 \cdot 14 \cdot (0,801 + 3,93)}{14 \cdot 0,801 \cdot 3,93} = 4,417 \cdot 10^6; \\
 b &= \frac{c_{12}c_{23}(J_1 + J_2 + J_3)}{J_1J_2J_3} = \frac{1,045 \cdot 10 \cdot 2,021 \cdot 10 \cdot (14 + 0,801 + 3,927)}{14 \cdot 0,801 \cdot 3,93} = 8,982 \cdot 10; \\
 p_{4,5} &= \pm j \sqrt{\frac{a}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{2b}{a}} \right)} = \pm j \sqrt{\frac{4,417 \cdot 10}{2} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 8,982 \cdot 10}{(4,417 \cdot 10)}} \right)} = \pm j2077.
 \end{aligned}$$

Корені характеристичного рівняння свідчать про те, що система може бути представлена у вигляді послідовного з'єднання інтегруючої ланки і двох консервативних коливальних ланок з резонансними частотами коливань  $\Omega_1$  і  $\Omega_2$ .

. Отже,

$$p_1 = 0, p_{2,3} = j\Omega_1, p_{4,5} = j\Omega_2$$

Коефіцієнт в'язкого тертя між першою і другою масами:

$$\beta_{12} = \frac{C_{12} \cdot \lambda_{12}}{\pi \cdot \Omega_1}; \quad (2.23)$$

Коефіцієнт в'язкого тертя між другою і третьою масами:

$$\beta_{23} = \frac{C_{23} \cdot \lambda_{23}}{\pi \cdot \Omega_2};$$

Перетворення до двохмасової системи:

Еквівалентна жорсткість двох масової гнучкої системи:

$$C_{12E} = \frac{C_{12} \cdot C_{23}}{C_{12} + C_{23}};$$

$$C_{12E} = \frac{1,045 \cdot 10 \cdot 2,021 \cdot 10}{1,045 \cdot 10 + 2,021 \cdot 10} = 6,888 \cdot 10 \text{ (Н} \cdot \text{м)};$$

$$J_{12} = J_2 \cdot \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{23}};$$

$$J_{12} = 0,801 \cdot \frac{1,045 \cdot 10}{1,045 \cdot 10 + 2,021 \cdot 10} = 0,273 (\text{кг} \cdot \text{м});$$

$$J_{12E} = J_{12} + J_{ДВ};$$

$$J_{12E} = 14 + 0,273 = 14,273 (\text{кг} \cdot \text{м});$$

$$J_{23} = J_2 \cdot \frac{C_{23}}{C_{12} + C_{23}};$$

$$J_{23} = 0,801 \cdot \frac{2,021 \cdot 10}{1,045 \cdot 10 + 2,021 \cdot 10} = 0,528 (\text{кг} \cdot \text{м});$$

$$J_{23E} = J_2 + J_{23};$$

$$J_{23E} = 0,801 + 0,528 = 1,329 (\text{кг} \cdot \text{м});$$

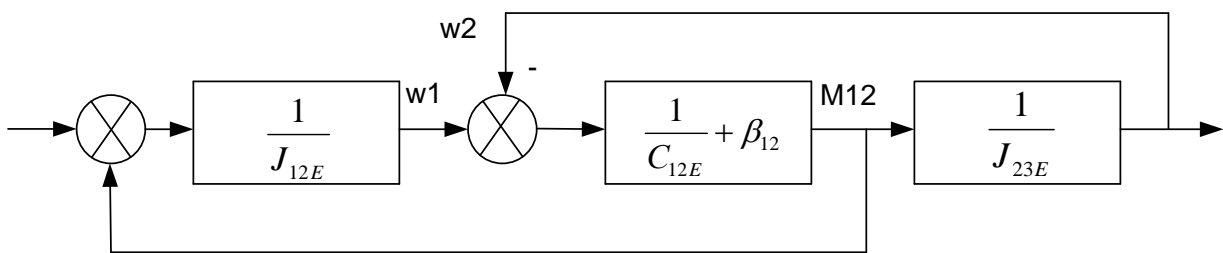


Рисунок 2.6 - Структурна схема двохмасової гнучкої системи

Відношення мас:

$$\gamma = \frac{J_{12E} + J_{23E}}{J_{12E}}; \quad (2.24)$$

$$\gamma = \frac{14,273 + 1,329}{14,273} = 1,093.$$

Резонансна частота системи:

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{C_{12E} \cdot (J_{12E} + J_{23E})}{J_{12E} \cdot J_{23E}}}; \quad (2.25)$$

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{6,888 \cdot 10 \cdot (14,273 + 1,329)}{14,273 \cdot 1,329}} = 752,657 \left( \frac{1}{c} \right).$$

Резонансна частота другої маси при жорсткому заданні першої:

$$\Omega_{02} = \sqrt{\frac{C_{12E}}{J_{23E}}} = \frac{\Omega_{12}}{\gamma}; \quad (2.26)$$

$$\Omega_{02} = \sqrt{\frac{6,888 \cdot 10}{1,329}} = 886,617 \left( \frac{1}{c} \right).$$

Коефіцієнт затухання:

$$\alpha_{em} = \sqrt{\Omega_{12}^2 - \Omega_p^2}. \quad (2.27)$$

Резонансна частота:

$$\Omega_p = \frac{(J_{19} + J_{29}) \cdot c_{129}}{J_{19} \cdot J_{29} \cdot \Omega_{12}}; \quad (2.28)$$

$$\Omega_p = \frac{(14,273 + 0,528) \cdot 6,888 \cdot 10^6}{14,273 \cdot 0,528 \cdot 752,657} = 752,263 \left( \frac{1}{c} \right);$$

$$\alpha_{em} = \sqrt{752,657^2 - 752,263^2} = 24,35 \left( \frac{1}{c} \right).$$

Логарифмічний декремент:

$$\lambda_{em} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \alpha_{em}}{\Omega_p}; \quad (2.29)$$

$$\lambda_{em} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 24,35}{752,263} = 0,203.$$

Коефіцієнт в'язкого тертя, приведений до двигуна:

$$\beta_{12} = \frac{\lambda_{12} \cdot C_{12}}{\pi \cdot \Omega_{12}};$$

$$\beta_{12} = \frac{0,203 \cdot 1,045 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 752,657} = 88,42 (H \cdot m^2 \cdot c);$$

Розрахуємо коефіцієнт в'язкого тертя для трьох масової системи.  
Логарифмічний декремент  $\lambda_{12} = \lambda_{23} = 0,203$ .

Коефіцієнт в'язкого тертя між першою і другою масами:

$$\beta_{12} = \frac{1,045 \cdot 10^6 \cdot 0,203}{3,14 \cdot 745,489} = 89,225 (H \cdot m^2 \cdot c).$$

Коефіцієнт в'язкого тертя між другою і третьою масами:

$$\beta_{23} = \frac{2,021 \cdot 10^6 \cdot 0,203}{3,14 \cdot 2077} = 59,718 (H \cdot m^2 \cdot c).$$

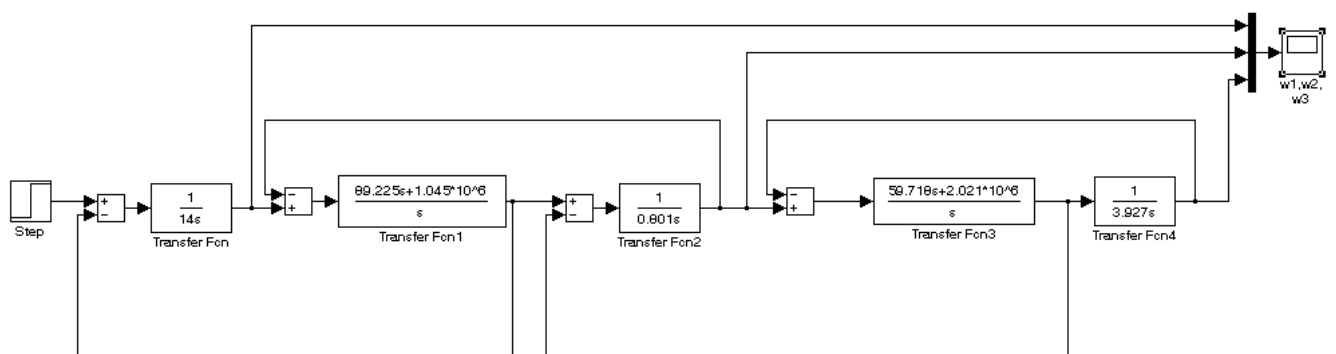


Рисунок 2.7 - Модель тримасової гнучкої системи

З отриманих графіків видно, що коливання першої і другої маси знаходяться в зворотній фазі з третьою масою, відповідно, розрахунки зроблено вірно.

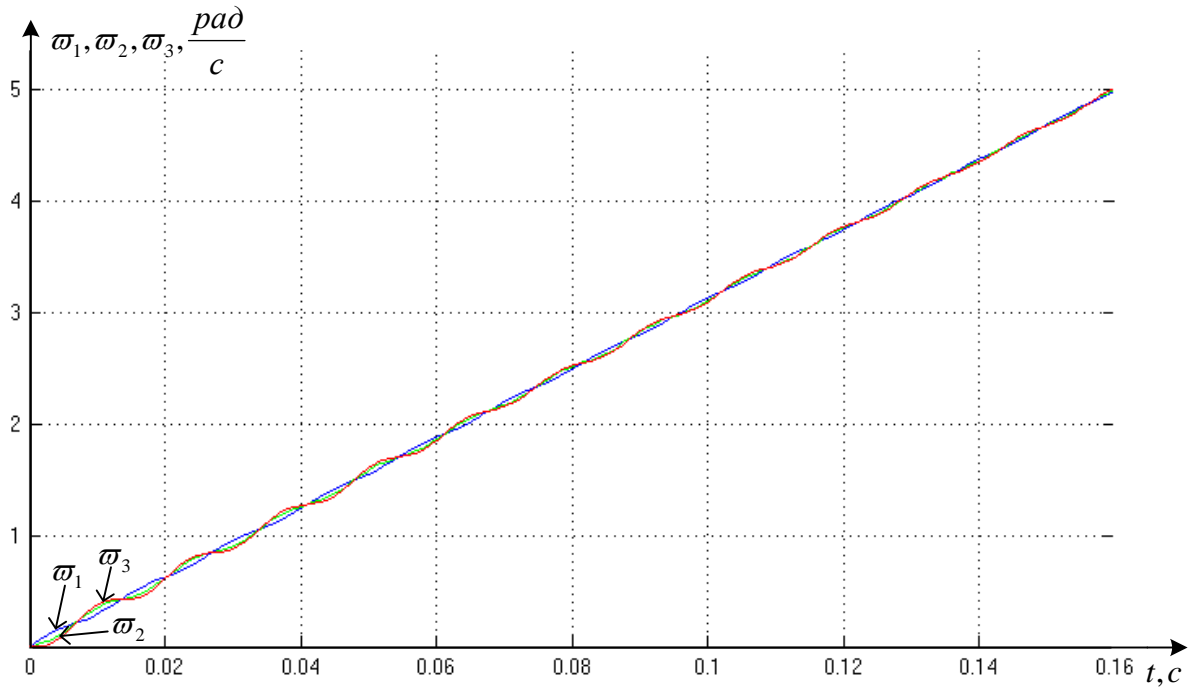


Рисунок 2.8 - Пуск ЕП з тримасовою гнучкою механічною частиною з урахуванням звичайного демпфування

Так як одна із резонансних частот трьох масової системи співпадає з резонансною частотою двох масової системи, це означає, що перехід від трьохмасової системи до двох масової системи можливий.

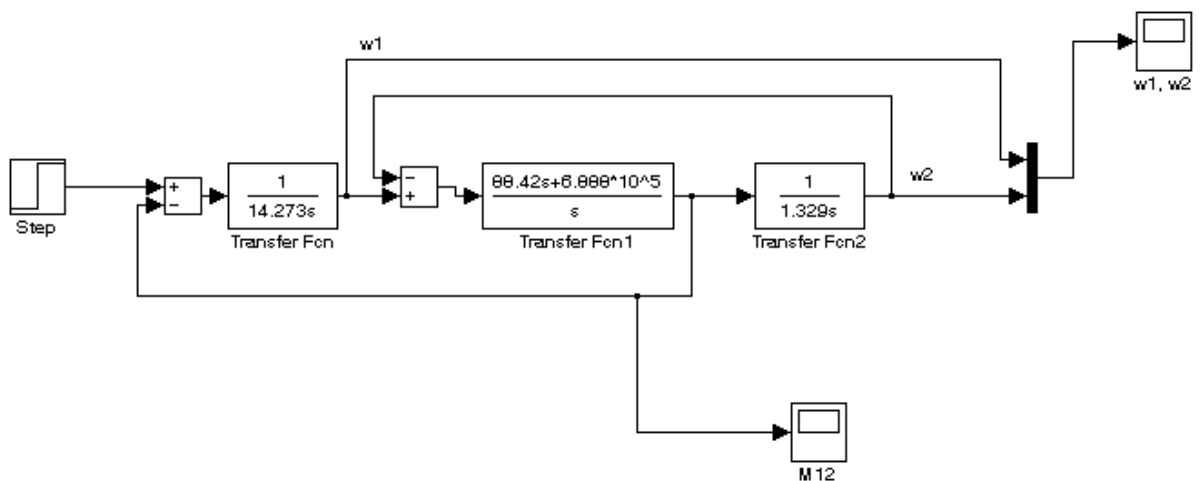


Рисунок 2.9 - Модель двохмасової гнучкої системи

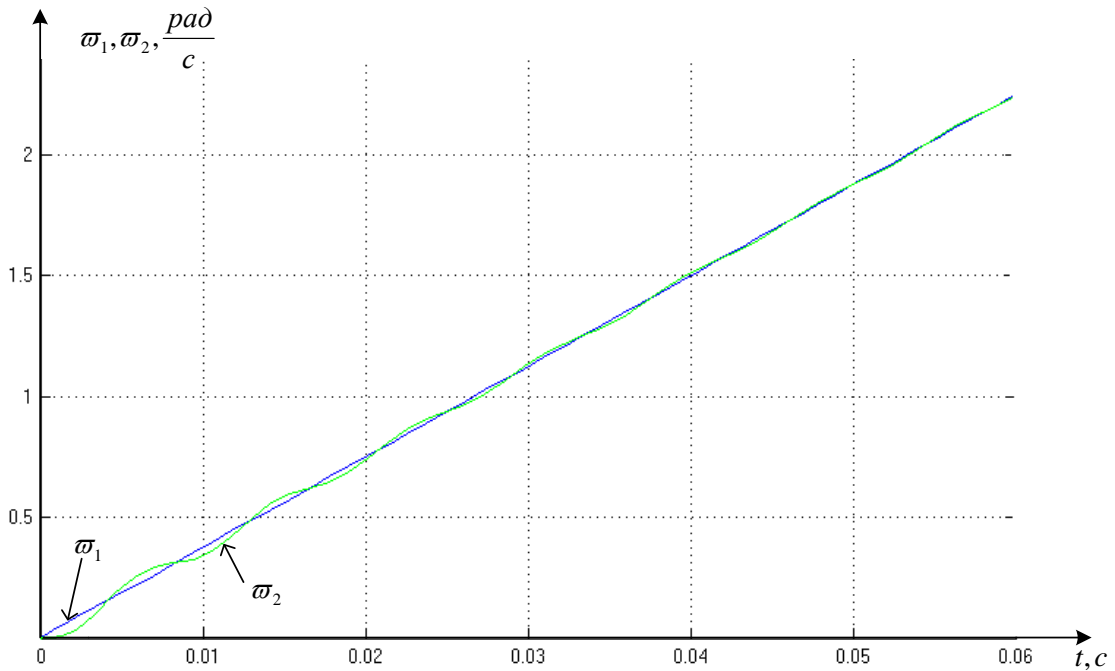


Рисунок 2.10 - Пуск ЕП з двохмасовою гнучкою механічною частиною з урахуванням звичайного демпфування

Характер отриманих залежностей свідчить про те, що при  $M = \text{const}$  за впливу дисипативних сил типу внутрішнього в'язкого тертя коливальної швидкості поступово затухає ( $\lambda_{12} = 0,203$ ), але миттєві швидкості  $\omega_1, \omega_2$  при цьому не співпадають, так як містять коливальні складові, причому коливання  $\omega_1, \omega_2$  відбуваються в протифазі.

## 2.3 Моделювання асинхронного електропривода брикет-преса

### 2.3.1 Модель асинхронного коротко-замкнутого двигуна в нерухомій системі координат

Узагальнена система управління для опису асинхронної машини має вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{u}_s &= r_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + j\alpha_k \bar{\psi}_s, \\
 \bar{u}_r &= r_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + j(\alpha_k - \rho v) \bar{\psi}_r, \\
 \bar{\psi}_s &= x_s \bar{i}_s + x_m \bar{i}_r, \\
 \bar{\psi}_r &= x_m \bar{i}_s + x_r \bar{i}_r, \\
 m &= k \text{Mod}(\bar{\psi}_i \times \bar{i}_k), \\
 \bar{T}_m \frac{dv}{dt} &= m - m_H.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

У цих рівняннях всі змінні відносні, отримані як результат ділення реальних значень на базові, всі коефіцієнти також безрозмірні, отримані аналогічно.

Змінні і параметри у відносних одиницях:

$$\bar{u} = \frac{\vec{u}}{U_b}, \quad \bar{i} = \frac{\vec{i}}{I_b}, \quad \bar{\psi} = \frac{\vec{\psi}}{\Psi_b} \text{ – відносні електромагнітні змінні стану,}$$

$$\alpha_k = \frac{\omega_k}{\omega_b}, \quad v_k = \frac{\omega_m}{\omega_b} \text{ – відносна частота статора і відносна швидкість ротора,}$$

$$m = \frac{M}{M_b} \text{ – відносний момент на валу машини.}$$

$$r_s = \frac{R_s}{R_b}, \quad r_r = \frac{R_r}{R_b}, \quad x_s = \frac{\omega_b L_s}{R_b}, \quad x_r = \frac{\omega_b L_r}{R_b}, \quad x_m = \frac{\omega_b L_m}{R_b}, \quad \bar{T}_m = \frac{J \omega_b^2}{M_b} \text{ – відносні}$$

параметри.

В рівняннях (2.30) час прийнято безрозмірним  $\bar{t} = \frac{t}{t_b} = \omega_b t$ , тобто одиницею

виміру часу є не секунда, а  $t_b = \frac{1}{\omega_b}$ . Слід зауважити, що введення відносних

величин істотно скорочує час моделювання і дозволяє усунути багато проблем при моделюванні.

Схема асинхронної машини з короткозамкненим ротором (АКЗ) виходить з узагальненої схеми, якщо обмотки ротора замкнуті на коротко. При цьому в загальних рівняннях слід покласти  $\bar{u}_R = 0$ . Тоді отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_s &= r_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + j\alpha_k \bar{\psi}_s, \\ 0 &= r_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + j(\alpha_k - \rho\nu)\bar{\psi}_r, \\ \bar{\psi}_s &= x_s \bar{i}_s + x_m \bar{i}_r, \\ \bar{\psi}_r &= x_m \bar{i}_s + x_r \bar{i}_r, \\ m &= k \text{Mod}(\bar{\psi}_i \times \bar{i}_k), \\ \bar{T}_m \frac{d\nu}{dt} &= m - m_H. \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

Для динамічних систем необхідно враховувати перехідні електромагнітні процеси в машині. В цьому випадку в якості пари змінних, що описують машину, залишимо просторові вектори струму статора і потокозчеплення ротора ( $\bar{i}_s, \bar{\psi}_R$ ), тоді рівняння (2.31) після відповідних перетворень приймуть вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_s &= r_s \bar{i}_s + x_s \frac{d\bar{i}_s}{dt} + j\alpha x_s \bar{i}_s - \frac{k_R}{T_R} \bar{\psi}_R + jk_R \rho\nu \bar{\psi}_R, \\ 0 &= -k_R r_R \bar{i}_s + \frac{1}{T_R} \bar{\psi}_R + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + j(\alpha_k - \rho\nu)\bar{\psi}_r, \\ m &= k_R \text{Mod}(\bar{\psi}_R \times \bar{i}_s), \\ \bar{T}_m \frac{d\nu}{dt} &= m - m_H, \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

де  $r = (r_s + k_R^2 r_R)$ ,  $x_s = (x_s - \frac{x_m^2}{x_R})$ ,  $k_R = \frac{x_m}{x_R}$ ,  $\bar{T}_R = \frac{x_r}{r_R}$  – безрозмірні коефіцієнти.

Зауважимо, що для представлення просторових векторів використовується комплексна площина.

$$\left. \begin{aligned}
\bar{u}_{sa} &= r i_{sa} + x_s \frac{di_{sa}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \bar{\psi}_{Ra} - k_R \rho v \bar{\psi}_{R\beta}, \\
\bar{u}_{s\beta} &= r i_{s\beta} + x_s \frac{di_{s\beta}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \bar{\psi}_{R\beta} + k_R \rho v \bar{\psi}_{Ra}, \\
0 &= -k_R r_R \bar{i}_{S\alpha} + \frac{1}{T_R} \bar{\psi}_{R\alpha} + \frac{d\bar{\psi}_{R\alpha}}{dt} + \rho v \bar{\psi}_{R\beta}, \\
0 &= -k_R r_R \bar{i}_{S\beta} + \frac{1}{T_R} \bar{\psi}_{R\beta} + \frac{d\bar{\psi}_{R\alpha}}{dt} - \rho v \bar{\psi}_{Ra}, \\
m &= k_R (\psi_{Ra} i_{S\beta} - \psi_{R\beta} i_{S\alpha}), \\
\bar{T}_m \frac{dv}{dt} &= m - m_H.
\end{aligned} \right\} (2.33)$$

Система рівнянь (2.33) в операторній формі набуде вигляду:

$$\left. \begin{aligned}
\bar{u}_{sa} &= r(1 + \bar{T}_s s) i_{sa} - \frac{k_R}{T_R} \bar{\psi}_{Ra} - k_R \rho v \bar{\psi}_{R\beta}, \\
\bar{u}_{s\beta} &= r(1 + \bar{T}_s s) i_{s\beta} - \frac{k_R}{T_R} \bar{\psi}_{R\beta} + k_R \rho v \bar{\psi}_{Ra}, \\
0 &= -k_R r_R \bar{i}_{S\alpha} + \frac{1}{T_R} (1 + \bar{T}_R s) \bar{\psi}_{R\alpha} + \rho v \bar{\psi}_{R\beta}, \\
0 &= -k_R r_R \bar{i}_{S\beta} + \frac{1}{T_R} (1 + \bar{T}_R s) \bar{\psi}_{R\beta} - \rho v \bar{\psi}_{Ra}, \\
m &= k_R (\bar{\psi}_{Ra} \bar{i}_{S\beta} - \bar{\psi}_{R\beta} \bar{i}_{S\alpha}), \\
\bar{T}_m s v &= m - m_H, \text{ де } \bar{T}_s = \frac{x_s}{r}.
\end{aligned} \right\} (2.34)$$

Модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в нерухомій системі координат, складена за рівняннями системи (2.34) наведена на рис. 2.11.

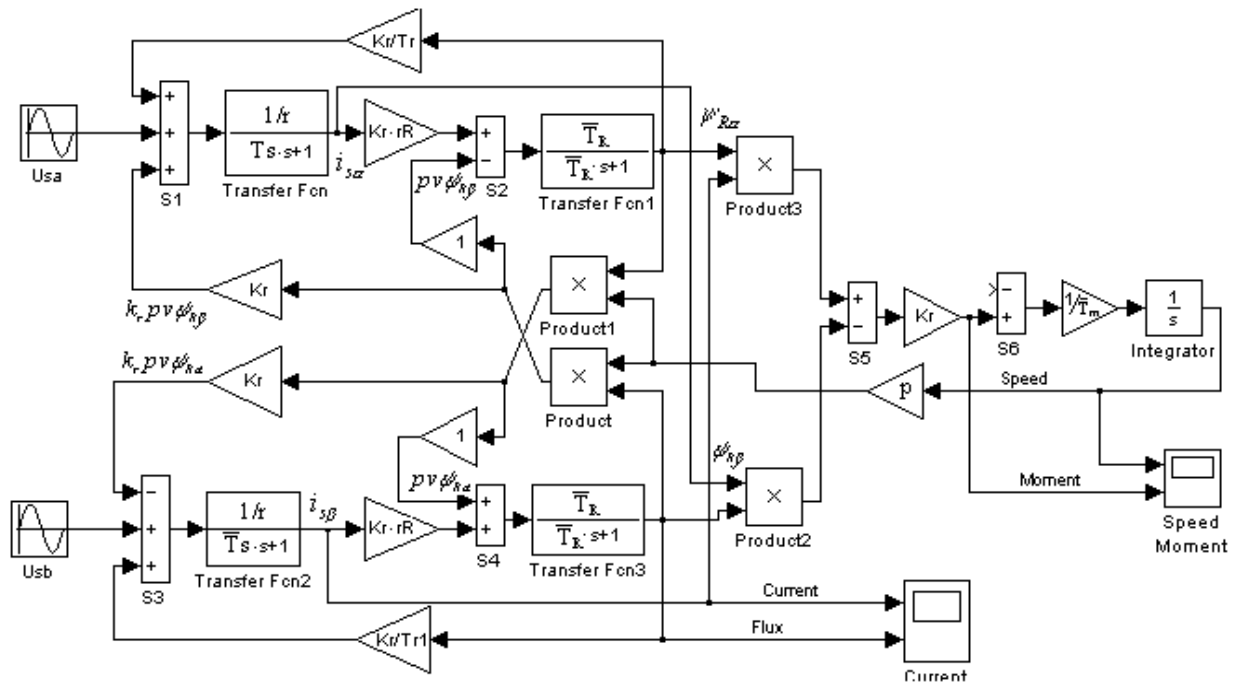


Рисунок 2.11 - Модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в нерухомій системі координат

Зробимо розрахунок необхідних параметрів для побудови моделі короткозамкнутого асинхронного двигуна в нерухомій системі координат.

Синхронна частота обертання статора:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}; \quad (2.35)$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157 \left( \frac{1}{c} \right).$$

Номінальна частота обертання ротора:

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H}{60}; \quad (2.36)$$

$$\omega_H = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1492}{60} = 156,163 \left( \frac{1}{c} \right).$$

Номінальне ковзання двигуна:

$$S_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0}; \quad (2.37)$$

$$S_H = \frac{157 - 156,163}{157} = 5,3 \cdot 10^{-3}.$$

Критичне ковзання двигуна:

$$S_K = S_H \cdot (M_{MAX} + \sqrt{M_{MAX}^2 - 1}); \quad (2.38)$$

$$S_K = 5,3 \cdot 10^{-3} \cdot (2,7 + \sqrt{2,7^2 - 1}) = 0,028.$$

Номинальний струм двигуна:

$$I_H = \frac{P_H}{3 \cdot U_H \cdot \cos \phi_H \cdot \eta_{НОМ}}; \quad (2.39)$$

$$I_H = \frac{630000}{3 \cdot 400 \cdot 0,88 \cdot 97} = 615,024 (\text{А}).$$

Активний опір статора:

$$R_S = \frac{U_H \cdot S_H}{I_H}; \quad (2.40)$$

$$R_S = \frac{400 \cdot 5,3 \cdot 10^{-3}}{615,024} = 3,469 \cdot 10^{-3} (\text{Ом}).$$

Індуктивний опір короткого замикання знаходимо з формули:

$$M_K = \frac{3 \cdot \left( \frac{U_H}{1,732} \right)^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (R_S + \sqrt{R_S^2 + X_K^2})}; \quad (2.41)$$

$$10880 = \frac{3 \cdot \left( \frac{400}{1,732} \right)^2}{2 \cdot 157 \cdot (3,469 \cdot 10^{-3} + \sqrt{3,469 \cdot 10^{-32} + X_K^2})}.$$

Звідси знаходимо, що  $X_K = 0,0683 \text{ Ом}$ .

Активний приведенний опір ротора знаходимо з формули:

$$S_K = \frac{R'_R}{\sqrt{R_S^2 + X_K^2}}; \quad (2.42)$$

$$0,028 = \frac{R'_R}{\sqrt{3,469 \cdot 10^{-32} + 0,0683^2}}.$$

Звідси знаходимо, що  $R'_R = 1,9 \cdot 10^{-3} (\text{Ом})$ .

З достатньою точністю вважається, що індуктивний опір статора і наведений індуктивний опір ротора приблизно рівні, тоді:

$$X_S \approx X'_R \approx \frac{X_K}{2}; \quad (2.43)$$

$$X_S \approx X'_R \approx \frac{0,0683}{2} \approx 0,03415 (\text{Ом}).$$

Індуктивність розсіювання статора і ротора:

$$L_{SP} = L_{RP} = \frac{\frac{U_H}{1,732}}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot (1 + C^2) \cdot I_H}; \quad (2.44)$$

$$L_{SP} = L_{RP} = \frac{\frac{400}{1,732}}{4 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot (1 + 1,03^2) \cdot 6,8 \cdot 615,042} = 4,267 \cdot 10^{-5} (\text{Гн}),$$

де  $C$  - коефіцієнт приведення приймається рівним 1,03.

Індуктивність ротора і статора:

$$L_S = L_R = \frac{\frac{U_H}{1,732}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_H \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} - \frac{2}{3} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_K \cdot \frac{S_H}{S_K}}{p \cdot U_H}}; \quad (2.45)$$

$$L_S = L_R = \frac{\frac{400}{1,732}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 615,042 \cdot \sqrt{1 - 0,88^2} - \frac{2}{3} \cdot \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 2,7 \cdot 5,3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 400 \cdot 0,028}} = 2,53 \cdot 10^{-3} (\text{Гн}).$$

Індуктивність контуру намагнічування:

$$L_m = L_S - L_{SP}; \quad (2.46)$$

$$L_m = 2,53 \cdot 10^{-3} - 4,267 \cdot 10^{-5} = 2,49 \cdot 10^{-3} (\text{Гн}).$$

Базова частота обертання:

$$\omega_B = 2 \cdot \pi \cdot f; \quad (2.47)$$

$$\omega_B = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \left( \frac{\text{рад}}{\text{с}} \right).$$

Базовий опір:

$$R_B = \frac{\sqrt{2} \cdot U_H}{\sqrt{2} \cdot I_H}; \quad (2.48)$$

$$R_B = \frac{\sqrt{2} \cdot 400}{\sqrt{2} \cdot 615,042} = 0,65 \text{ (Ом)}.$$

Відносний нормований індуктивний опір контуру намагнічування:

$$X_m^* = \frac{\omega_B \cdot L_m}{R_B}; \quad (2.49)$$

$$X_m^* = \frac{314 \cdot 2,49 \cdot 10^{-3}}{0,65} = 1,2.$$

Відносний індуктивний опір статора і ротора:

$$X_S^* = X_R^* = \frac{\omega_B \cdot L_S}{R_B}; \quad (2.50)$$

$$X_S^* = X_R^* = \frac{314 \cdot 2,53 \cdot 10^{-3}}{0,65} = 1,223.$$

Коефіцієнт  $k_R$ :

$$k_R = \frac{X_m^*}{X_S^*}; \quad (2.51)$$

$$k_R = \frac{1,2}{1,223} = 0,983.$$

Відносний опір статора:

$$R_S^* = \frac{R_S}{R_B}; \quad (2.52)$$

$$R_S^* = \frac{3,469 \cdot 10^{-3}}{0,65} = 3,333 \cdot 10^{-3}.$$

Відносний опір ротора:

$$R_R^* = \frac{R_R}{R_B}; \quad (2.53)$$

$$R_R^* = \frac{1,9 \cdot 10^{-3}}{0,65} = 2,921 \cdot 10^{-3}.$$

Параметр  $r$ :

$$r = R_S^* + k_R^2 \cdot R_R^*; \quad (2.54)$$

$$r = 3,333 \cdot 10^{-3} + 0,983^2 \cdot 2,921 \cdot 10^{-3} = 8,157 \cdot 10^{-3}.$$

Параметр  $X_{S1}^*$ :

$$X_{S1}^* = X_S^* - \frac{(X_m^*)^2}{X_R^2}; \quad (2.55)$$

$$X_{S1}^* = 1,223 - \frac{1,202^2}{1,223} = 4,085 \cdot 10^{-2}.$$

Відносна постійна часу статора  $\overline{T}_S$ :

$$\overline{T}_S = \frac{X_{S1}^*}{r}; \quad (2.56)$$

$$\overline{T}_S = \frac{4,085 \cdot 10^{-2}}{8,157 \cdot 10^{-3}} = 5,008.$$

Відносна стала часу ротора  $\overline{T}_R$ :

$$\overline{T}_R = \frac{X_R^*}{R_R^*}; \quad (2.57)$$

$$\overline{T}_R = \frac{1,223}{2,921 \cdot 10^{-3}} = 233,12.$$

Базове значення моменту:

$$M_B = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{2 \cdot U_H \cdot I_H}{\omega_B}; \quad (2.58)$$

$$M_B = \frac{3}{2} \cdot 2 \cdot \frac{2 \cdot 400 \cdot 615,042}{314} = 4700,96 (H \cdot m).$$

Відносне значення  $T_m$ :

$$T_m = \frac{J_{ДВ} \cdot \omega_B^2}{M_B}; \quad (2.59)$$

$$T_m = \frac{14 \cdot 314}{4700,96} = 293,63.$$

Базовий час:

$$t_B = \frac{1}{\omega_B}; \quad (2.60)$$

$$t_B = \frac{1}{314} = 0,00318(c).$$

Математична модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором 1LA8 405-4AB60, побудована по рівнянням (2.34) представлена на рис. 2.12.

На вхід моделі подається відносна синусоїдальна напруга статора (а точніше проекції його просторового вектора на осі  $\alpha$  та  $\beta$ ) з амплітудою і частотою, рівними 1, тобто рівними базовим значенням напруги і частоти. На виході осцилоскопи вимірюють відносні значення електромагнітного моменту, швидкості, струму і потокозчеплення.

Результати моделювання показують, що при прямому пуску спочатку спостерігається значні коливання моменту і струму. Після закінчення перехідного процесу швидкість досягає свого номінального значення, момент спадає до нуля.

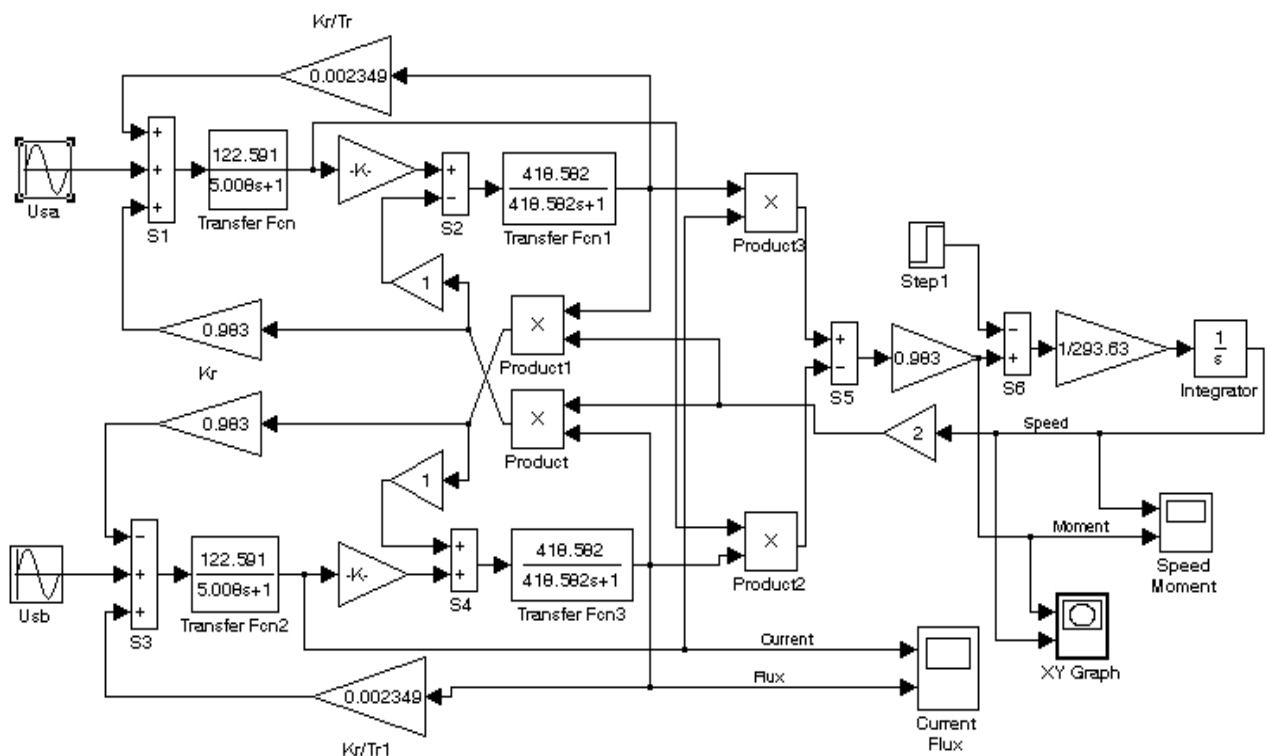


Рисунок 2.12 - Модель 1LA8 405-4AB60 в нерухомій системі координат

Результати показань осцилоскопа представлені на рис. 2.13

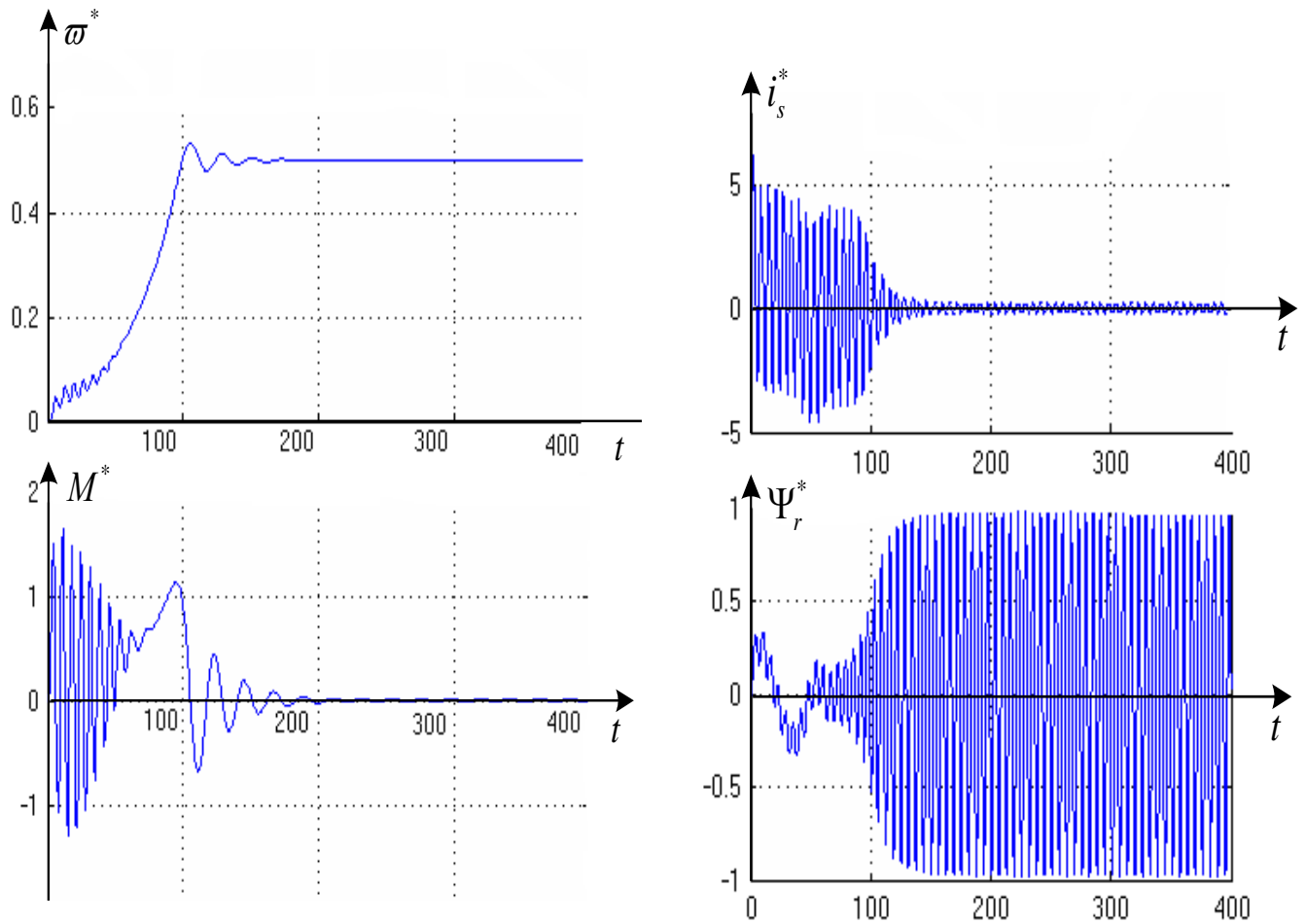


Рисунок 2.13 - Швидкість, електромагнітний момент, струм і потік двигуна в перехідних режимах відповідно

Динамічна характеристика електродвигуна представлена на рис. 2.14.

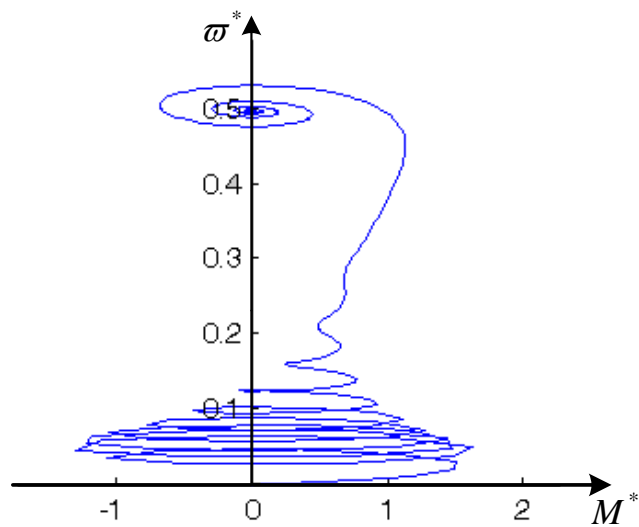


Рисунок 2.14 - Динамічна характеристика двигуна 1LA8 405-4AB60

### 2.3.2 Розрахунок часу пуску електроприводу

На практиці для оцінок тривалості перехідних процесів пуску електропривода досить використовувати статичну характеристику двигуна і рівняння руху:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.61)$$

Такі оцінки бувають корисні при моделюванні електроприводу на ЕОМ для контролю правильності результатів моделювання. Зазвичай для зазначеної мети кращі графоаналітичні методи.

Найпростішим шляхом є застосування методу кінцевих приростів. На ділянці зміни швидкості

$$\Delta \varpi_i = \varpi_{\text{ікон}} - \varpi_{\text{інач}}. \quad (2.62)$$

При достатній малості  $\Delta \varpi_i$  момент двигуна  $M_i$  і момент навантаження  $M_{ci}$  можуть бути прийнятими рівними середнім значенням  $M_{cpi}$  і  $M_{ccpi}$  на цих ділянках:

$$M_{cpi} = \frac{M_i + M_{i+1}}{2}. \quad (2.63)$$

Тоді відповідно до рівняння руху:

$$M_{cpi} - M_{c.cpi} = J \frac{\Delta \omega_i}{\Delta t_i}, \quad (2.64)$$

час  $\Delta t_i$ , за яке швидкість змінюється на  $\Delta \varpi_i$ , визначається за формулою:

$$\Delta t_i = \frac{J \cdot \Delta \omega_i}{M_{cpi} - M_{c.cpi}}. \quad (2.65)$$

Повний час пуску:

$$t_n = \sum \Delta t_i. \quad (2.66)$$

Для побудови статичної механічної характеристики скористаємося уточненою формулою Клоса:

$$M = \frac{2M_K(1 + \alpha s_K)}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} + 2\alpha s_K}, \quad (2.67)$$

де безрозмірний коефіцієнт  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{R_s}{R_r}; \quad (2.68)$$

$$\alpha = \frac{0,00347}{0,0019} = 1,826.$$

Далі використовуючи уточнену формулу Клоса (2.67) будемо природну механічну характеристику двигуна.

При використанні математичної програми Mathcad характеристику можна побудувати автоматично, ввівши вищевказану формулу, заздалегідь визначивши всі величини, що входять до неї, і задавши крок моделювання для параметра ковзання  $s$  із зазначенням меж від 0 до 1. На рис. 2.15 зображена отримана таким чином характеристика двигуна.

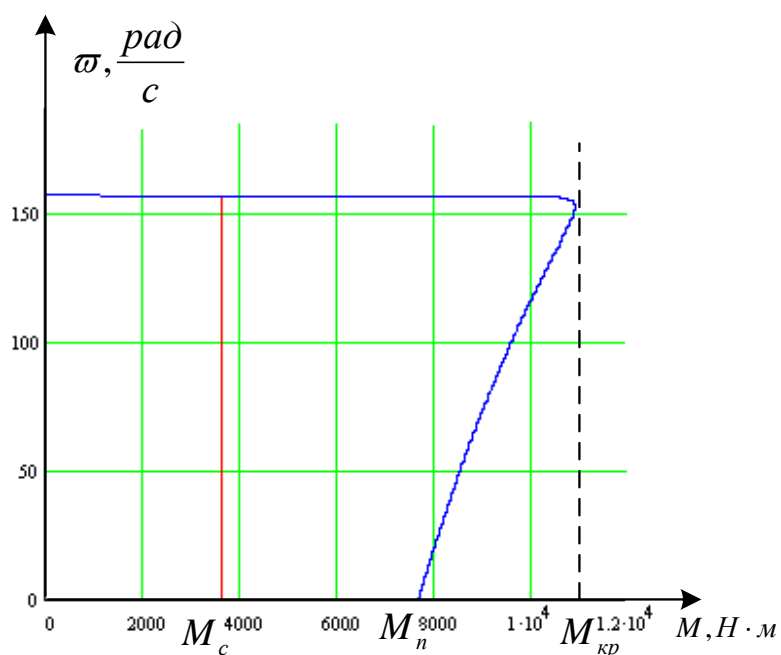


Рисунок 2.15 - Природна механічна характеристика двигуна

Обчислюючи для кожного з ділянок  $\Delta\varpi$ , починаючи з першого, і підсумовуючи при переході від інтервалу до інтервалу  $\Delta\varpi_i$  і  $\Delta t_i$ , можна побудувати криву  $\varpi(t)$ .

При відомій залежності  $\varpi(t)$  залежність  $M(t)$  визначається за допомогою статичної механічної характеристики. Використовуючи математичну програму Mathcad ці характеристики можна побудувати автоматично.

Результати показані на рис. 2.16 і рис. 2.17.

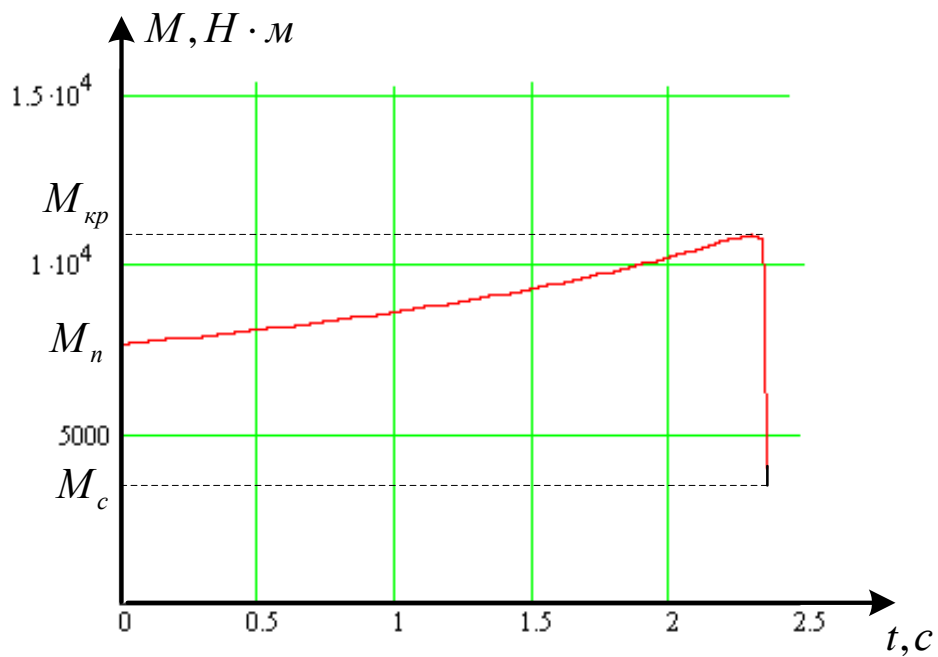


Рисунок 2.16 Перехідний процес моменту при пуску АД



Модель містить:

1) Віртуальний асинхронний двигун.

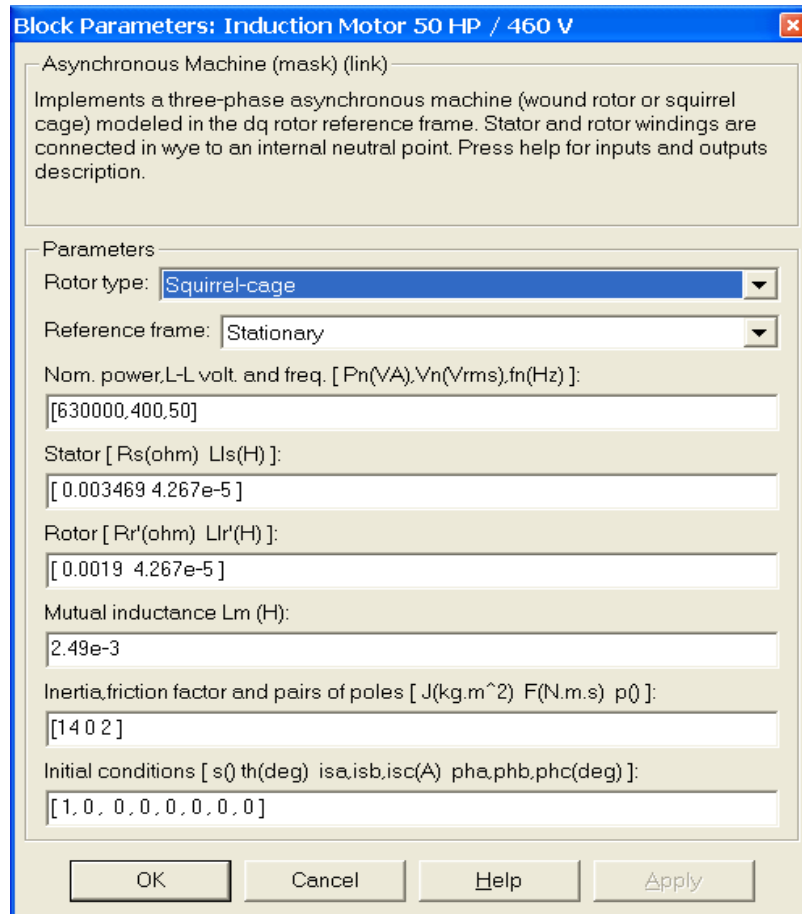


Рисунок 2.19 - Вікно налаштування параметрів АД

- 2) Трифазний автономний інвертор на IGBT-транзисторах.
- 3) Гістерезисний трифазний регулятор струму (блок Current Regulator). У відкритому вікні налаштування цього блоку вказується ширина "петлі гістерезису". На вхід блоку надходять сигнали завдання струмів у фазах і сигнали зворотнього зв'язку реальних струмів.
- 4) Блоки ABC-XY і XY-ABC здійснюють перетворення нерухої трифазної системи координат у обертову двофазну і обертову двофазну в нерухому трифазну.

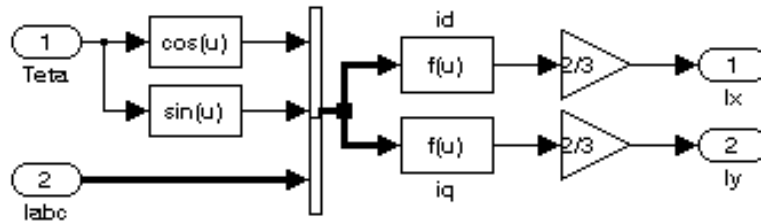


Рисунок 2.20 - Модель перетворення з нерухомої трифазної системи координат у обертову двофазну

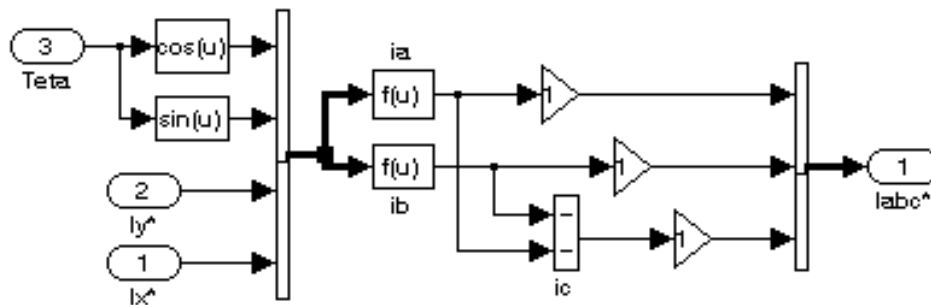


Рисунок 2.21 - Модель перетворення з обертовою двофазною в нерухому трифазну

- 5) Блок визначення вихідної частоти інвертора (блок Teta Calculation).  
Цей блок визначає вихідну частоту інвертора, так як тільки в цьому випадку осі координат обертової системи будуть зорієнтовані заданим чином ( $\bar{\Psi}_R = \Psi_{RX}, \Psi_{RY} = 0$ ).

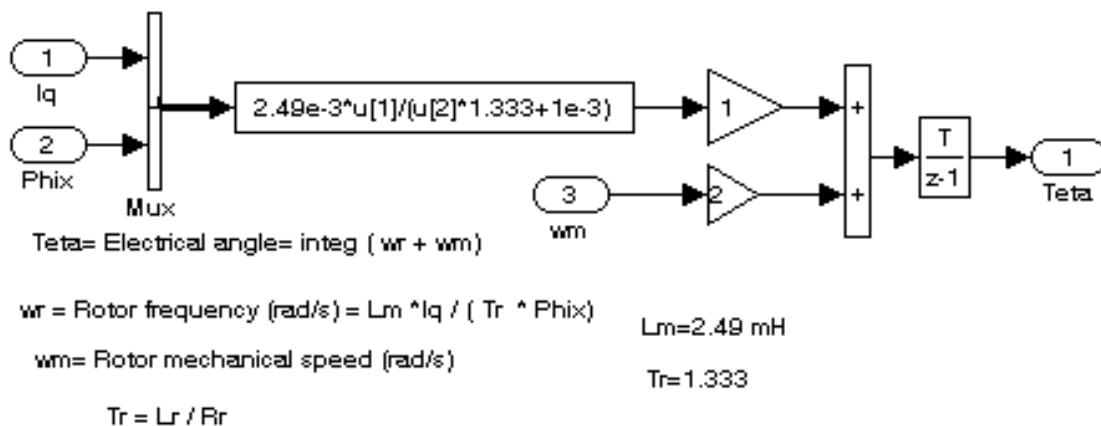
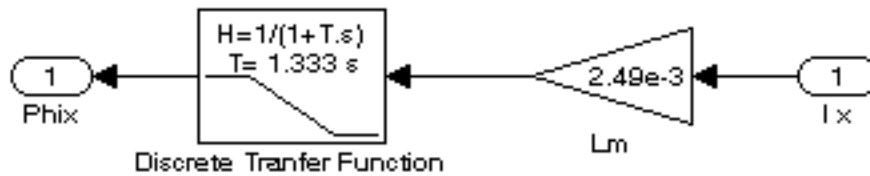


Рисунок 2.22 - Модель визначення вихідної частоти інвертора

6) Блок обчислення потоку (блок Flux Calculator).



$$Phir = Lm \cdot Id / (1 + Tr \cdot s)$$

$$Lm = 2.49 \text{ mH}$$

$$Tr = Lr / Rr = 1.333 \text{ s}$$

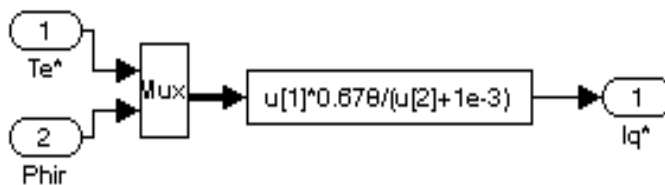
$$Lr = 0.00253 \text{ H}$$

$$Lr = Lr' + Lm = 0.04267 + 2.49 = 2.533 \text{ mH}$$

$$Rr = 0.0019 \text{ ohms}$$

Рисунок 2.23 - Модель обчислення потоку

7) Блок завдання потоку (блок Phir \*) і регулятор струму по осі x (блок Flux Controler) Сигнал з виходу регулятора швидкості (блок Speed Controller), поділений на обчислений потік є струм, що задається по осі y.



$$Iq = (2/3)^{2/p} \cdot (Lr/Lm) \cdot (Te / Phir)$$

$$Iq = 0.678 \cdot (Te / Phir)$$

$$Lm = 2.49 \text{ mH}$$

$$Lr = Lr' + Lm = 0.043 + 2.49 = 2.533 \text{ mH}$$

$$p = \text{nb of poles} = 2$$

Рисунок 2.24 - Модель обчислення струму по осі y

Після підстановки всіх необхідних параметрів і моделювання віртуальної моделі асинхронного електропривода в прикладному пакеті MATLAB отримаємо:

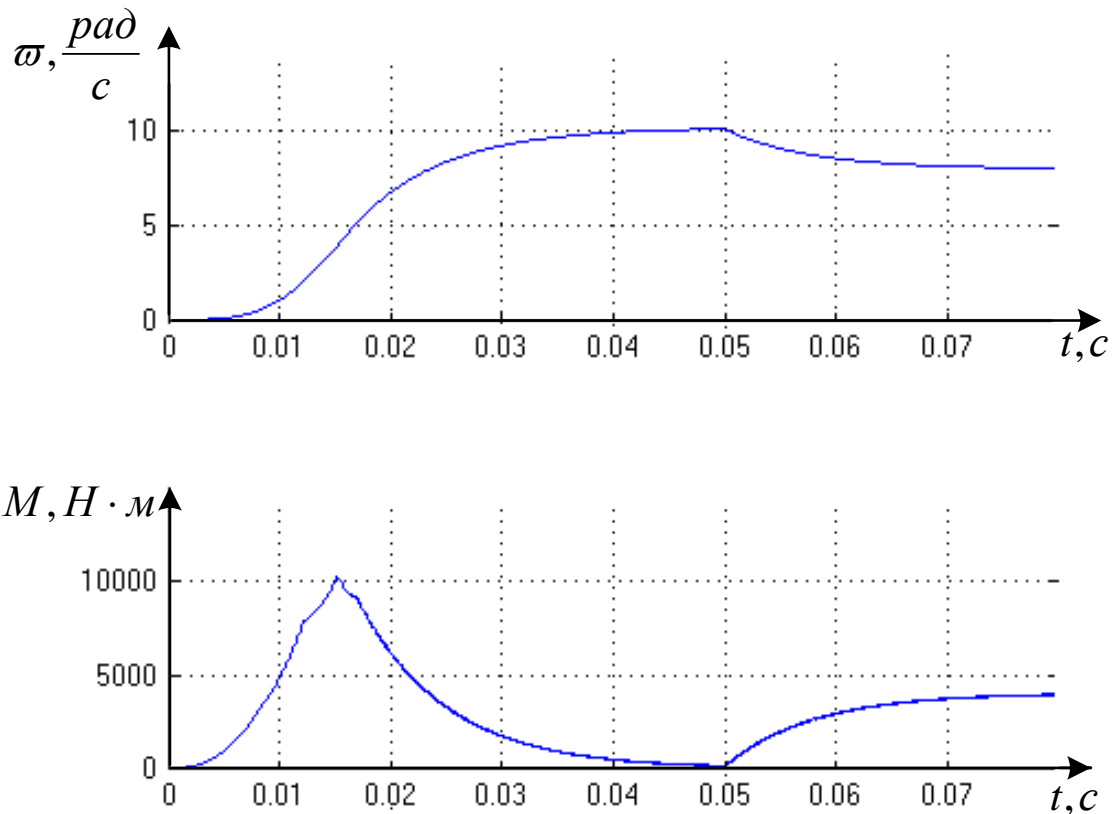


Рисунок 2.25 - Динамічні характеристики швидкості і моменту при пуску із навантаженням

## 2.5 Висновки за розділом

У другому розділі виконано розрахунково-конструкторське обґрунтування системи електропривода брикет-преса залізистих кварцитів. Обрано асинхронний двигун, проведено його перевірку на нагрів та підтверджено відповідність експлуатаційним вимогам. Визначено тип частотного перетворювача, що забезпечує плавне регулювання швидкості й моменту. Проведено розрахунок механічної частини електропривода з урахуванням навантажень під час пресування. Розроблено математичну та віртуальну моделі привода, результати яких підтвердили ефективність частотного керування і правильність вибраних технічних параметрів.

### 3 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

#### 3.1 Розроблення та дослідження функціональної схеми електроприводу

В асинхронному двигуні немає роздільних контурів управління магнітним потоком і електромагнітним моментом, що властиво двигунам постійного струму з незалежним збудженням. У той же час для забезпечення високих динамічних показників і великого діапазону регулювання необхідно управляти безпосередньо моментом двигуна. Віртуальне розділення контурів можливо при виділенні складових струму статора, що відповідають за величину моменту і магнітного потоку, з подальшим контролем і формуванням їх величини. Це і є відмінною рисою векторного управління.

Отже, основний принцип векторного керування асинхронним двигуном полягає в стабілізації модуля потокозчеплення ротора і формуванні електромагнітного моменту.

Кожна багатofазна електрична машина за умови рівності повних опорів фаз статора і ротора в динаміці може бути представлена двофазною моделлю - узагальненою електричною машиною. Відповідно в процесі розгляду властивостей векторного управління зводиться до мінімуму оперування трифазними величинами. Робота даної системи неможлива без трифазно-двофазного перетворення координат, тобто переходу від трифазних величин реального двигуна до змінних в нерухомих осях ( $\alpha, \beta$ ), реалізованого наступним чином (рівняння наведені для струмів статора; для напружень вони записуються аналогічно):

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = i_{sA} \\ i_{s\beta} = \frac{i_{sB} - i_{sC}}{\sqrt{3}} \end{cases}, \quad (3.1)$$

де  $i_{sA}, i_{sB}, i_{sC}$  - миттєві фазні струми статора (у нашому випадку це відносні величини).

Зворотнє, двофазне - трифазне перетворення здійснюється за формулами (рівняння наведені для напруг статора; для струмів вони записуються аналогічно):

$$\begin{cases} u_{sA} = u_{s\alpha} \\ u_{sB} = -\frac{1}{2}u_{s\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}u_{s\beta} \\ u_{sC} = -\frac{1}{2}u_{s\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}u_{s\beta} \end{cases}, \quad (3.2)$$

де  $u_{sA}$ ,  $u_{sB}$ ,  $u_{sC}$  - миттєві фазні напруги статора (у нашому випадку це відносні величини).

Реальні струми в обмотках статора - це струми в нерухомій системі координат. Будучи вираженими в координатній системі  $(\alpha, \beta)$ , вони мають знакозмінний характер, гармонійний в сталому режимі роботи. Це досить незручно для керування електроприводом, оскільки сигнали завдання представлені постійними сигналами змінного рівня, і зміна знака означає реверс електродвигуна. Тобто реалізація регуляторів можлива лише в обертовій системі координат.

Тому необхідно позбутися знакозмінного виду контрольованих величин, що можна зробити, перейшовши до рухомої системі координат  $(x, y)$  наступним чином:

$$\begin{cases} i_{sx} = i_{s\alpha} \cos \alpha_k \bar{t} + i_{s\beta} \sin \alpha_k \bar{t} \\ i_{sy} = i_{s\beta} \cos \alpha_k \bar{t} - i_{s\alpha} \sin \alpha_k \bar{t} \end{cases}, \quad (3.3)$$

де  $i_{sx}$ ,  $i_{sy}$  - відносні проекції вектора струму статора на осі обертової системи координат.

Аналогічним чином записуються рівняння для напружень.

Зворотні перетворення (з обертової в нерухому систему координат) здійснюються за формулами (рівняння наведені для напруг статора; для струмів вони записуються аналогічно):

$$\begin{cases} u_{s\alpha} = u_{sx} \cos \alpha_k \bar{t} - u_{sy} \sin \alpha_k \bar{t} \\ u_{s\beta} = u_{sx} \sin \alpha_k \bar{t} + u_{sy} \cos \alpha_k \bar{t} \end{cases}, \quad (3.4)$$

де  $u_{sx}$ ,  $u_{sy}$  - відносні проекції вектора напруги статора на осі обертається системи координат.

Графічно перетворення координат зображено на рис. 3.1.

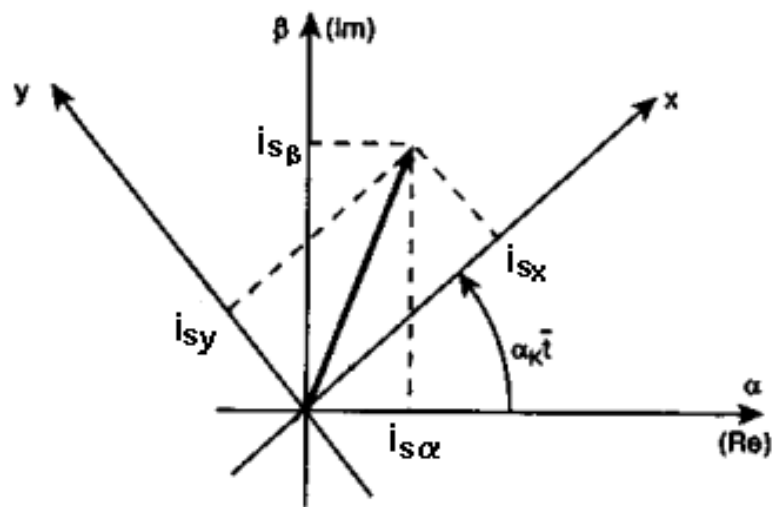


Рисунок 3.1 - Перетворення координат

У обертової з відносною швидкістю  $\alpha_k$  системі координат з речовою віссю  $x$  та уявною віссю  $y$  рівняння в операторній формі запишуться у вигляді:

$$\begin{cases} \bar{u}_{sx} = r(1 + \bar{T}_s s) i_{sx} - x'_s \alpha_k i_{sy} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{rx} - k_r p \psi_{ry} \\ \bar{u}_{sy} = r(1 + \bar{T}_s s) i_{sy} + x'_s \alpha_k i_{sx} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{ry} + k_r p \psi_{rx} \\ 0 = -k_r r_r i_{sx} + \frac{1}{T_r} \psi_{rx} + s \psi_{rx} - (\alpha_k - p \nu) \psi_{ry} \\ 0 = -k_r r_r i_{sy} + \frac{1}{T_r} \psi_{ry} + s \psi_{ry} + (\alpha_k - p \nu) \psi_{rx} \\ m = k_r (\psi_{rx} i_{sy} - \psi_{ry} i_{sx}) \\ \bar{T}_m s \nu = m - m_{назр} \end{cases}, \quad (3.5)$$

де  $\Psi_{rx}$ ,  $\Psi_{ry}$  - відносні проекції вектора потокозчеплення ротора на осі обертової системи координат.

Якщо розглядати асинхронний електропривод на базі автономного інвертора, що працює в режимі джерела напруги (АІН), то напруга статора буде сигналом (параметром режиму), що задається.

Практично у всіх частотно-регульованих електроприводах зарубіжного і російського виробництва алгоритми векторного управління засновані на управлінні асинхронним двигуном в системі координат, орієнтованих по вектору  $\bar{\Psi}_r$  потокозчеплення ротора. З метою спрощення рівнянь (3.5) зробимо так, щоб система, виробляючи сигнал швидкості обертання системи координат, орієнтувала б вісь  $x$  по потокозчеплення ротора. При цьому  $\bar{\Psi}_r = \Psi_{rx}$ ,  $\Psi_{ry} = 0$ . Тоді система рівнянь (2.73) запишеться у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{u}_{sx} = r(1 + \bar{T}_s s) i_{sx} - x'_s \alpha_k i_{sy} - \frac{k_r}{T_r} \Psi_{rx} \\ \bar{u}_{sy} = r(1 + \bar{T}_s s) i_{sy} + x'_s \alpha_k i_{sx} + k_r p \Psi_{rx} \\ k_r r_r i_{sx} = \frac{1}{T_r} (1 + \bar{T}_r s) \Psi_{rx} \\ k_r r_r i_{sy} = (\alpha_k - p \nu) \Psi_{rx} \\ m = k_r \Psi_{rx} i_{sy} \\ \bar{T}_m s \nu = m - m_{назр} \end{array} \right. \quad (3.6)$$

З четвертого, п'ятого і шостого рівнянь системи (2.74) виразимо відносну проекцію вектора потокозчеплення ротора на вісь  $x$  і відносну швидкість обертання координат:

$$\Psi_{rx} = \frac{k_r r_r \bar{T}_r}{1 + \bar{T}_r s} i_{sx}, \quad (3.7)$$

$$\alpha_k = p \nu + \frac{k_r r_r i_{sy}}{\Psi_{rx}}. \quad (3.8)$$

Функціональна схема досліджуваного приводу брикет-преса представлена на рис. 3.2.

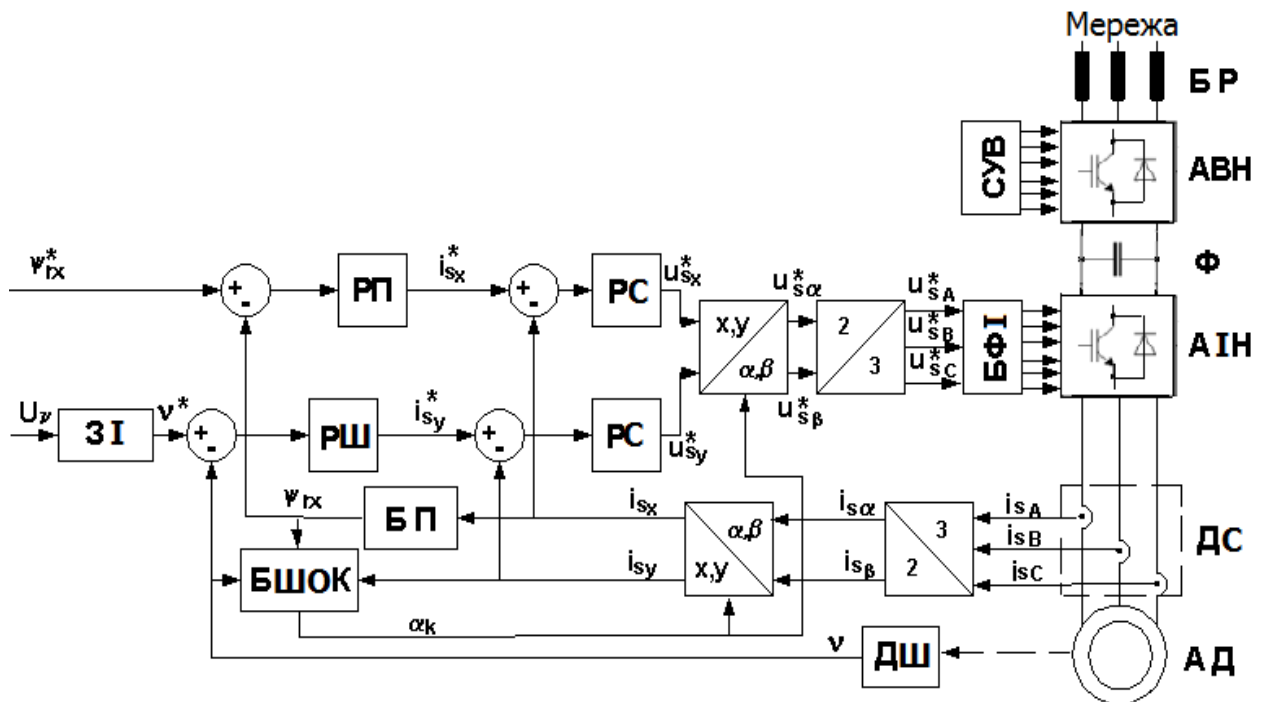


Рисунок 3.2 - Функціональна схема електроприводу

Розшифруємо позначення, представлені в ній:

БР – буферний реактор;

АВН – активний випрямляч напруги;

Ф – згладжуючий фільтр;

АІН – автономний інвертор напруги;

АД – асинхронний двигун;

ДС – датчики струму статора;

ДШ – датчик швидкості;

ЗІ – задатчик інтенсивності;

БП - блок обчислення складової потокозчеплення  $\Psi_{rx}$  (використовується формула (3.7));

БШОК – блок обчислення швидкості обертання координат  $\alpha_k$  (використовується формула (3.8));

РП, РШ, РС в каналі  $x$ , РС в каналі  $y$  – відповідно регулятори потокозчеплення  $\Psi_{rx}$ , швидкості  $\nu$ , струму  $i_{sx}$ , струму  $i_{sy}$ ;

блоки 2/3, 3/2 – перетворювачі фаз ;

блоки  $\alpha, \beta / x, y$ ,  $x, y / \alpha, \beta$  - перетворювачі координат);

БФІ – блок формування керуючих імпульсів інвертора;

СУВ – система управління випрямлячем.

Сигнали, позначені символом «\*» є задавальними. Сигнал напруги  $u_\nu$  є заданням на швидкість для приводу. Швидкість зміни цього сигналу визначається задатчиком інтенсивності.

Блок БФІ формує керуючі імпульси для інвертора в залежності від задавальних сигналів фазних напруг статора.

### 3.1.1 Математична модель асинхронного електроприводу для розв'язки каналів регулювання

В орієнтованій по потокозчеплення ротора  $\dot{\Psi}_r$  системі координат математичний опис асинхронного короткозамкнутого двигуна при живленні від автономного інвертора напруги має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{sx} \cdot s = -\frac{1}{T_s} \cdot i_{sx} + \frac{k_r \cdot r_r}{x'_s \cdot x_r} \cdot \left| \dot{\Psi}_r \right| + \frac{1}{x'_s} \cdot u_{sx} + f_1(s) \\ i_{sy} \cdot s = -\frac{1}{T_s} \cdot i_{sy} + \frac{k_r}{x'_s} \cdot p \cdot \nu \cdot \left| \dot{\Psi}_r \right| + \frac{1}{x'_s} \cdot u_{sy} - f_2(s) \\ \left| \dot{\Psi}_r \right| = \frac{k_r \cdot x_r}{T_r \cdot s + 1} \cdot i_{sx} \\ \left| \dot{\Psi}_r \right| \cdot (\alpha_k - p\nu) = k_r \cdot r_r \cdot i_{sy} \\ T_m \cdot \nu \cdot s = \frac{3 \cdot p \cdot k_r}{2} \cdot \left| \dot{\Psi}_r \right| \cdot i_{sy} - m_{назр} \end{array} \right. , \quad (3.9)$$

де  $f_1(s)$ ,  $f_2(s)$  - збурення від перехресних зв'язків:

$$f_1(s) = \alpha_k i_{sy}, \quad (3.10)$$

$$f_2(s) = \alpha_k i_{sy}. \quad (3.11)$$

Як видно з рівнянь системи (2.77) на формування складової струму статора  $i_{sx}$  впливає складова  $i_{sy}$ , і навпаки. На формування  $i_{sy}$  впливає також відносна електрорушійна сила частоти обертання. Тому в моделі, складеній за цим рівнянням, обов'язково з'являться обумовлені збуреннями перехресні зв'язки, сильно впливають на динаміку системи. При цьому неможливо синтезувати регулятори класичним способом. Тому необхідно буде зробити так звану "розв'язку каналів". В результаті вдасться уникнути впливу збурюючих впливів одного каналу на інший.

При використанні розв'язки каналів з прямою компенсацією перехресних зв'язків у моделі є два незалежних контура регулювання складових струму статора  $i_{sx}$  і  $i_{sy}$ , які в свою чергу є підлеглими по відношенню до контурів регулювання модуля вектора потокозчеплення  $\left| \dot{\Psi}_r \right|$ .

### 3.1.2 Структурна схема АД з контуром регулювання потокозчеплення ротора

Складемо структурну схему приводу з контурами регулювання змінних: вектора потокозчеплення ротора  $\dot{\Psi}_r$ ,  $i_{sx}$  і контуром управління  $u_{sx}$ , так, щоб перехресний зв'язок  $x'_s \cdot \alpha_k \cdot i_{sy}$  був обуренням, не залежних від змінних розглянутого каналу.

У такому випадку диференціальні рівняння, що описують канал управління модулем потокозчеплення ротора, будуть мати вигляд:

$$\frac{d \left| \dot{\Psi}_r \right|}{dt} = -\frac{r_R}{x_R} \cdot \left| \dot{\Psi}_r \right| + k_R \cdot r_R \cdot i_{sx}; \quad (3.12)$$

$$\frac{di_{sx}}{dt} = -\frac{r_S \cdot k_R^2 \cdot r_R}{x'_S} \cdot i_{sx} + \frac{k_R \cdot r_R}{x'_S \cdot x_R} \cdot |\dot{\Psi}_r| + \frac{1}{x'_S} \cdot u_{sx} + f_1(s), \quad (3.13)$$

де  $f_1(s) = i_{sx} - x'_S \cdot \alpha_k \cdot i_{sy}$ .

Так як рівняння щодо  $|\dot{\Psi}_r|$  і  $i_{sx}$  лінійні, то можна застосувати перетворення Лапласа.

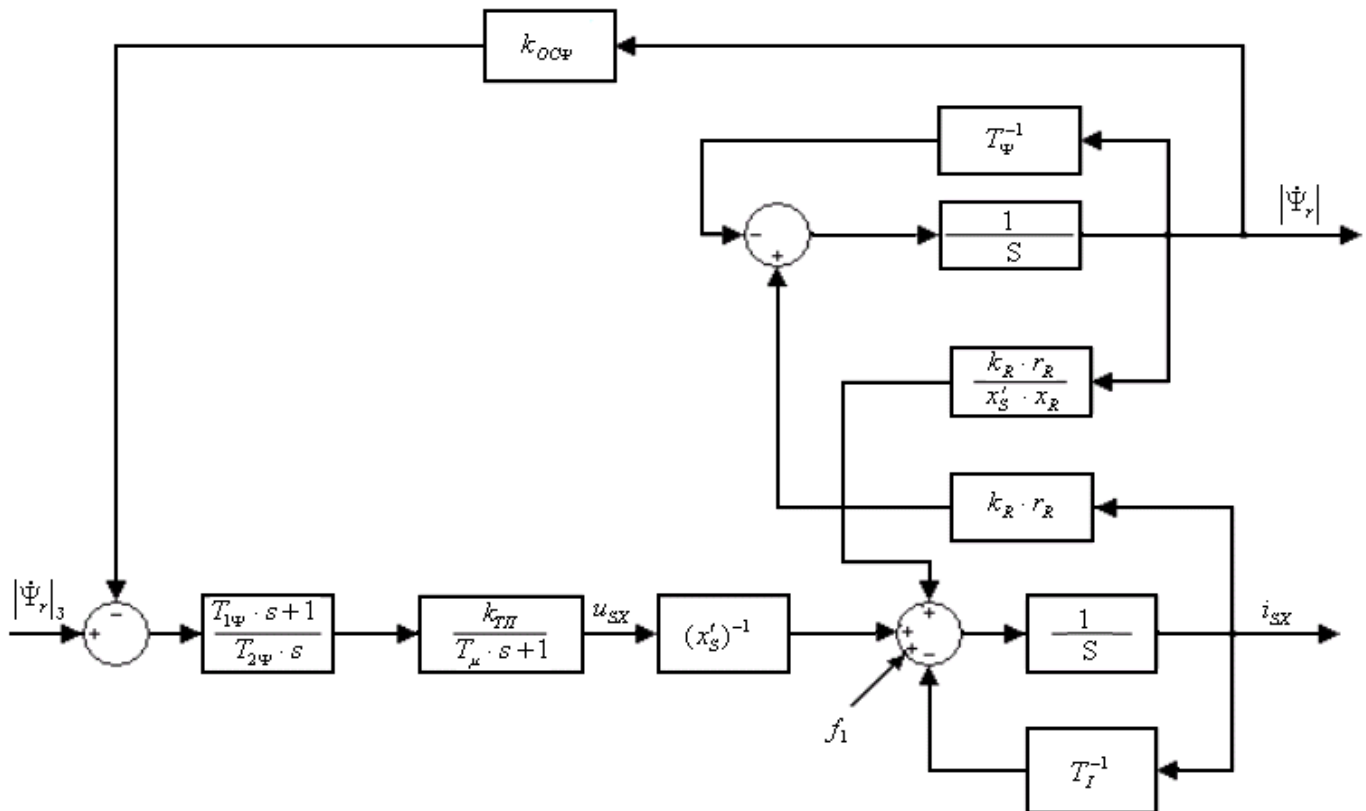


Рисунок 3.3 - Структурні схема АД з контурами регулювання змінних  $|\Psi_r|$ ,  $i_{sx}$  і контуром управління  $u_{sx}$ .

Характеристичне рівняння буде мати вигляд:

$$A(s) = \frac{r_S \cdot r_R}{\sigma \cdot x_S \cdot x_R} \cdot \left[ \sigma \cdot \frac{x_S \cdot x_R}{r_S \cdot r_R} \cdot s^2 + \left( \frac{x_S}{r_S} + \frac{x_R}{r_R} \right) \cdot s + 1 \right], \quad (3.14)$$

де  $k_S = \frac{X_m^*}{X_S^*}; \quad (3.15)$

Нормоване значення перерегулювання:

$$\sigma = 1 - k_s \cdot k_R; \quad (3.16)$$

Складемо структурну схему зовнішнього контуру управління модулем потокозчеплення ротора  $\Psi_R$  (рис. 2.29).

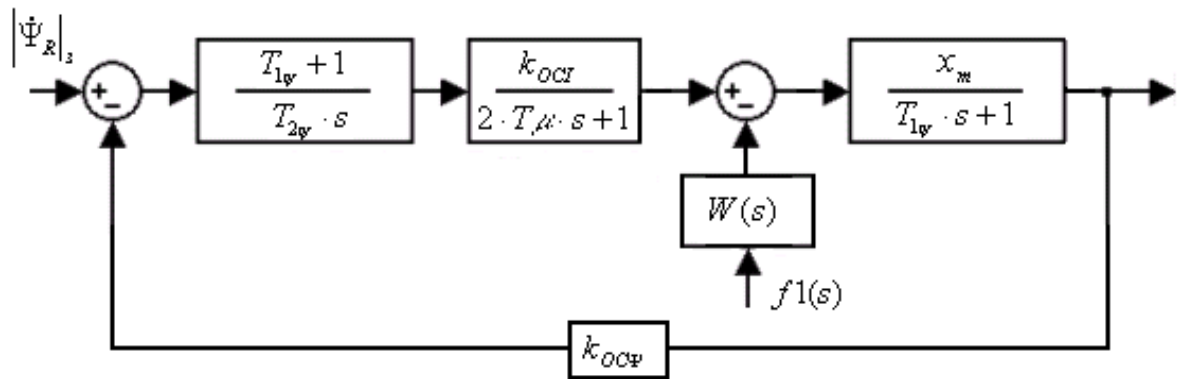


Рисунок 3.4 - Структурна схема контуру регулювання модуля потокозчеплення ротора

Передавальна функція для модуля потокозчеплення ротора щодо складової  $i_{sx}(s)$ :

$$\left| \dot{\Psi}_r \right| (s) = \frac{k_R \cdot r_R}{s + \frac{r_R}{x_R}} \cdot i_{sx}(s), \quad (3.17)$$

або при вхідному керуючому сигналі  $u_{sx}(s)$ :

$$\left| \dot{\Psi}_r \right| (s) = \frac{k_R \cdot r_R}{A(s)} \cdot u_{sx}(s). \quad (3.18)$$

На підставі отриманого співвідношення та за умови  $s_1 \ll s_2$ , можна зробити висновок, що канал управління модулем потокозчеплення ротора досить

виконати одноконтурним. При цьому вплив каналу управління кутовою швидкістю в модулі потокозчеплення ротора буде:

$$\delta \left| \dot{\Psi}_r \right| (s) = \frac{k_R \cdot r_R}{A(s)} \cdot f_1(s). \quad (3.19)$$

При замиканні контуру управління модулем потокозчеплення ротора за допомогою ПІ-регулятора з передавальною функцією:

$$W_p(s) = \frac{T_{1\Psi} \cdot s + 1}{T_{2\Psi} \cdot s}, \quad (3.20)$$

де  $T_{1\Psi} = s_1^{-1}$ , (3.21)

$$T_{2\Psi} = 2 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot \frac{k_{T.П.} \cdot x_m \cdot k_{O.C.\Psi}}{r_S}. \quad (3.22)$$

Отримаємо наступне характеристичне рівняння:

$$A(S) = 0,999S^2 + 0,202S + 3,12 \cdot 10^{-4}.$$

Це рівняння має два корені:  $S_1 = -0,00156$ ;  $S_2 = -0,201$ .

Нормована постійна часу перетворювача:

$$T_{\mu} = \frac{0,0005}{t_B}; \quad (3.23)$$

$$T_{\mu} = \frac{0,0005}{0,00318} = 0,157.$$

Нормована еквівалентна постійна часу перетворювача:

$$T_{\mu\sigma} = \frac{0,001}{t_B};$$

$$T_{\mu\sigma} = \frac{0,001}{0,00318} = 0,314.$$

Отже, використовуючи (2.89) і (2.90), отримаємо:

$$T_{1\Psi} = \frac{1}{0,00156} = 641,026;$$

$$T_{2\Psi} = 2 \cdot 0,314 \cdot \frac{1 \cdot 1,202 \cdot 1}{5,33 \cdot 10^{-3}} = 141,567.$$

Передавальна функція для модуля потокозчеплення ротора по керуючому сигналу:

$$\left| \dot{\Psi}_r \right| (s) = \frac{k_{O.C.\Psi}^{-1}}{2 \cdot T_{\mu\sigma}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot s + 1} \cdot \left| \dot{\Psi}_r \right|_3 (s). \quad (3.24)$$

Збурення від перехресного зв'язку:

$$\delta \left| \dot{\Psi}_r \right| (s) = \frac{2 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot \sigma \cdot x_m \cdot x_s}{r_s} \cdot s \cdot (T_\mu \cdot s + 1) \cdot f_1(s). \quad (3.25)$$

У разі використання в системі прямої компенсації вираз для збурення від перехресного зв'язку буде:

$$\delta \left| \dot{\Psi}_r \right| (s) = \frac{2 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot T_\mu \cdot \sigma \cdot x_m \cdot x_s \cdot s^2}{r_s} \cdot f_1(s). \quad (3.26)$$

Рівняння контуру управління  $\left| \dot{\Psi}_r \right| (s)$  по керуючому сигналу:

$$\left| \dot{\Psi}_r \right| (s) = \frac{k_{O.C.\Psi}^{-1}}{8 \cdot T_{\mu\sigma}^2 \cdot s^2 + 4 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot s + 1} \cdot \left| \dot{\Psi}_r \right|_3 (s); \quad (3.27)$$

Рівняння контуру управління  $\left| \dot{\Psi}_r \right| (s)$  по обуренню, без прямої компенсації:

$$\delta \left| \dot{\Psi}_r \right| (s) = \frac{8 \cdot T_{\mu\sigma}^2 \cdot x_m \cdot \frac{x'_s}{r_s} \cdot (T_\mu \cdot s + 1) \cdot s^2}{(8 \cdot T_{\mu\sigma}^3 \cdot s^3 + 8 \cdot T_{\mu\sigma}^2 \cdot s^2 + 4 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot s + 1) \cdot (T_1 \cdot s + 1)} \cdot f_1(s). \quad (3.28)$$

Так як електромагнітний момент асинхронної машини для змінних  $\left| \dot{\Psi}_r \right| i i_{sy}$  в системі координат, пов'язаної з вектором потокозчеплення ротора, дорівнює:

$$M_{эм} = \frac{3 \cdot p}{2} \cdot k_R \left| \dot{\Psi}_r \right| \cdot i_{sy}, \quad (3.29)$$

то при  $\left| \dot{\Psi}_r \right| = const$  електромагнітний момент  $M_{эм}$  пропорційний  $i_{sy}$  і управління електромагнітним моментом зводиться до управління складової струму  $i_{sy}$ . Диференціальне рівняння для струму  $i_{sy}$  має вид:

$$\frac{di_{sy}}{dt} = -\frac{r_s + k_R^2 \cdot r_R}{x'_s} \cdot i_{sy} + \frac{1}{x'_s} \cdot \left( u_{sx} - k_R \cdot p \cdot v \cdot \left| \dot{\Psi}_r \right| - \alpha_k \cdot x'_s \cdot i_{sx} \right).$$

Реалізуємо схему зовнішнього контуру управління модулем потокощеплення ротора в прикладному пакеті MATLAB і побудуємо графік перехідного процесу.

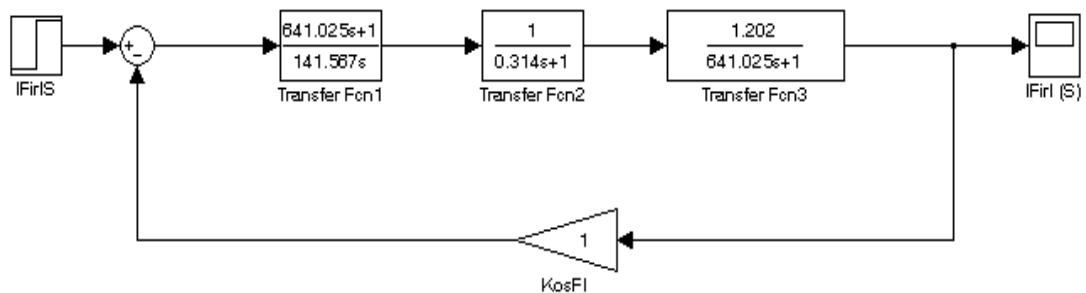


Рисунок 3.5 - Модель контуру регулювання модуля потокощеплення ротора

Результати перехідного процесу дивимося за допомогою електронного осцилографа (рис. 3.6).

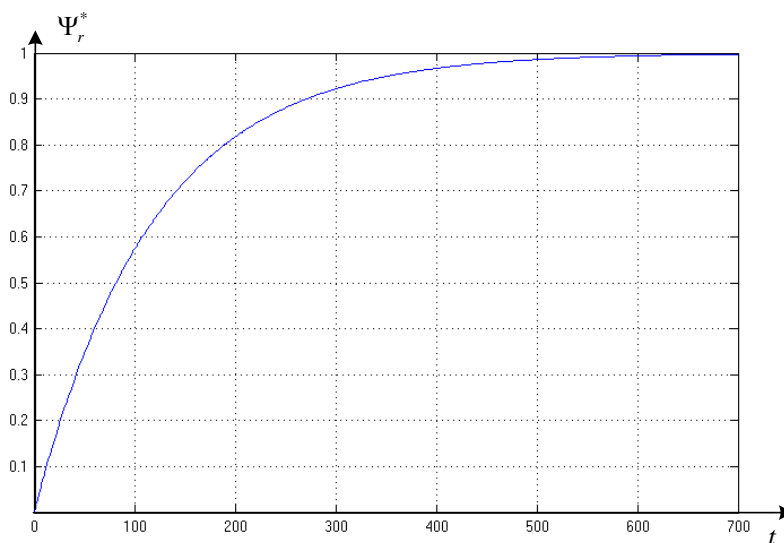


Рисунок 3.6 - Перехідний процес потокощеплення ротора

За рисунком видно, що відносний час перехідного процесу для даного контуру складає  $T_{III\psi} = 700$ . Абсолютний час перехідного процесу дорівнює:

$$t_{III\psi} = T_{III\psi} \cdot t_b, \quad (3.30)$$

$$t_{III\psi} = 700 \cdot 0,00318 = 2,229(c).$$

Проведемо аналіз стійкої роботи приводу за допомогою методу Найквіста. Для цього використовуємо електронний прикладний пакет MATLAB.

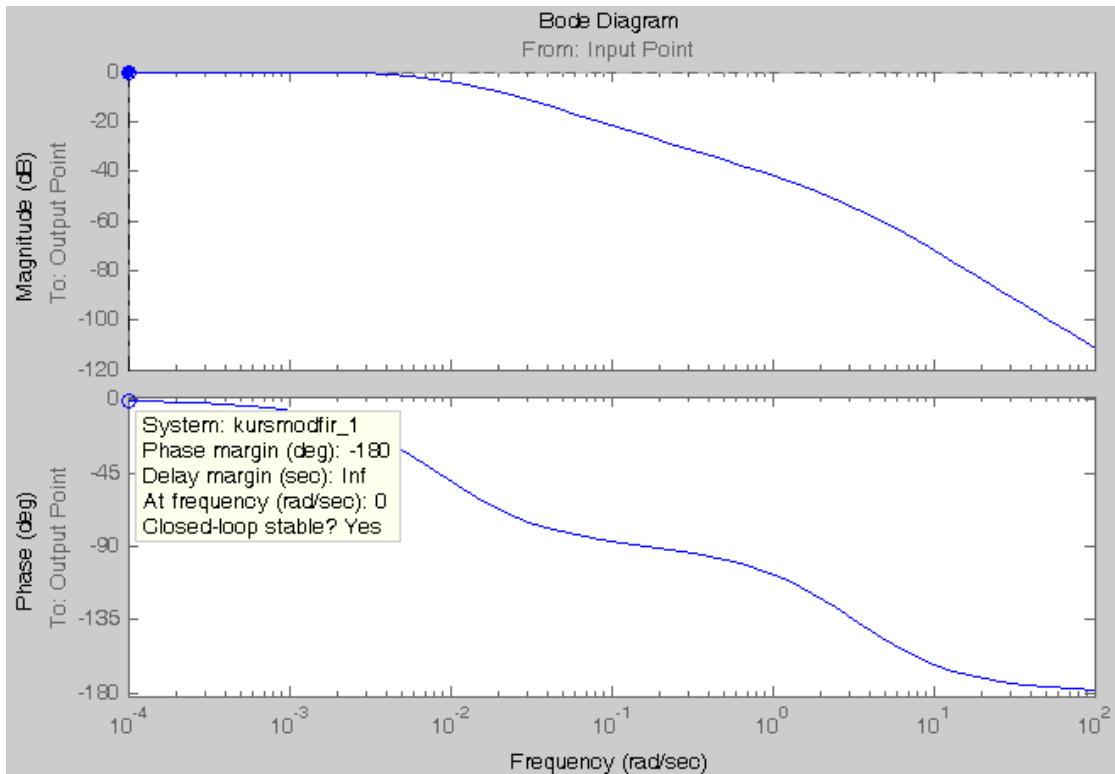


Рисунок 3.7 - Діаграма Бодє для структурної схеми контуру регулювання модуля потокощеплення ротора

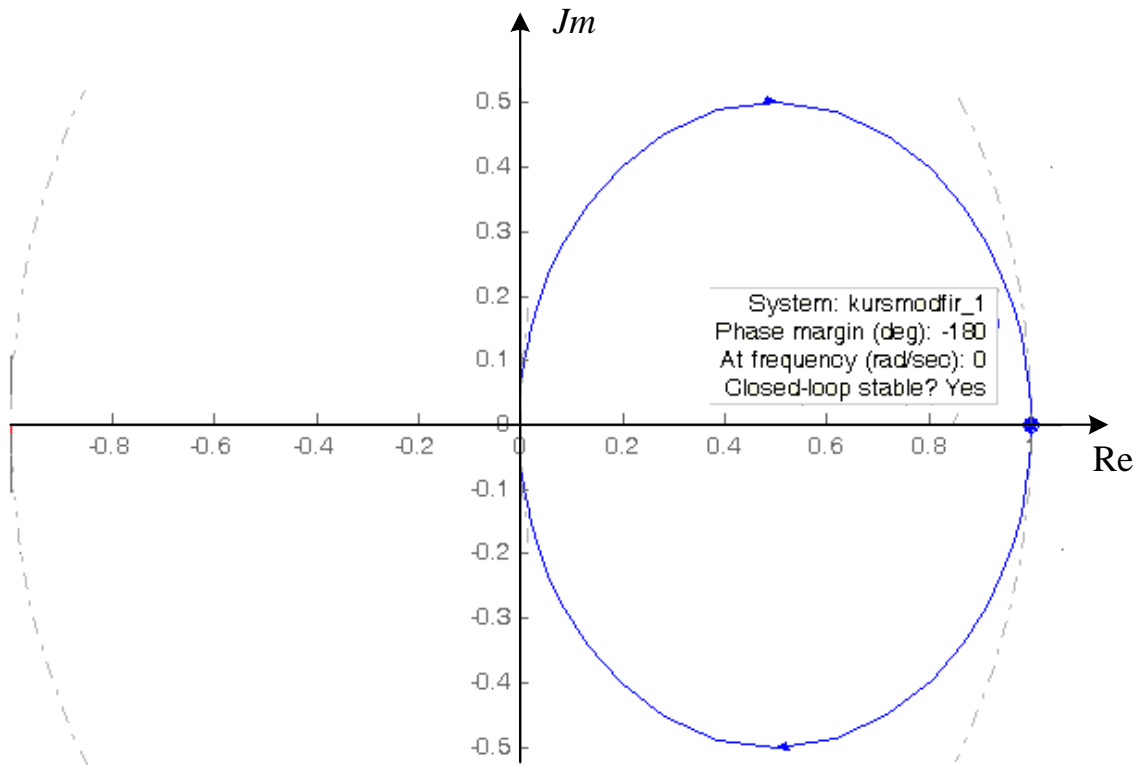


Рисунок 3.8 - Годограф Найквіста для структурної схеми зовнішнього контуру управління модулем потокозчеплення ротора

Аналізуючи діаграму Найквіста, можна говорити про те, що система стійка, так як годограф не перетинає точку з координатами (-1;0).

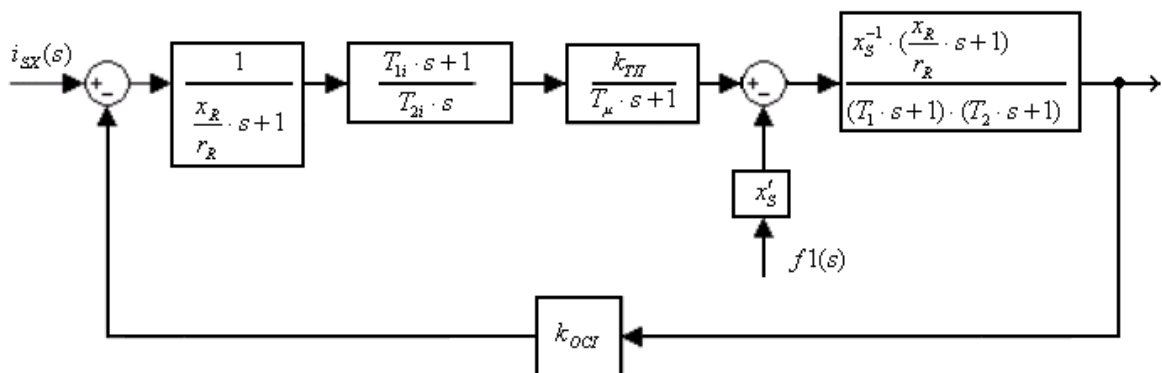


Рисунок 3.9 - Контур регулювання складової струму статора  $i_{sx}$

Для даної схеми в знаменнику передавальної функції є один суттєвий корінь, сумарний з  $\frac{r_R}{x_R}$ , а сама передавальна функція має вигляд:

$$i_{sx}(s) = \frac{\left( s + \frac{r_R}{x_R} \right)}{\frac{x'_s}{A(s)}} \cdot u_{sx}(s) . \quad (3.31)$$

Контур управління складової струму статора  $i_{sx}$  може містити ПІ-регулятор з фільтром, його рівняння по керуючому сигналу  $i_{sx3}(s)$ :

$$i_{sx}(s) = \frac{k_{O.C.I}^{-1}}{2 \cdot T_{\mu\epsilon}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_{\mu\epsilon} \cdot s + 1} \cdot i_{sx3}(s), \quad (3.32)$$

$$\text{де } T_{2i} = \frac{2 \cdot T_{\mu\epsilon} \cdot k_{T.II} \cdot k_{O.C.I}}{r_s}. \quad (3.33)$$

Рівняння ПІ-регулятора з фільтром за збуренням від перехресного зв'язку  $f_1(s)$ :

$$\delta i_{sx}(s) = \frac{\frac{2 \cdot T_{\mu\epsilon} \cdot x'_s}{r_s} \cdot \left( \frac{x_r}{r_R} \cdot s + 1 \right) \cdot (T_\mu \cdot s + 1) \cdot s}{\left( 2 \cdot T_{\mu\epsilon} \cdot T_2 \cdot T_\mu \cdot s^3 + 2 \cdot T_{\mu\epsilon}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_{\mu\epsilon} \cdot s + 1 \right) \cdot (T_1 \cdot s + 1)} \cdot f_1(s). \quad (3.34)$$

При визначенні передавальної функції по керуючому сигналу поліноми, що відповідають малим постійним часу  $T_\mu$  і  $T_2$  були замінені поліномом першого степеня з постійним часу, що дорівнює  $T_{\mu\epsilon}$ , а при обчисленні передавальної функції по обуренню враховувалися обидва полінома.

У випадку використання прямої компенсації, обурення від перехресного зв'язку:

$$\delta i_{sx}(s) = \left[ 2 \cdot T_{\mu\epsilon} \cdot \frac{x'_s}{r_s} \cdot \left( \frac{x_r}{r_R} \cdot s + 1 \right) \cdot T_\mu \cdot s^2 \cdot f_1(s) \right] \times \\ \times \left[ \left( 2 \cdot T_{\mu\epsilon} \cdot T_2 \cdot T_\mu \cdot s^3 + 2 \cdot T_{\mu\epsilon}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_{\mu\epsilon} \cdot s + 1 \right) \cdot (T_1 \cdot s + 1) \right]^{-1} \quad (3.35)$$

$$T_{li} = 0,5 \cdot \left( \frac{x_S}{r_S} + \frac{x_R}{r_R} \right); \quad (3.36)$$

$$T_{li} = 0,5 \cdot \left( \frac{1,223}{5,33 \cdot 10^{-3}} + \frac{1,223}{2,92 \cdot 10^{-3}} \right) = 323,934.$$

$$T_{2i} = 2 \cdot \frac{T_{\mu Z}}{r_S}; \quad (3.37)$$

$$T_{2i} = 2 \cdot \frac{0,314}{5,33 \cdot 10^{-3}} = 117,75.$$

Реалізуємо схему в MATLAB і побудуємо графік перехідного процесу. Структурна схема контуру регулювання складової струму  $i_{sx}$  виглядає наступним чином (рис. 3.10).

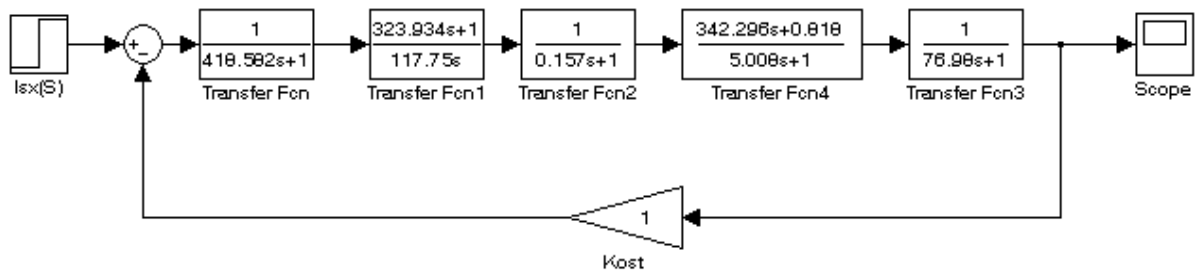


Рисунок 3. 10 - Модель контуру регулювання складової струму  $i_{sx}$ .

Результати моделювання можна оцінити за допомогою осцилографа.

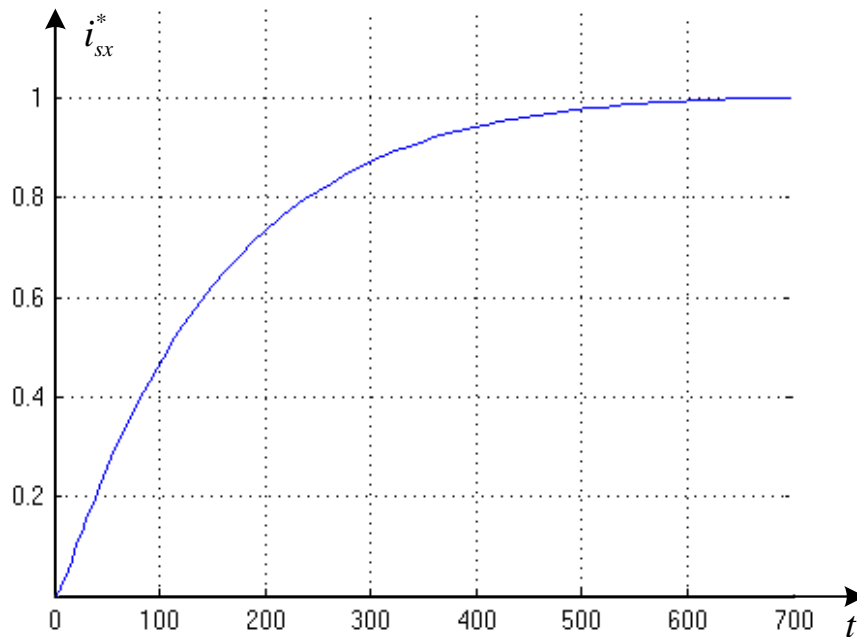


Рисунок 3.11 - Перехідний процес складової струму статора  $i_{sx}$

За малюнком видно, що відносний час перехідного процесу для даного контуру складатиме  $T_{mix} = 700$ . Абсолютний час перехідного процесу дорівнюватиме:

$$t_{mix} = 700 \cdot 0,00318 = 2,229(c).$$

Проведемо аналіз стійкої роботи приводу за допомогою методу Найквіста. Годограф за критерієм Найквіста виведемо за допомогою електронного прикладного пакета MATLAB.

Частотні характеристики задовольняють вимогам стійкості, причому запас стійкості системи по амплітуді склав 60,3, по фазі – 180 град.

По рис. 3.13 видно, що годограф Найквіста не перетинає точку з координатами (-1; 0). Це говорить про стійкість системи.

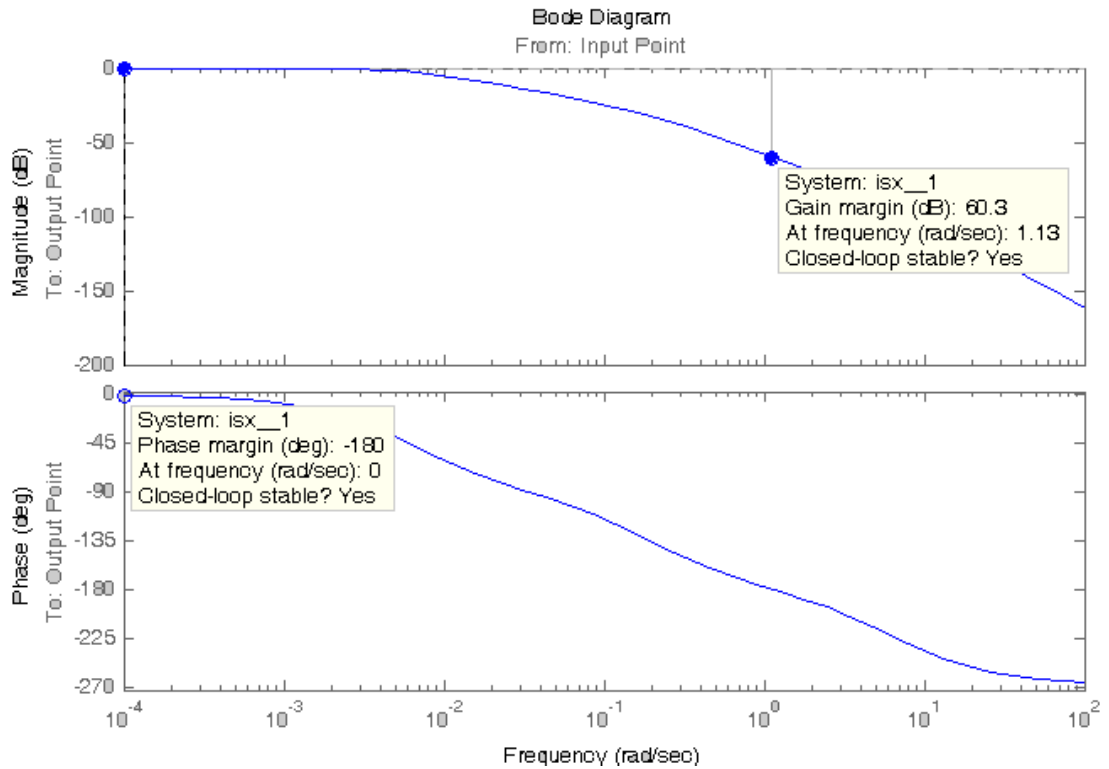


Рисунок 3.12 - Діаграма Бодє для структурної схеми контуру регулювання складової струму  $i_{sx}$ .

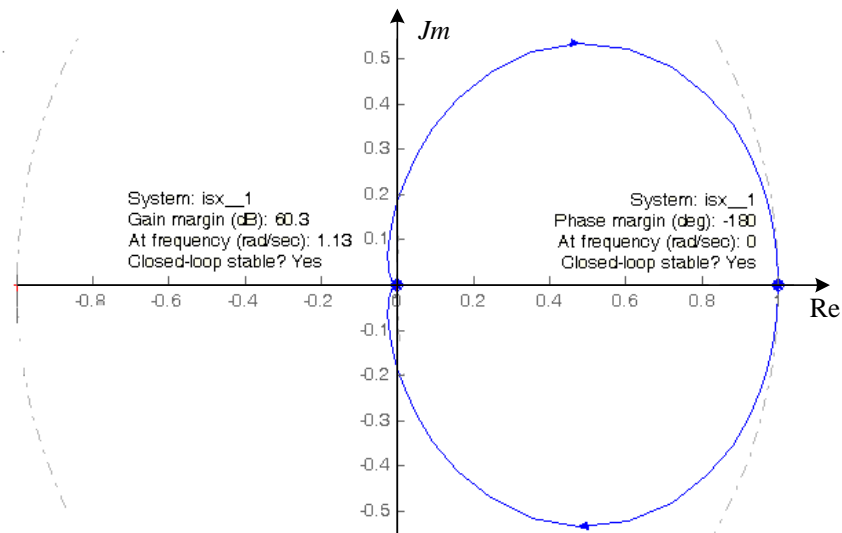


Рисунок 3.13 - Годограф Найквіста для структурної схеми контуру регулювання складової струму  $i_{sx}$

### 3.1.3 Структурна схема з ПІ-регулятором і еталонної моделлю.

Складемо структурну схему контуру складової  $i_{sy}$  з ПІ-регулятором в основному каналі і додатково введемо контур з еталонною моделлю.

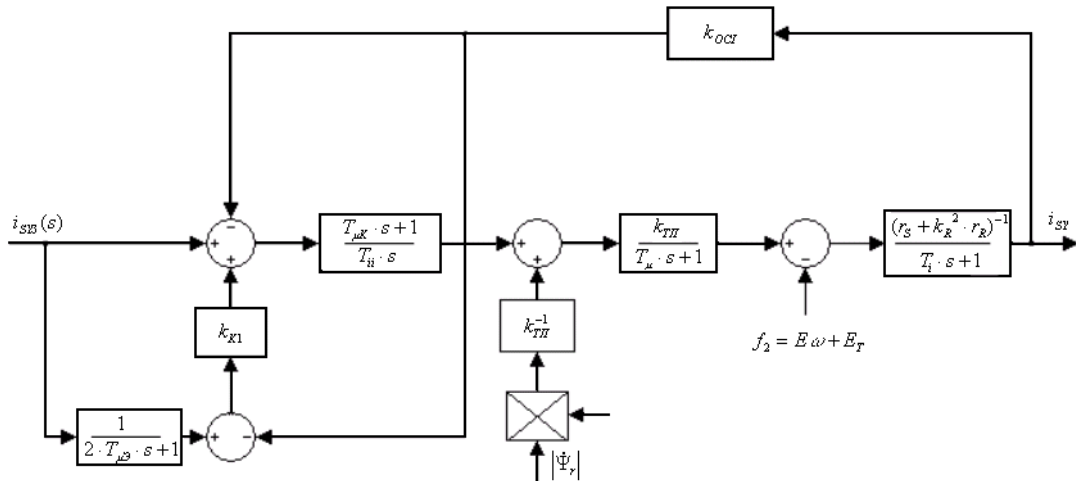


Рисунок 3.14 - Контур складової  $i_{sy}$  з ПІ-регулятором в основному каналі і контуром з еталонною моделлю

Так як електрорушійна сила частоти обертання  $E_\omega = k_R \cdot p \cdot v \cdot \left| \dot{\Psi}_r \right|$  становить приблизно  $0,9 \cdot u_{sy}$ , доцільно використовувати пряму компенсацію  $E_\omega$ .

Постійні часу ПІ-регулятора:

$$T_i = \frac{x'_s}{r_s + k_R^2 \cdot r_R}; \quad (3.38)$$

$$T_i = \frac{4,085 \cdot 10^{-2}}{5,33 \cdot 10^{-3} + 0,983^2 \cdot 2,92 \cdot 10^{-3}} = 5,008$$

$$T_{ii} = 2 \cdot T_{\mu3} / (r_s + k_R^2 \cdot r_R) \cdot k_{T.II} \cdot k_{O.C.T.} \quad (3.39)$$

$$T_{ii} = 2 \cdot 0,314 / (5,33 \cdot 10^{-3} + 0,983^2 \cdot 2,92 \cdot 10^{-3}) \cdot 1 \cdot 1 = 76,987$$

При цих налаштуваннях вихідна складова струму по керуючому входу:

$$i_{sy}(s) = \frac{\left( \frac{2 \cdot T_{\mu\theta}}{k_{k1} + 1} \cdot s + 1 \right) \cdot k_{O.C.T}^{-1}}{\left( \frac{2 \cdot T_{\mu\theta}^2}{k_{k1} + 1} \cdot s^2 + \frac{2 \cdot T_{\mu\theta}}{k_{k1} + 1} \cdot s + 1 \right) \cdot (2 \cdot T_{\mu\theta} \cdot s + 1)} \cdot i_{sy}(s). \quad (3.40)$$

Вихідна складова струму по збурюючій дії ( $E_\omega, E_T$ )

$$\delta i_{sy}(s) = \left[ \frac{2 \cdot T_{\mu\theta}}{k_{k1} + 1} \cdot s \cdot (T_{\mu\theta} \cdot s + 1) \cdot (r_s + k_R^2 \cdot r_R)^{-1} \cdot \left( \frac{T_\mu \cdot s}{T_\mu \cdot s + 1} \cdot E_\omega + E_T \right) \right] \times \\ \times \left[ \left( \frac{2 \cdot T_{\mu\theta}^2}{k_{k1} + 1} \cdot s^2 + \frac{2 \cdot T_{\mu\theta}}{k_{k1} + 1} \cdot s + 1 \right) (T_{\mu\theta} \cdot s + 1) \right]^{-1}, \quad (3.41)$$

Де  $T_\mu = \sum T_i$ ;  $T_i$  - малі постійні часу.

Трансформаторна ЕРС  $E_T$  пригнічується слабкіше, ніж ЕРС обертання  $E_\omega$ .

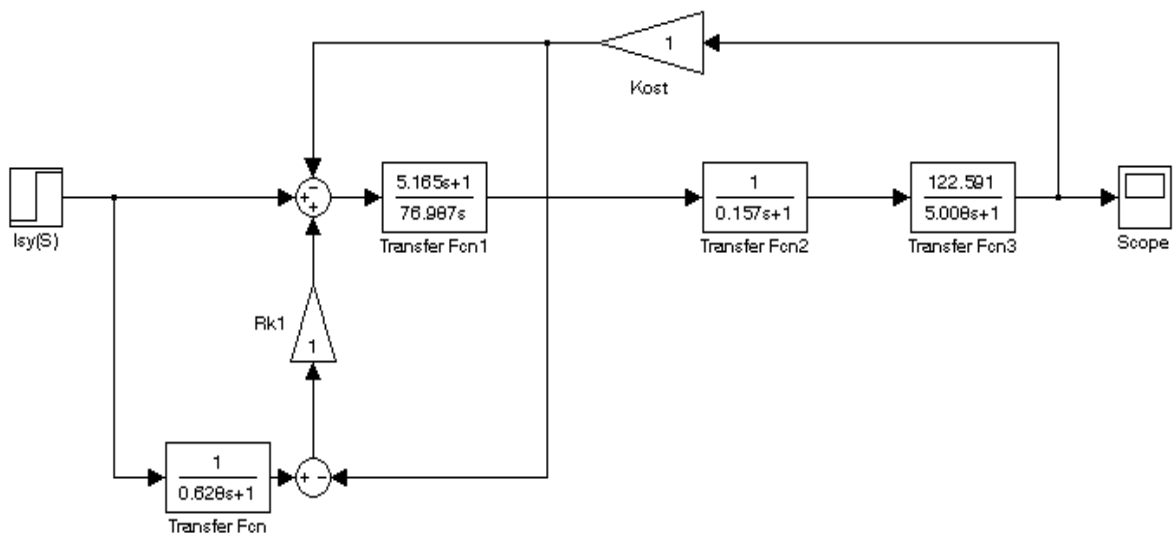


Рисунок 3.15 - Модель контуру складової  $i_{sy}$  з ПІ-регулятором в основному каналі і контуром з еталонною моделлю

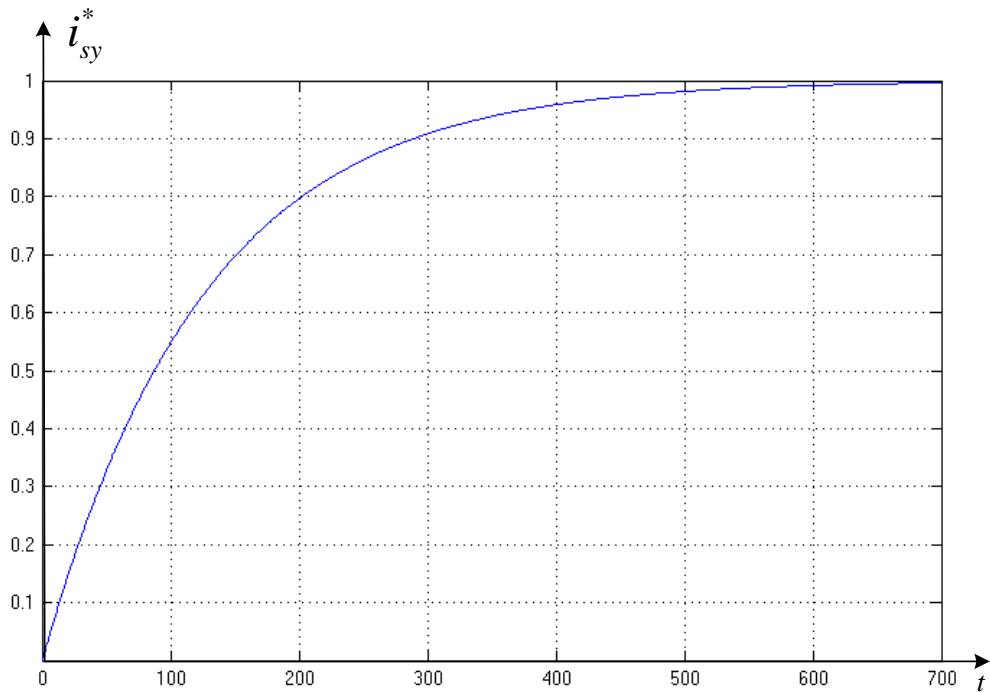


Рисунок 3.16 - Перехідний процес складової струму статора  $i_{sy}$

Форма кривої на графіку дозволяє судити про правильність розрахунку коефіцієнтів регулятора.

За рисунком видно, що відносний час перехідного процесу для даного контуру склав  $T_{\text{пий}} = 700$ .

Абсолютний час перехідного процесу дорівнюватиме:

$$t_{\text{пий}} = 700 \cdot 0,00318 = 2,229(c).$$

Проведемо аналіз стійкої роботи приводу за допомогою методу Найквіста. Для цього використовуємо електронний прикладний пакет MATLAB.

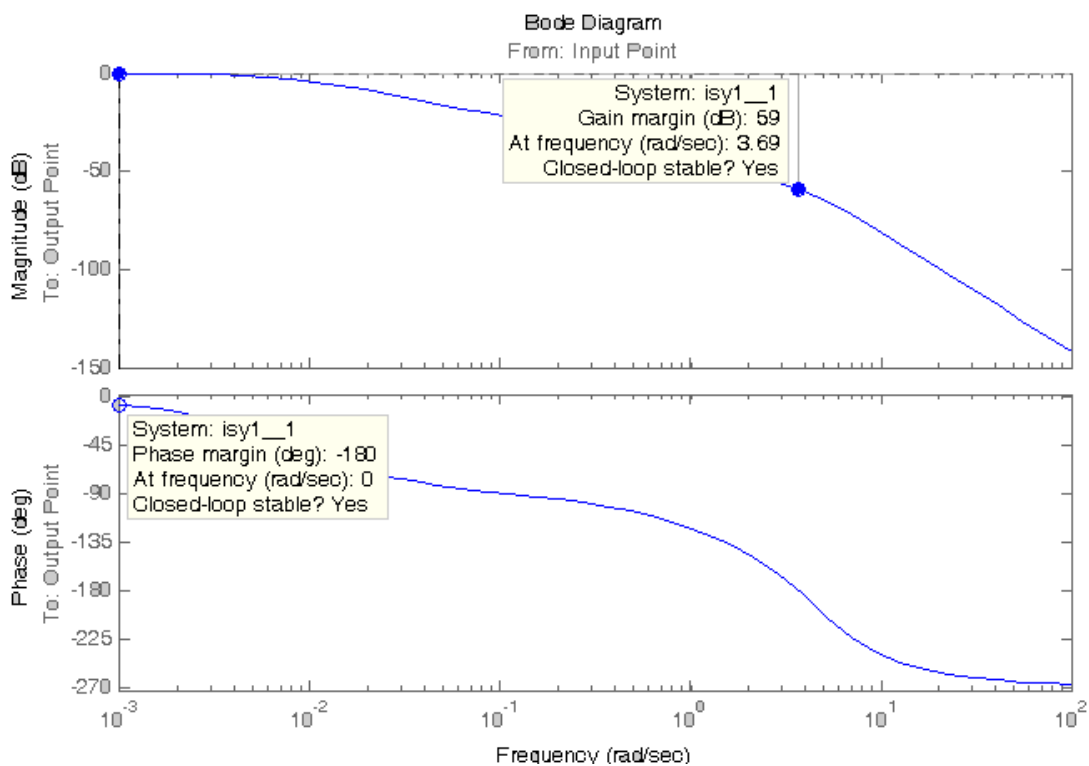


Рисунок 3.17 - Діаграма Бодє для структурної схеми складової струму статора  $i_{sy}$

Частотні характеристики задовольняють вимогам стійкості, причому запас стійкості системи по амплітуді склав 59, по фазі – 180 град.

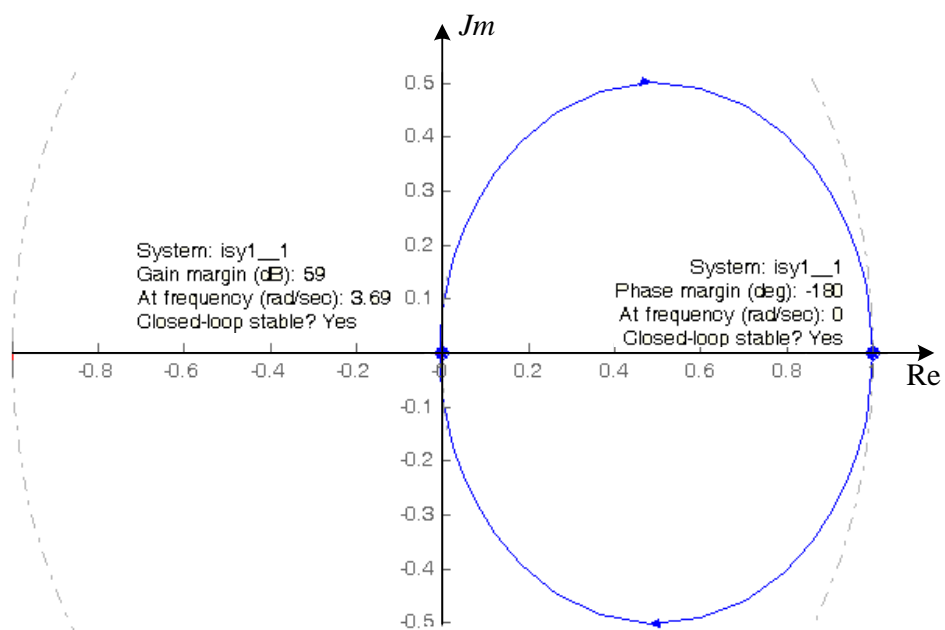


Рисунок 3.18 - Годограф Найквіста для структурної схеми складової струму статора  $i_{sy}$

По рис. 3.18 видно, що годограф Найквіста не перетинає точку з координатами  $(-1; 0)$ , що говорить про стійкість системи.

### 3.1.4 Математична модель асинхронного електроприводу

Для розв'язки контуру управління складовими струму  $i_{sy}$  і  $i_{sx}$  можна застосувати перехресні зв'язки за сигналами управління  $u_{sx}$  і  $u_{sy}$ .

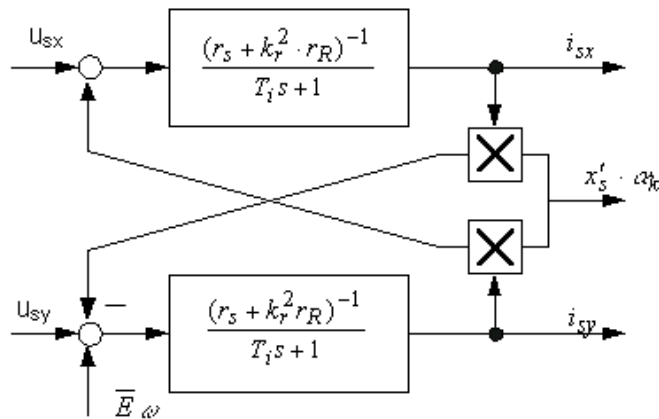


Рисунок 3.19 - Перехресні зв'язки за сигналами управління  $u_{sx}$  і  $u_{sy}$

Формально вихідні сигнали  $i_{sx}(D)$  і  $i_{sy}(D)$ , де  $D \leftrightarrow d/dt$ , будуть

$$i_{sx}(D) = \frac{W_i(D) \cdot [u_{sx}(D) + x'_s \cdot \alpha_k \cdot W_i(D) \cdot u_{sy}(D)]}{1 + (x'_s \cdot \alpha_k)^2 \cdot W_i^2(D)}; \quad (3.42)$$

$$i_{sy}(D) = \frac{W_i(D) \cdot [u_{sy}(D) - x'_s \cdot \alpha_k \cdot W_i(D) \cdot u_{sx}(D)]}{1 + (x'_s \cdot \alpha_k)^2 \cdot W_i^2(D)}. \quad (3.43)$$

Зробимо заміну змінних:

$$u_{sx}(D) = W_{11}(D) \cdot u'_{sx}(D) + W_{12}(D) \cdot u'_{sy}(D); \quad (3.44)$$

$$u_{sy}(D) = W_{12}(D) \cdot u'_{sx}(D) + W_{22}(D) \cdot u'_{sy}(D), \quad (3.45)$$

і визначимо  $W_{ij}(D)$ , так щоб  $i_{sx}$  і  $i_{sy}$  залежали тільки від  $u'_{sx}$  і  $u'_{sy}$ . Тоді, щодо  $u'_{sx}$  і  $u'_{sy}$ , складові струму  $i_s$  будуть незалежно керованими.

Форсуючий поліном фільтра  $(T_\mu s + 1)$  буде компенсувати вплив інерційності перетворювача частоти.

Система рівняння для двигуна електропривода:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d|\dot{\Psi}_r|}{dt} &= -\frac{r_R}{x_R} \cdot |\dot{\Psi}_r| + k_R \cdot r_R \cdot i_{SX}, \\ \frac{di_{SX}}{dt} &= -\frac{r_S \cdot k_R^2 \cdot r_R}{x'_S} \cdot i_{SX} + \frac{k_R \cdot r_R}{x'_S \cdot x_R} \cdot |\dot{\Psi}_r| + \alpha_K \cdot i_{SX} + \frac{1}{x'_S} \cdot u_{SX}, \\ \frac{di_{SY}}{dt} &= -\frac{r_S \cdot k_R^2 \cdot r_R}{x'_S} \cdot i_{SY} - \alpha_K \cdot i_{SX} - \frac{k_R}{x'_S} \cdot p \cdot v \cdot |\dot{\Psi}_r| + \frac{1}{x'_S} \cdot u_{SY}, \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{3 \cdot k_R \cdot p}{2 \cdot J} \cdot |\dot{\Psi}_r| \cdot i_{SX}, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{3 \cdot k_R \cdot p}{2 \cdot J} \cdot |\dot{\Psi}_r| \cdot i_{SX} - \frac{1}{J} \cdot M_C, \\ |\dot{\Psi}_r| \cdot (\omega_{\Psi_r} - p \cdot \omega) &= k_R \cdot r_R \cdot i_{SX}. \end{aligned} \right\} \quad (3.46)$$

Враховуючи всі вищенаведені математичні, а також структурні моделі та схеми, можна представити модель асинхронного електроприводу, де вже є "розв'язки" каналів регулювання системи (рис. 3.20.).

Для цієї моделі також були розраховані всі необхідні ко-коефіцієнти регуляторів:

$$T_\psi = T_{1\psi}; \quad (3.47)$$

$$T_\psi = 641,026;$$

$$T_{H\psi} = T_{2\psi}; \quad (3.48)$$

$$T_{H\psi} = 141,567;$$

$$a_{\psi i} = \frac{k_R \cdot r_R}{x'_S \cdot x_R}; \quad (3.49)$$

$$a_{\psi i} = \frac{0,983 \cdot 2,92 \cdot 10^{-3}}{4,085 \cdot 10^{-2} \cdot 1,223} = 0,057;$$

$$a_{i\Psi} = b_{i\Psi} = k_R \cdot r_R; \quad (3.50)$$

$$a_{i\Psi} = b_{i\Psi} = 0,983 \cdot 2,92 \cdot 10^{-3} = 2,872 \cdot 10^{-3};$$

$$a_{oi} = \frac{k_R \cdot p}{x'_S}; \quad (3.51)$$

$$a_{oi} = \frac{0,983 \cdot 2}{4,085 \cdot 10^{-2}} = 48,133$$

$$k_M = \frac{3 \cdot p \cdot k_R}{2}; \quad (3.52)$$

$$k_M = \frac{3 \cdot 2 \cdot 0,983}{2} = 2,949.$$

При настройці контура на технічний оптимум передаточна функція розімкненого контуру:

$$W_{PA3}(s) = \frac{1}{2 \cdot T_0 \cdot s \cdot (T_0 \cdot s + 1)}; \quad (3.53)$$

Тобто регулятор в контурі швидкості повинен бути ІІІ-регулятором з коефіцієнтом підсилення:

$$K_{II} = \frac{T_m}{2 \cdot T_0}; \quad (3.54)$$

Час перехідного процесу:

$$t_p = (3 \div 4) \cdot T_r; \quad (3.55)$$

Задаємося:

$$t_p = 3 \cdot T_r; \quad (3.56)$$

$$t_p = 3 \cdot 233,12 = 699,36;$$

За модульним оптимуму час перехідного процесу:

$$t_p = 8,4 \cdot T_0; \quad (3.57)$$

Прирівнюємо формули (2.107) і (2.108) і виражаємо  $T_0$ .

Велика некомпенсовані постійна часу:

$$T_0 = \frac{3 \cdot T_r}{8,4}. \quad (3.58)$$

Підставивши формулу (2.126) в (2.122) можна обчислити коефіцієнт підсилення для ПІ-регулятора:

$$K_{II} = \frac{T_m \cdot 8,4}{6 \cdot T_r}; \quad (3.59)$$

$$K_{II} = \frac{293,63 \cdot 8,4}{6 \cdot 233,12} = 0,982;$$

Математична модель асинхронного електроприводу містить блок завдання швидкості, де задається значення у відносних одиницях згідно з формулою:

$$P = \frac{\omega_1}{\omega_b}; \quad (3.60)$$

де  $\omega_1$  – кутова номінальна швидкість двигуна;  
 $\omega_b$  – базова швидкість машини.

$$P = \frac{156,62}{314} = 0,497.$$

У блоці завдання потоку  $P_3 = 1$ .

Результатами моделювання є графіки зміни регульованих координат ЕП протягом перехідного процесу. Оцінимо їх допомогою електронного осцилографа прикладного пакета MATLAB (рис. 2.46).

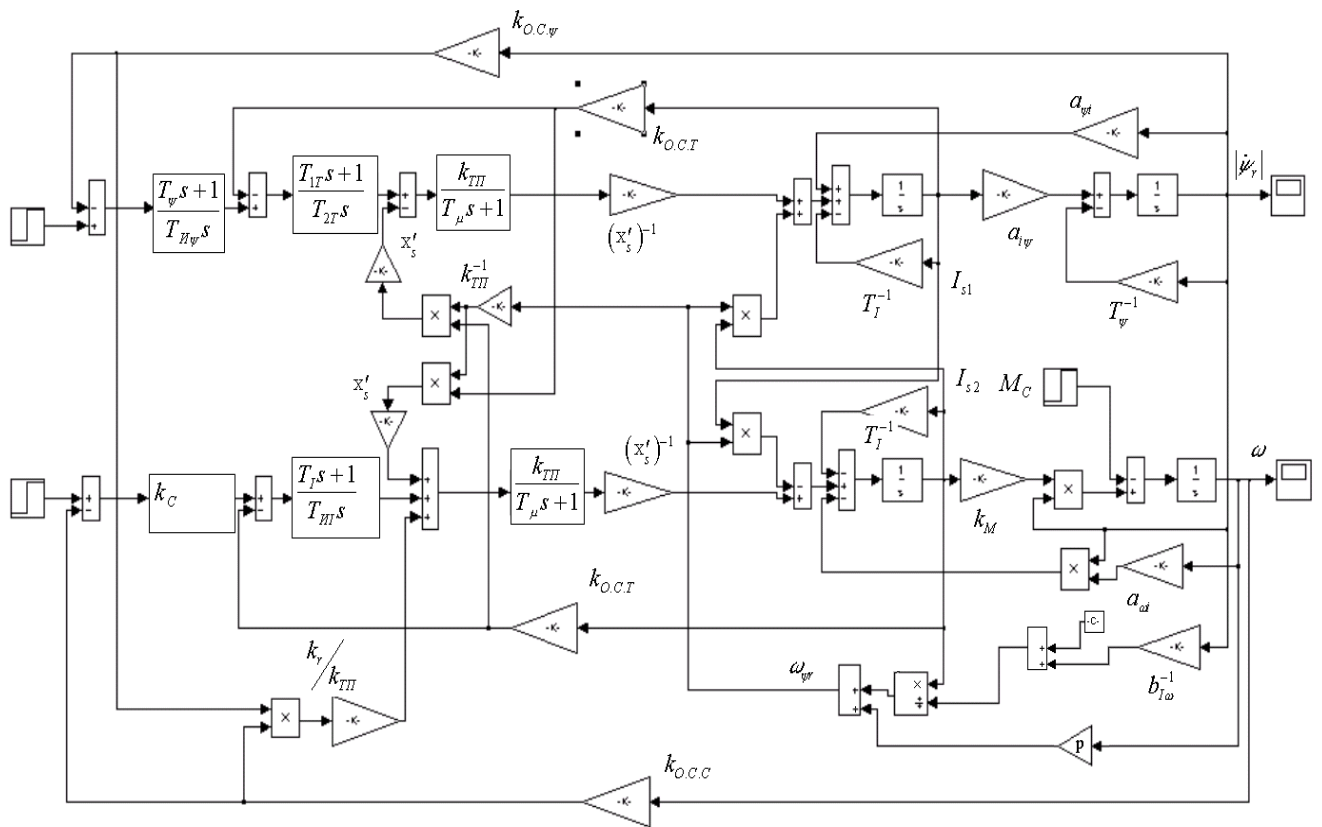


Рисунок 3.20 Математична модель асинхронного електроприводу

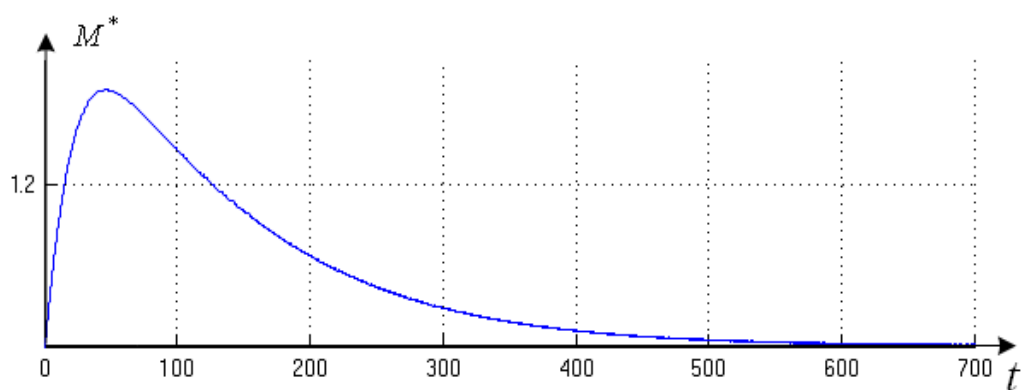
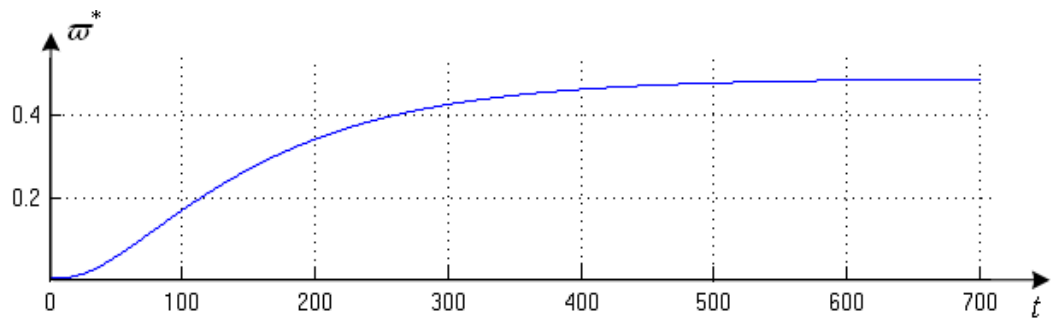


Рисунок 3.21 - Графіки перехідних процесів швидкості та моменту

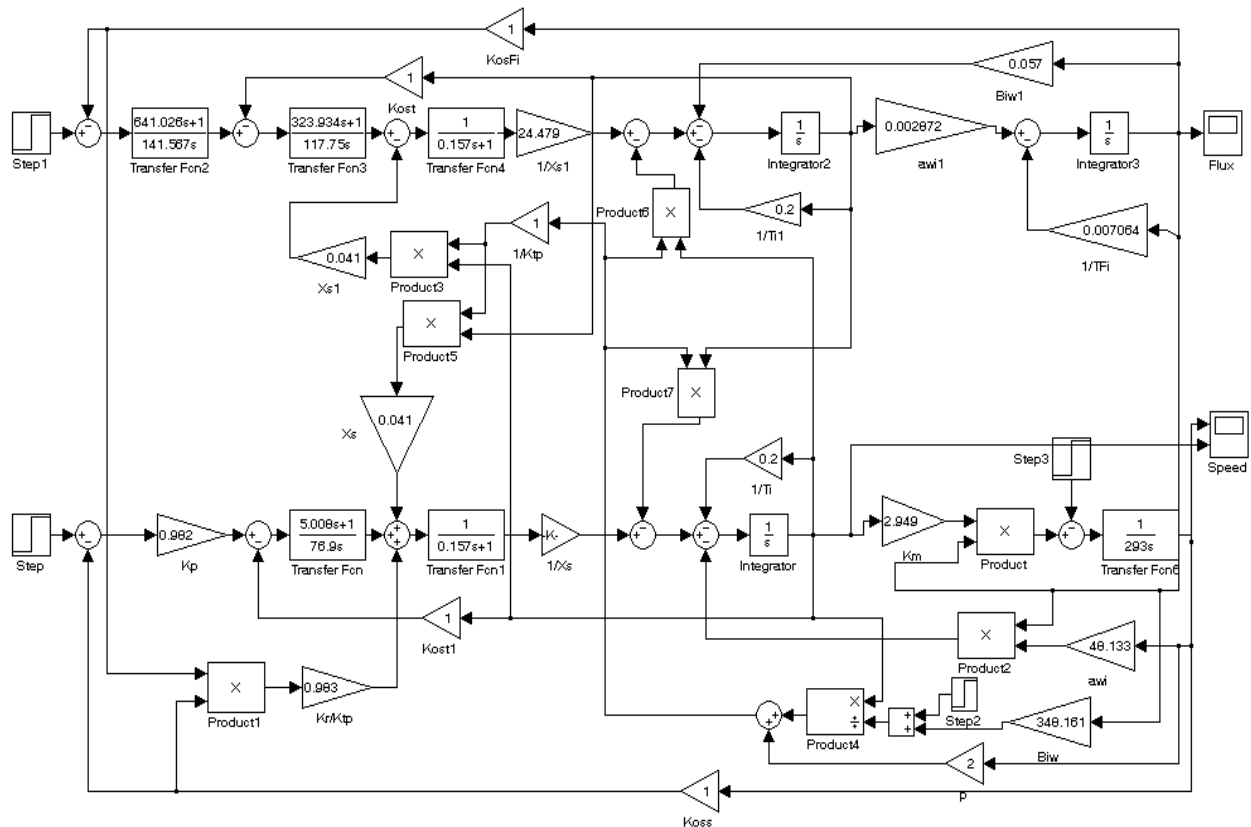


Рисунок 3.22 - Модель асинхронного електроприводу

Аналізуючи перехідний процес при пуску асинхронного електроприводу брикет-преса можна відзначити, що швидкість машини виходить на рівень відповідно до завдання за 700 відносних одиниць. Переводимо цей час в реальний час пуску електроприводу:

$$t_{\text{пуск}} = 700 \cdot 0,00318 = 2,229(c).$$

Час пуску відповідає розрахованому часу пуску приводу.

Проведемо аналіз стійкості системи за допомогою методу Найквіста. Скористаємося електронним прикладним пакетом MATLAB, зокрема використовуючи System identification toolbox.

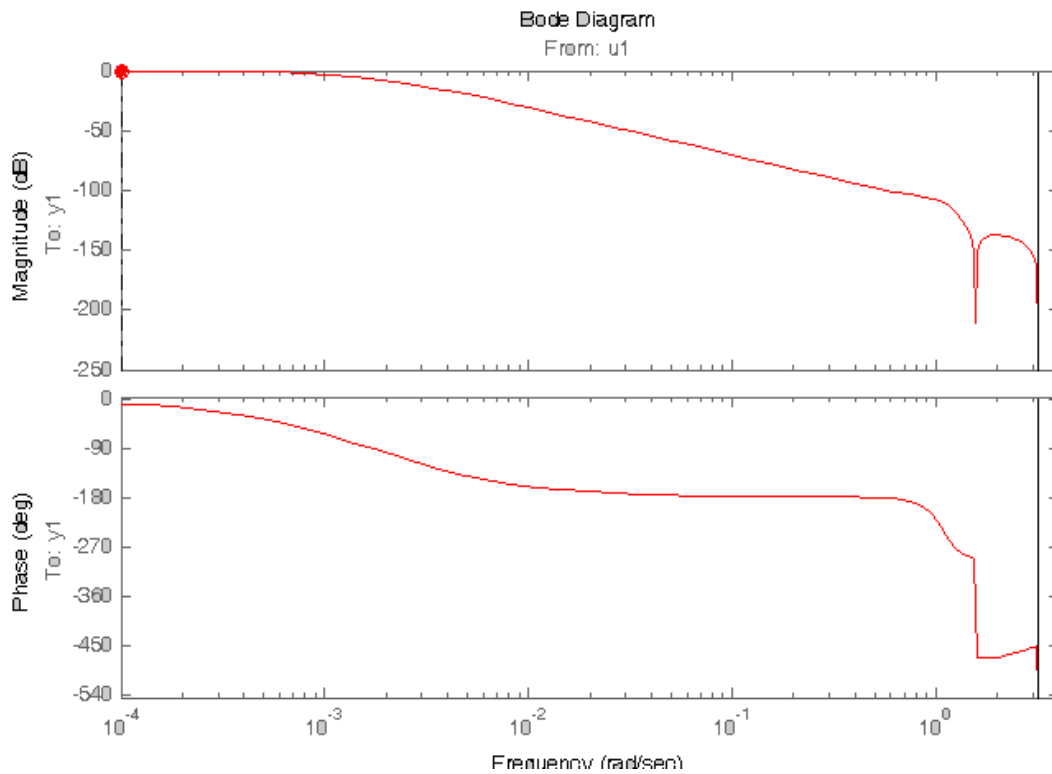


Рисунок 3.23 - Діаграма Бode для каналу керування швидкістю ротора

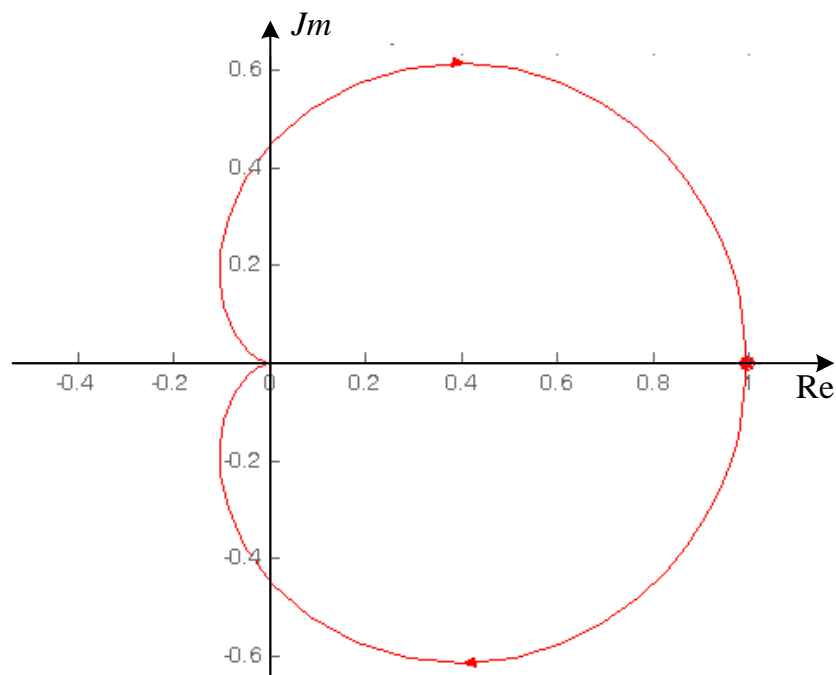


Рисунок 3.24 - Годограф Найквіста для каналу керування швидкістю ротора

На рис. 3.24 видно, що годограф Найквіста не перетинає точку з координатами  $(-1; 0)$ , що говорить про стійкість системи.

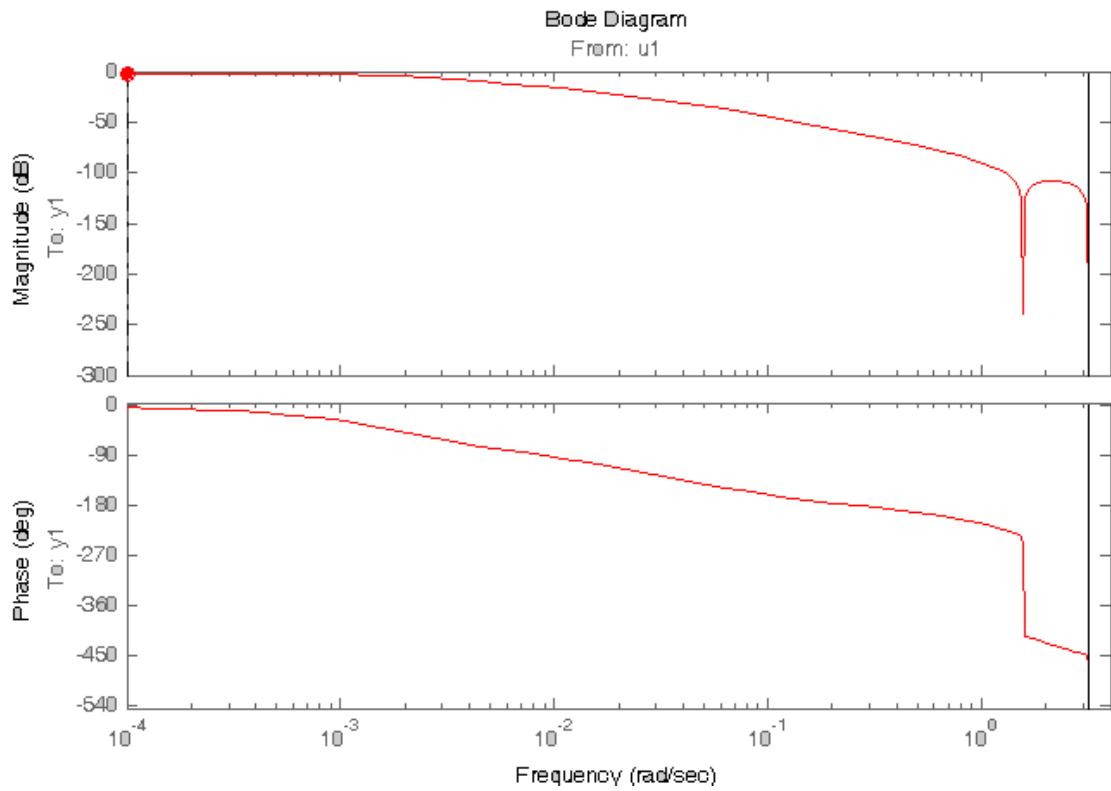


Рисунок 3.25 - Діаграма Бode для каналу регулювання модуля потокозчеплення ротора

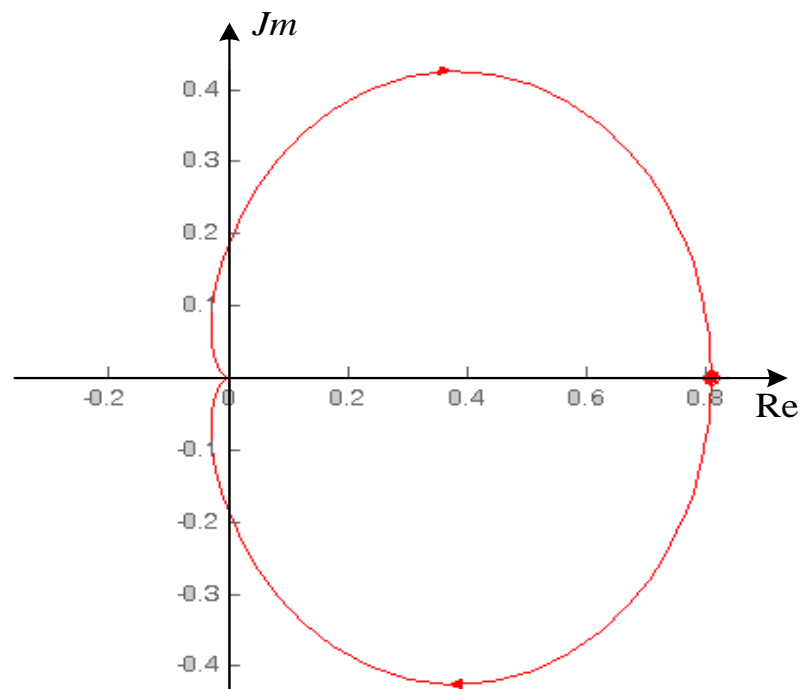


Рисунок 3.26 - Годограф Найквіста для каналу регулювання модуля потокозчеплення ротора

Аналізуючи діаграму Найквіста, можна говорити про те, що система стійка, так як годограф не перетинає точку з координатами (-1; 0).

### 3.2 Скалярне управління електроприводом брикет-преса

При такому управлінні рівняння механічної характеристики двигуна має вигляд:

$$(1 + T_{\vartheta}) \cdot M = \beta \cdot (\varpi_0 - \varpi); \quad (3.61)$$

В системі ПЧ-АД синхронна частота обертання статора:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot K_{yc}}{p} \cdot u_{yc}; \quad (3.62)$$

Тоді коефіцієнт управління частотою:

$$K_{yc} = \frac{f}{u_{yc}}; \quad (3.63)$$

$$K_{yc} = \frac{50}{10} = 5 \left( \frac{pad}{c \cdot B} \right);$$

Доповнивши (3.61 і (3.62) рівнянням руху (2.61), отримаємо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} (1 + T_{\vartheta}) \cdot M &= \beta \cdot (\varpi_0 - \varpi) \\ \omega_0 &= \frac{2 \cdot \pi \cdot K_{yc}}{p} \cdot u_{yc} \\ M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3.64)$$

Використовуючи систему (2.132), складемо структурну схему системи ПЧ-АД.

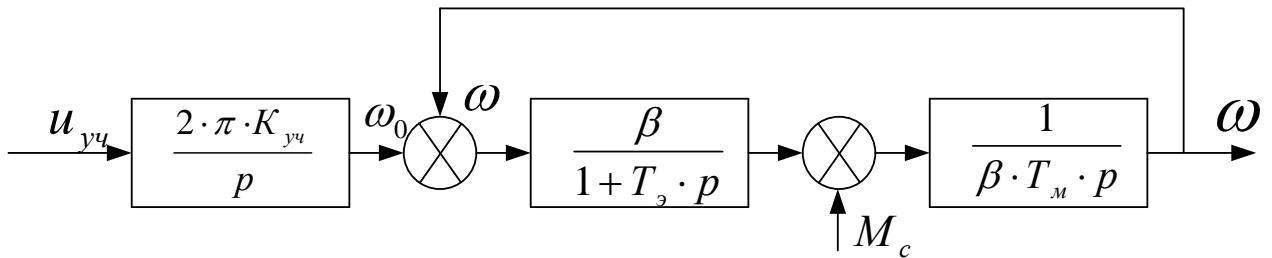


Рисунок 3.27 - Структурна схема лінеаризовані системи ПЧ-АД

Модуль жорсткості лінеаризовані механічної характеристики:

$$\beta = \frac{2 \cdot M_k}{\varpi_0 \cdot S_k}; \quad (3.65)$$

$$\beta = \frac{2 \cdot 10880}{157 \cdot 0,028} = 4949,95 (H \cdot m \cdot c);$$

Електромагнітна постійна часу двигуна:

$$T_э = \frac{1}{\varpi_{0эл} \cdot S_k}; \quad (3.66)$$

$$T_э = \frac{1}{314 \cdot 0,028} = 0,114 (c);$$

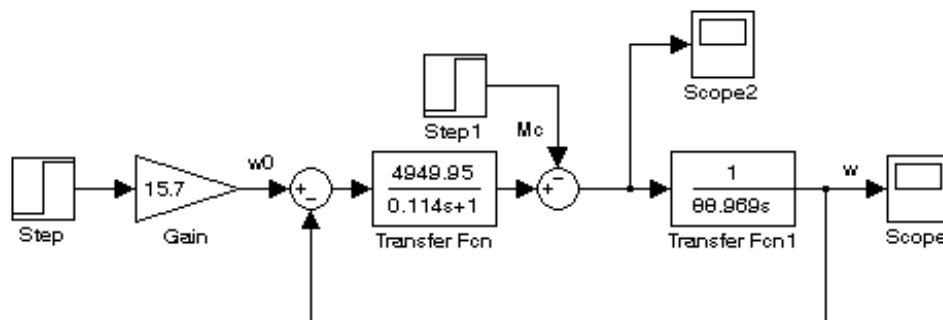


Рисунок 3.28 - Модель системи ПЧ-АД

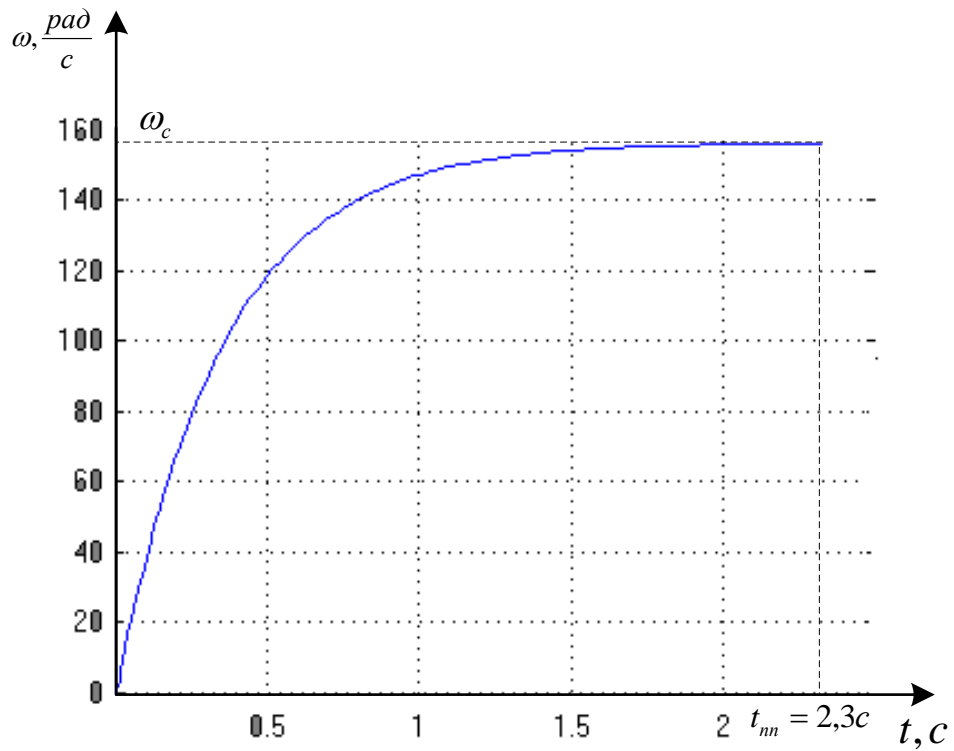


Рисунок 3.29 - Перехідний процес швидкості при пуску АД

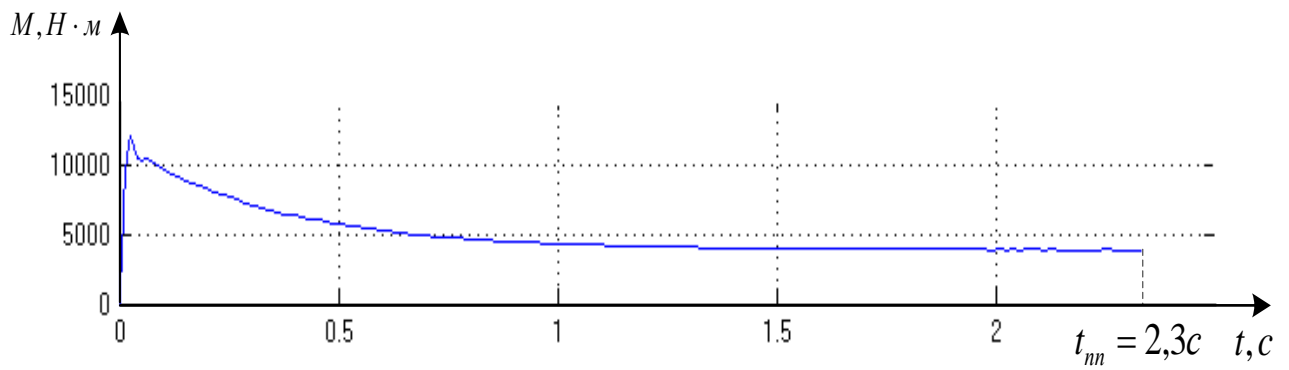


Рисунок 3.30 - Перехідний процес моменту при пуску АД

Час перехідного процесу відповідає розрахованому часу пуску

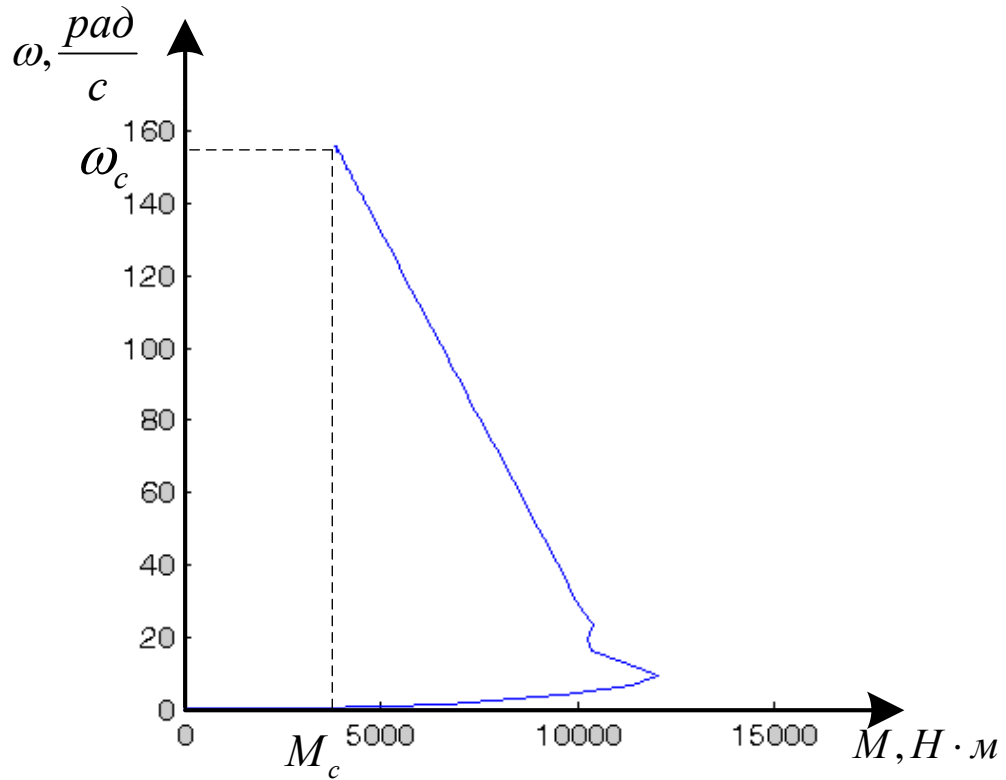


Рисунок 3.31 Механічна характеристика при пуску АД

Проведемо аналіз стійкої роботи приводу за допомогою методу Найквіста. Годограф за критерієм Найквіста виведемо за допомогою електронного прикладного пакета MATLAB.

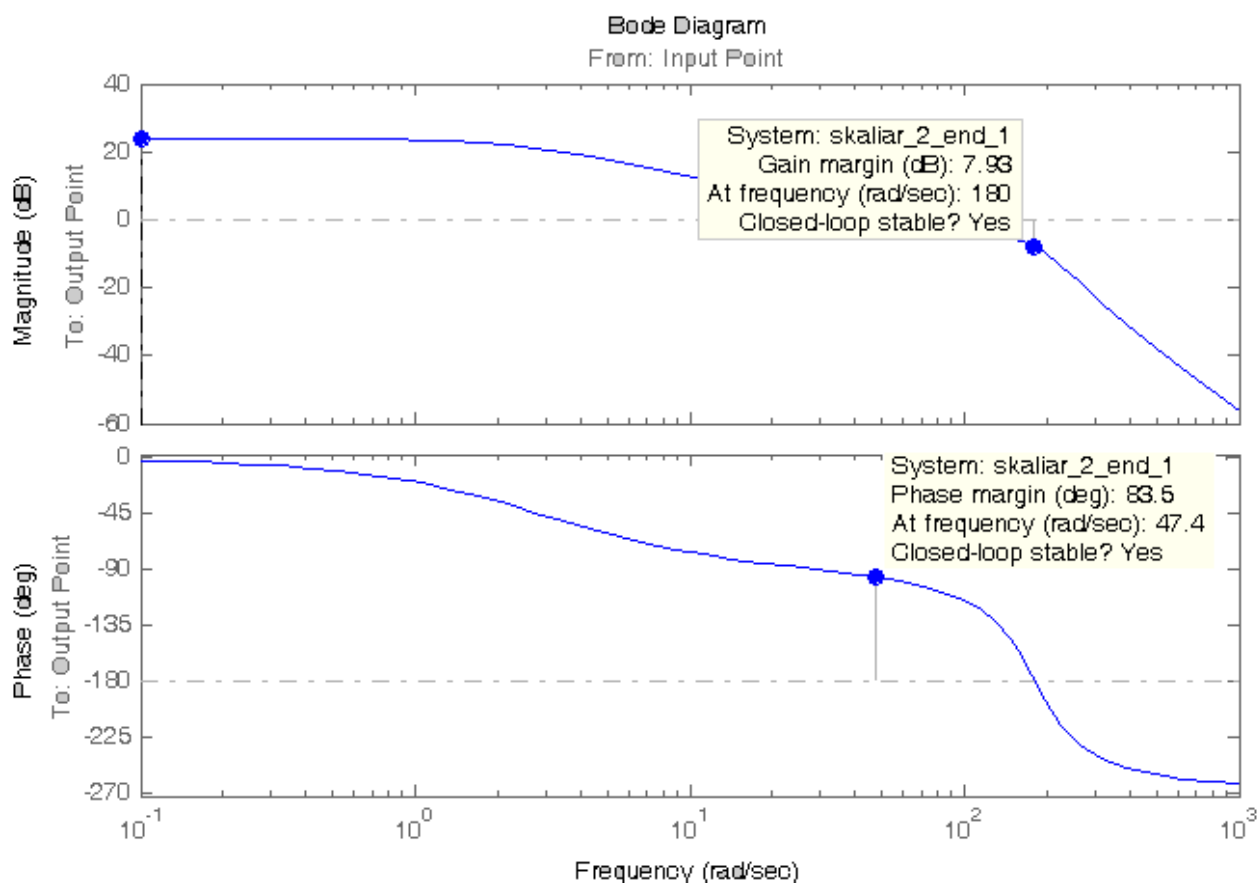


Рисунок 3.32 - Діаграма Бодє для структурної схеми лінеаризованої системи ПЧ-АД

Частотні характеристики задовольняють вимогам стійкості, причому запас стійкості системи по амплітуді склав 7,93, по фазі – 83,5 град.

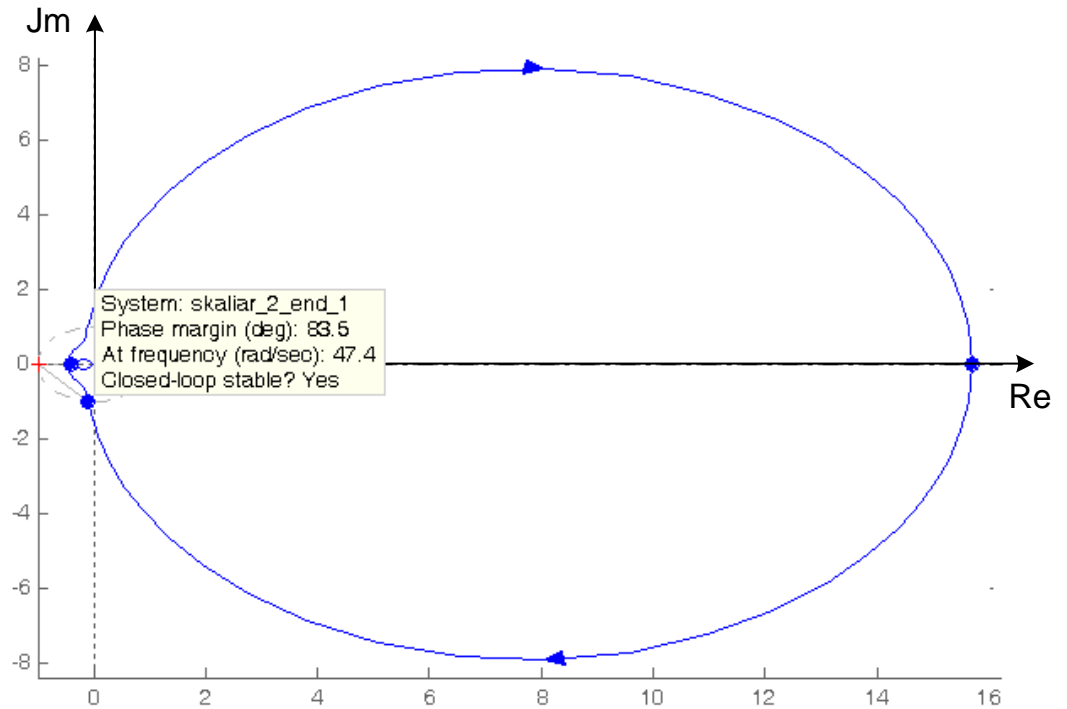


Рисунок 3.33 - Годограф Найквіста для структурної схеми лінеаризованої системи ПЧ-АД

На рис. 3.33 видно, що годограф Найквіста не перетинає точку з координатами  $(-1; 0)$ . Це говорить про стійкість системи.

У відносних одиницях закон зміни напруги при частотному регулюванні, при допущенні  $R_s = 0$  :

$$U_1^* = f_1^* \cdot \sqrt{M_c} ; \quad (3.67)$$

де  $U_1^* = \frac{U_1}{U_{1ном}}$ ,  $f_1^* = \frac{f_1}{f_{1ном}}$ ,  $M_c = \frac{M_c}{M_{сном}}$ .

При  $M_c = const(1.135)$  запишеться у вигляді:

$$U_1^* = f_1^* ; \quad (3.68)$$

$$\text{або } \frac{U_1^*}{f_1^*} = const ; \quad (3.69)$$

Уточнений закон зміни напруги при частотному регулюванні з урахуванням  $R_s \neq 0$ :

$$U_1^* = \sqrt{\frac{f_1^* \cdot \rho_{1k} + \sqrt{(f_1^{*2} + \rho_{1k}^2) \cdot (f_1^{*2} + \rho_{1\mu}^2)}}{\rho_{1k} + \sqrt{(1 + \rho_{1k}^2) \cdot (1 + \rho_{1\mu}^2)}}} M_c^*(f_1^*); \quad (3.70)$$

$$\rho_{1k} = \frac{Rs}{x_{кном}}; \quad (3.71)$$

$$\rho_{1k} = \frac{0,00347}{0,0683} = 0,051;$$

$$\rho_{1\mu} = \frac{Rs}{x_{мноm}} \quad (3.72)$$

$$\rho_{1\mu} = \frac{0,00347}{0,782} = 0,0044;$$

Розрахунок механічних характеристик АД при частотному регулюванні швидкості за уточненим законом (3.70) ведеться в такій послідовності. [3,176] Розраховується значення критичного моменту АД при частотному регулюванні за формулою:

$$M_k' = \frac{3 \cdot U_1^2}{\varpi_{0ном} \cdot x_k \cdot (f_1^* + \sqrt{(f_1^{*2} + \rho_{1k}^2) \cdot (f_1^{*2} + \rho_{1\mu}^2)})}; \quad (3.73)$$

Розраховується значення критичного ковзання при частотному регулюванні:

$$s_k' = \frac{R_r'}{f_1^* \cdot x_{кном}} \cdot \sqrt{\frac{f_1^{*2} + \rho_{1\mu}^2}{f_1^{*2} + \rho_{1k}^2}}; \quad (3.74)$$

Механічні характеристики будуються за формулою Клоса:

$$M = \frac{2M'_k(1 + \alpha s'_k)}{\frac{s}{s'_k} + \frac{s'_k}{s} + 2\alpha s'_k};$$

де  $\alpha = \frac{R_s \cdot f_1^{*2}}{R_r \cdot f_1^{*2} + \rho_{1\mu}^2};$  (3.75)

При використанні математичної програми Mathcad характеристику можна побудувати автоматично, ввівши вищевказану формулу, заздалегідь визначивши всі величини входять в неї і задавши крок моделювання для параметра ковзання  $s$  із зазначенням меж від 0 до 1. Характеристика будується для частот  $f_1^* = 0,5; 1; 1,5$ .

На рис. 3.34 зображені отримані таким чином характеристики двигуна.

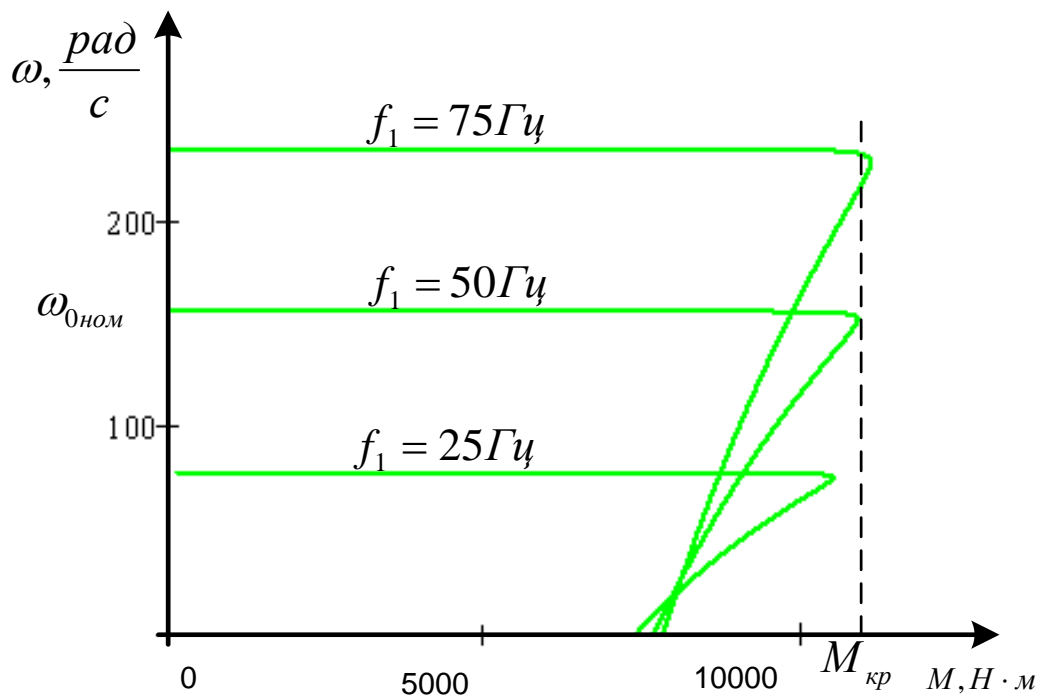


Рисунок 3.34 - Механічні характеристики АД при частотному регулюванні швидкості

При зниженні частоти і напруги за законом  $\frac{U_1}{f_1} = const$ , як показує

$$\Psi_1^* = \frac{(u_1^* - i_1^* \cdot R_s)}{j \cdot \omega_{0\text{эл}}}, \quad (3.76)$$

потокосцеплення  $\Psi_1$  має знижуватися, прагнучи до 0 при  $f_1 \longrightarrow 0$ . Відповідно з урахуванням  $R_s \neq 0$  реальні механічні характеристики при такому законі управління мають знижувальний, при малих частотах, критичний момент [1,210]. У чому можна наглядно переконатися на рис. 3.34.

Дані дослідження показали, що спроектована система за якістю не значно відрізняється від системи ПЧ-АД з векторним керуванням. Система зі скалярним управлінням у порівнянні з системою векторного управління легка в налаштуванні і має більш просте математичне опис. І, виходячи з вимог до технологічного процесу, можна зробити висновок, що дана система має тенденцію до застосування на даному виробництві.

### 3.3 Висновки за розділом

У третьому розділі проведено дослідження та удосконалення системи керування електроприводом брикет-преса залізистих кварцитів. Розроблено функціональну схему електропривода та створено математичну модель, яка дозволяє здійснювати розв'язку каналів регулювання струму, швидкості та потокосцеплення ротора. Побудовано структурні схеми асинхронного двигуна з контуром регулювання потокосцеплення і використанням ПІ-регулятора з еталонною моделлю. Проведене моделювання підтвердило ефективність запропонованої системи керування, що забезпечує стабільну роботу електропривода при змінних навантаженнях. Дослідження режимів скалярного керування показало можливість оптимізації енергоспоживання та покращення динамічних характеристик привода, що є підґрунтям для практичної реалізації.

## ВИСНОВКИ

У процесі виконання магістерської роботи проведено комплексне дослідження та удосконалення системи керування електроприводом брикет-преса для залізистих кварцитів. Аналіз технології брикетування і стану автоматизації підтвердив необхідність оптимізації ключових компонентів електроприводної системи з метою підвищення надійності, точності управління та енергоефективності. Для досягнення поставленої мети та розв'язання завдань, виконано:

1. Вибір і обґрунтування електродвигуна привода брикет-преса проведено на основі технічних характеристик навантажень, які характерні для процесу пресування. Було обрано трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, оскільки він має високий пусковий момент, простоту конструкції, стійкість до перевантажень та відносно низьку вартість обслуговування. Цей тип двигуна оптимально відповідає вимогам безперервної роботи у складних технологічних умовах.

2. Обґрунтування вибору перетворювача частоти базувалось на необхідності плавного регулювання швидкості та крутного моменту для адаптації роботи преса до різних умов брикетування. Запропоновано застосування частотного перетворювача з векторним керуванням, що забезпечує високу точність і динамічну реакцію системи, знижує механічні навантаження на обладнання та сприяє економії електроенергії.

3. Розрахунок механічної частини електропривода дозволив визначити оптимальні параметри передачі моменту від двигуна до робочого органа преса. Проведено розрахунок необхідного крутного моменту, визначено характеристики редуктора та обґрунтовано вибір елементів трансмісії, що забезпечує надійну роботу без перевантажень, мінімізацію втрат потужності та довговічність механічної системи.

4. Моделювання асинхронного електропривода брикет-преса в MATLAB/Simulink надало можливість віртуально дослідити поведінку системи при різних режимах роботи, оцінити вплив змін навантаження, параметрів електропривода та керування. Моделювання підтвердило стабільність роботи та ефективність обраних параметрів, а також дало змогу провести попередню перевірку алгоритмів управління перед впровадженням у реальному обладнанні.

5. Синтез структурних схем системи керування включав розробку ієрархії функціональних блоків системи, що забезпечують керування двигуном, захист обладнання та збір інформації для моніторингу. Запропоновані схеми підтримують гнучке налаштування режимів, адаптацію до змін технологічних параметрів і інтеграцію з існуючими автоматизованими системами управління підприємства.

6. Розробка скалярного управління електродвигуном брикет-преса дозволила реалізувати простий і надійний спосіб регулювання швидкості без значних затрат на складні контролери. Запропонований алгоритм забезпечує стабільне керування, підтримку необхідної швидкості обертання та крутного моменту, що критично для якості брикетування та зменшення зносу обладнання.

Комплекс виконаних завдань дає змогу рекомендувати розроблену систему керування для практичного застосування на промислових підприємствах, що займаються брикетуванням залізистих кварцитів. Впровадження цих рішень сприятиме підвищенню продуктивності, надійності та енергоефективності технологічного процесу, зменшенню експлуатаційних витрат і збільшенню терміну служби обладнання.

## СПИСОК ВИКОРИСТОНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1) Бойко В. С., Кірсанов С. Ю., Міщенко С. П. Електроприводи промислових установок. – К.: Либідь, 2020. – 356 с.
- 2) Пастух І. М., Козленко М. П. Автоматизація електроприводів у металургії. – Дніпро: Наука і освіта, 2019. – 280 с.
- 3) Котляр Г. І., Писаренко Г. І. Електромеханічні системи автоматичного керування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2021. – 310 с.
- 4) Ковальчук С. Я., Тимофєєв В. І. Системи керування електроприводами: теорія та практика. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2022. – 295 с.
- 5) Литовченко О. М., Мельник О. В. Моделювання та дослідження електроприводів у MATLAB/Simulink. – Київ : Політехніка, 2020. – 242 с.
- 6) Іваненко П. В. Основи електроприводів: навч. посібник. – Київ : Видавництво «Наука і освіта», 2019. – 180 с.
- 7) Кравченко О. М. Автоматизація електроприводів: навч. посібник. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2020. – 220 с.
- 8) Семенюк В. І. Моделювання електроприводів у середовищі MATLAB/Simulink: навч. посібник. – Харків : НТУ «ХПІ», 2021. – 150 с.
- 9) Шевченко С. П. Електроприводи в промисловості: навч. посібник. – Дніпро: Вид-во Дніпровської політехніки, 2018. – 195 с.
- 10) Козак В. І. Автоматизація електроприводів: теоретичні основи та застосування. – Київ : Ін-т електродинаміки НАН України, 2018. – 280 с.
- 11) Петренко М. О. Системи керування електроприводами в металургійних процесах. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – 330 с.
- 12) Іванов С. П. Моделювання та оптимізація електроприводних систем. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. – 245 с.
- 13) Шевченко В. М. Теорія та практика управління електроприводами промислових машин. – Дніпро : ДНУ, 2021. – 310 с.

- 14) Hrebtova, O., & Zachepa, N. *Thermal modes of the automated electric drive system during burning under load*. Electrical Engineering and Power Engineering, 2021 (No. 3), c. 14 – 23.
- 15) Khudyakov, A.; Vashchenko, S.; Baiul, K.; Semenov, Y.; Krot, P. *Optimization of Briquetting Technology of Fine-Grained Metallurgical Materials Based on Statistical Models of Compressibility*. Powder Technology, 2022, Vol. 412, Article 118025.
- 16) Bembenek, M. *Modeling of Loads in the Drive System of a Roller Press on an Example of a Press for Briquetting Brown Coal*. Mechanics and Advanced Technologies, 2018, № 3(84), c. 113–124.
- 17) Baiul, K.; Vashchenko, S.; Khudyakov, O.; et al. *A Novel Approach to the Screw Feeder Design to Improve the Reliability of Briquetting Process in the Roller Press*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 2023; 25(3): 167967.
- 18) Khudyakov, A.; Vashchenko, S.; Baiul, K.; Semenov, Y.; Krot, P. *Optimization of Briquetting Technology of Fine-Grained Metallurgical Materials Based on Statistical Models of Compressibility*. Powder Technology, 2022.
- 19) Leonhard W. *Control of Electrical Drives*. – Springer, 2020. – 420 p.
- 20) Boldea I. *Electric Drives and Electromechanical Systems*. – Academic Press, 2021. – 550 p.
- 21) Bose B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. – Pearson Education, 2022. – 690 p.
- 22) Mohan N. *Electric Machines and Drives: A First Course*. – Wiley, 2023. – 520 p.
- 23) Hughes, A. *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*. – Oxford : Newnes, 2019. – 320 p.
- 24) Chapman, S. J. *Electric Machinery Fundamentals: Student Workbook*. – New York : McGraw-Hill, 2020. – 180 p.
- 25) Boldea, I., & Nasar, S. A. *The Induction Machine Handbook: Modeling, Control, and Applications*. — Boca Raton : CRC Press, 2017. – 400 p.

# ДОДАТКИ

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія  
Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

**Удосконалення та дослідження системи  
керування електроприводом брикетування  
залізистих кварцитів**

Кваліфікаційна робота магістра

Виконав:

Є. С. ПРОСКУРНЯ

Керівник:  
к.т.н., доц.

Н. В. ЄРМІЛОВА

Полтава 2025

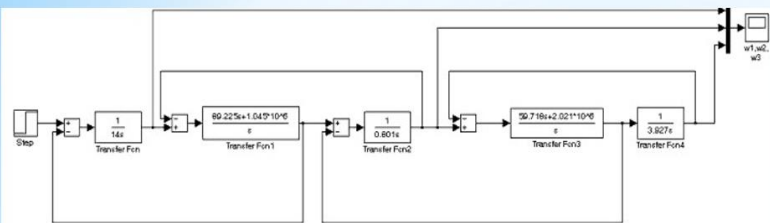
**Метою магістерської роботи є** підвищення ефективності роботи електропривода установки брикетування залізистих кварцитів шляхом удосконалення системи керування.

Для досягнення цієї мети передбачається розробка, моделювання та дослідження модернізованої системи керування, яка забезпечує підвищення надійності, енергоефективності та точності регулювання технологічного процесу, з урахуванням специфіки переробки залізистих кварцитів.

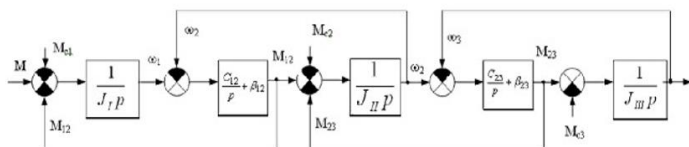
**Об'єктом дослідження є** процес керування електроприводом механізму брикетування залізистих кварцитів.

**Предмет дослідження -** система автоматичного керування електроприводом у технологічному процесі брикетування залізистих кварцитів, її структура, алгоритми функціонування та характеристики.

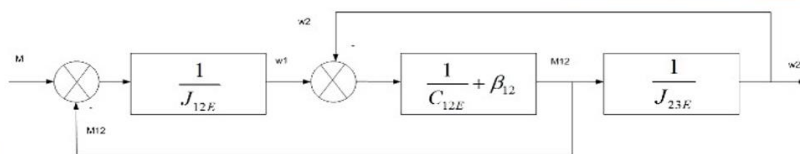
3



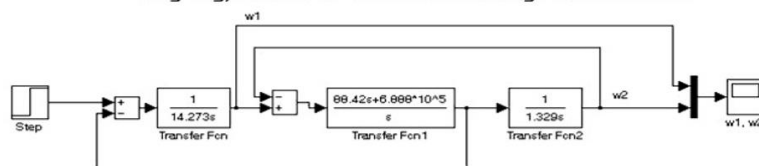
Модель тримасової гнучкої системи



Структурна схема тримасової гнучкої системи



Структурна схема двохмасової гнучкої системи

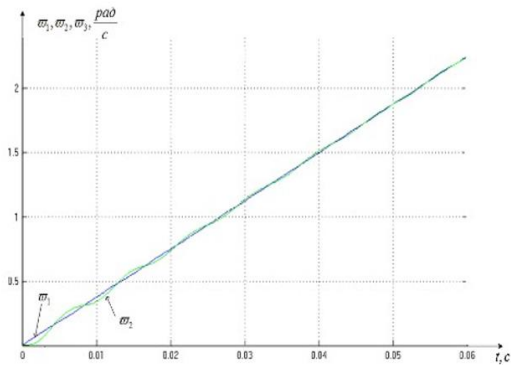


Модель двохмасової гнучкої системи

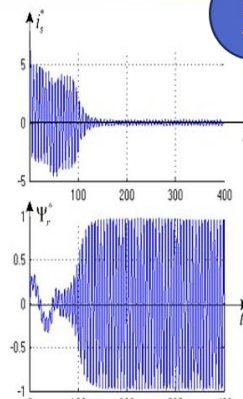
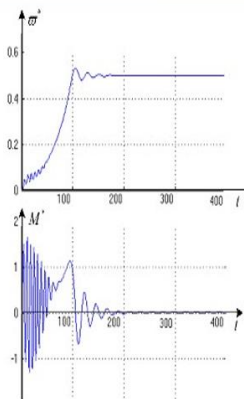


5

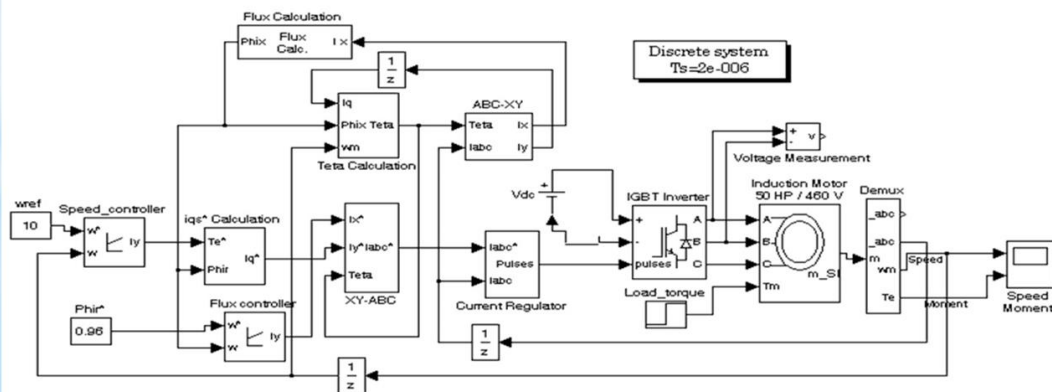
Пуск ЕП з тримасовою гнучкою механічною частиною з урахуванням звичайного демпфування



Графік зміни швидкості ротора та електромагнітного моменту двигуна в часі

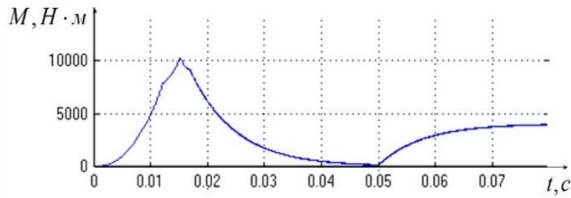
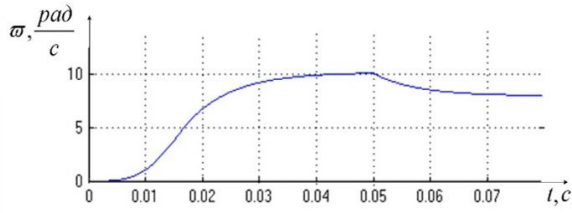


Графіки зміни струму статора і потокозчеплення ротора в часі

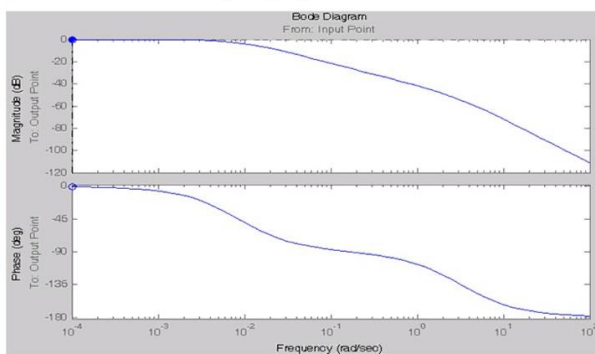


Віртуальна модель асинхронного електроприводу

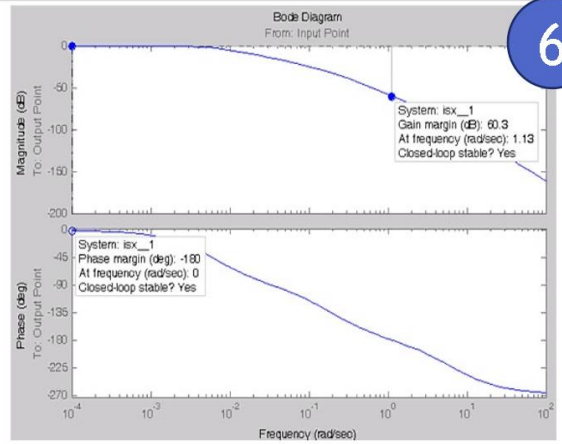
6



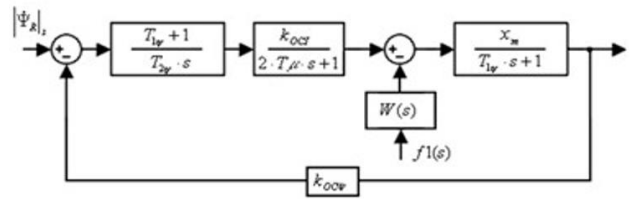
Динамічні характеристики швидкості і моменту при пуску із навантаженням



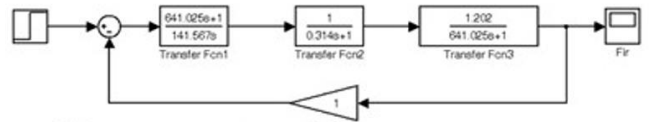
Діаграма Боде



Діаграма Боде

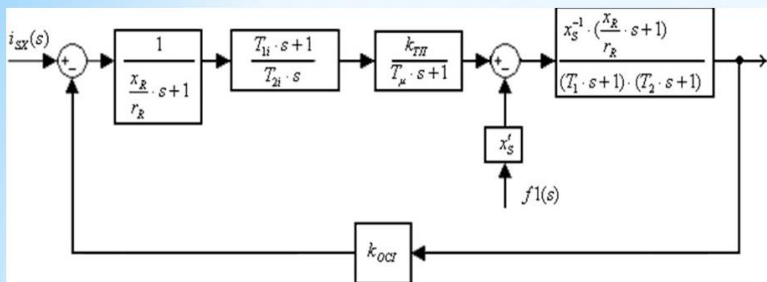


Структурна схема контуру регулювання модуля поточозчеплення ротора

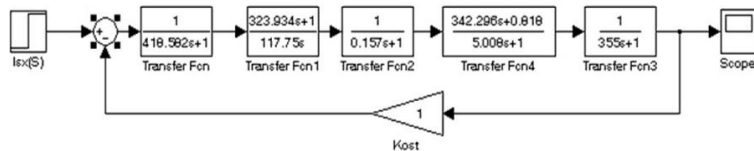


Модель контуру регулювання модуля поточозчеплення ротора

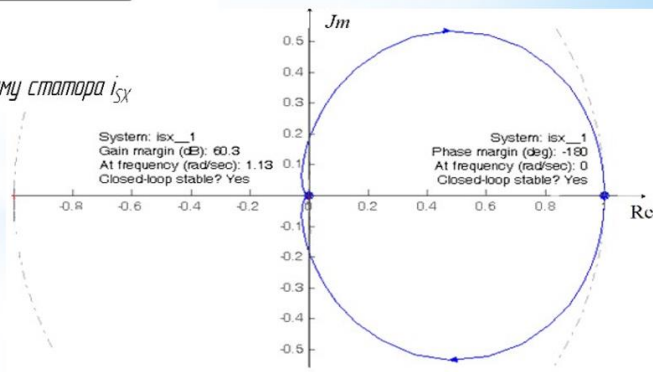
7



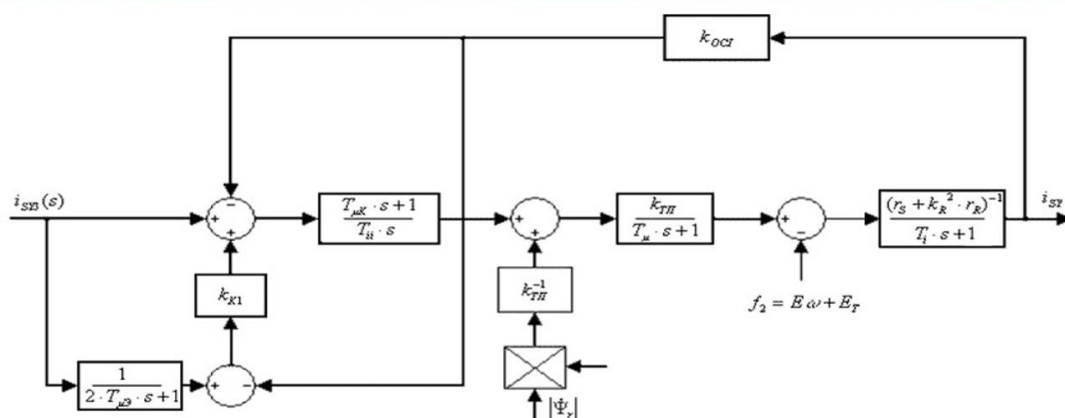
Контур регулювання складової струму статора  $i_{sx}$



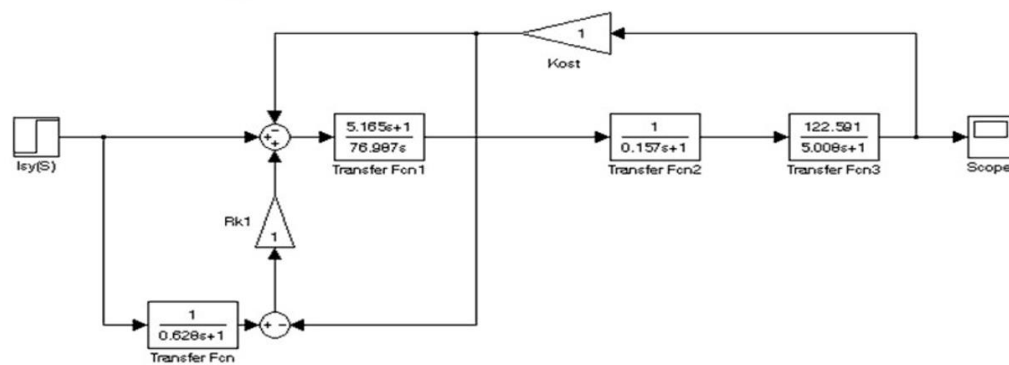
Модель контура регулювання складової струму статора  $i_{sx}$



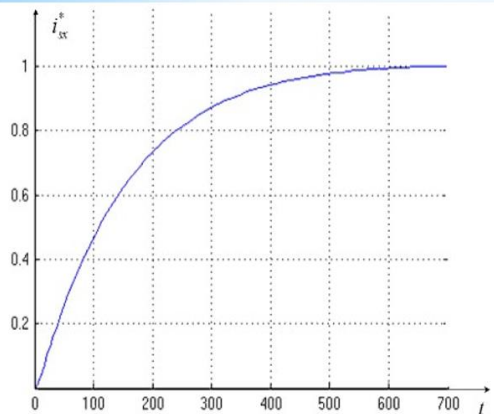
Діаграма Найквіста



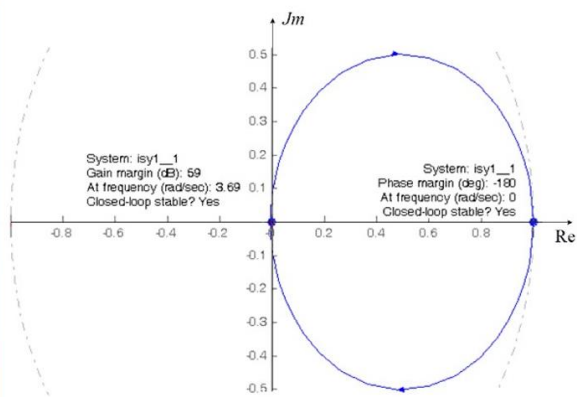
*Контур складової з ПІ-регулятором в основному каналі і контуром з еталонною моделлю*



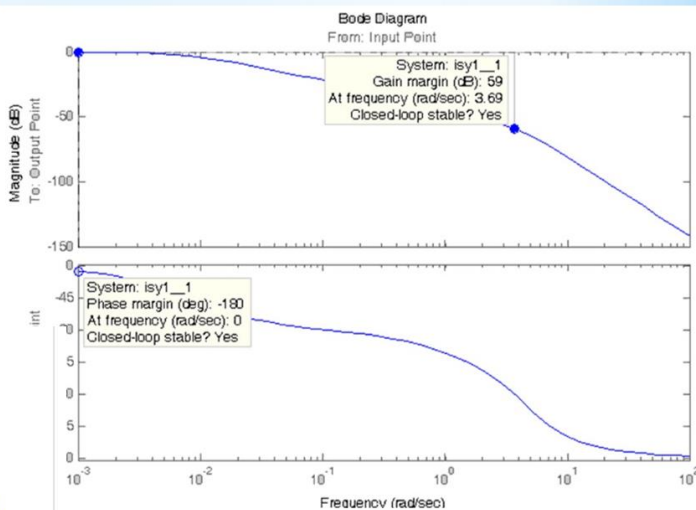
*Модель контуру складової з ПІ-регулятором в основному каналі і контуром з еталонною моделлю*



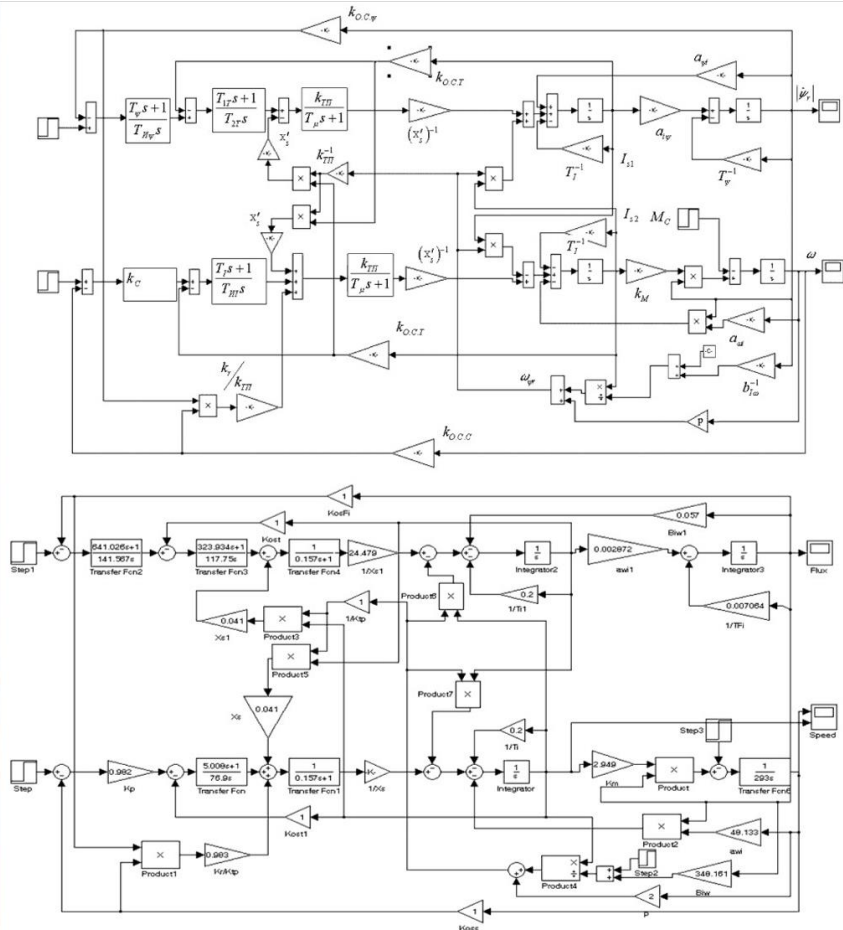
Перехідний процес складової струму статора  $i_{sx}^*$



Діаграма Найквіста

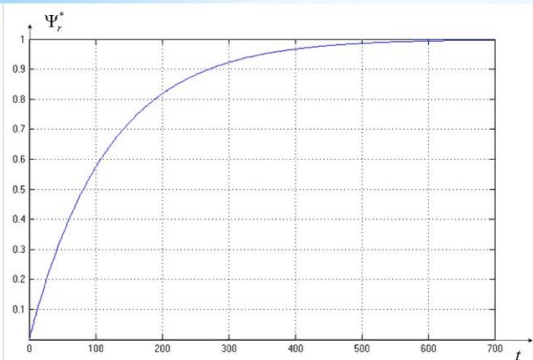


Діаграма Боде

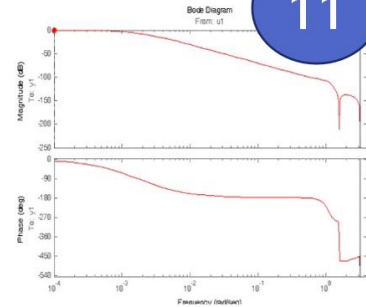
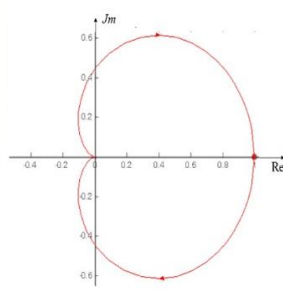


Математична модель асинхронного електроприводу

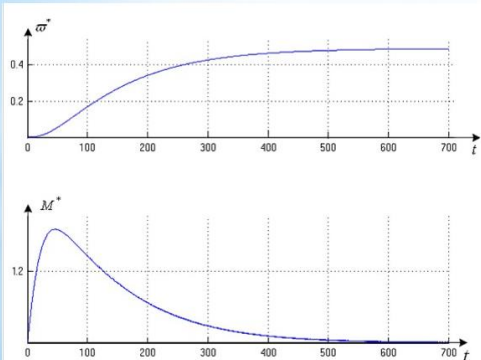
11



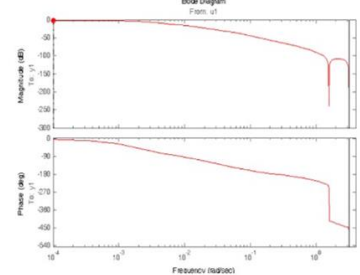
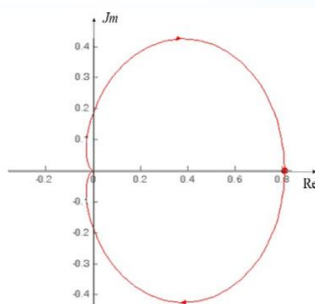
Графік зміни модуля потокозчеплення ротора в часі



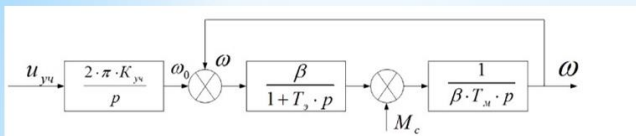
Частотні характеристики Найквіста і Боде для контура регулювання модуля потокозчеплення ротора



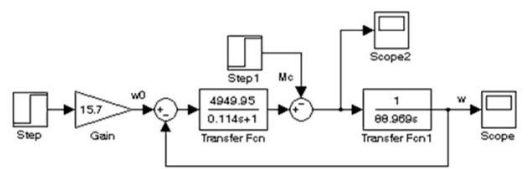
Графіки перехідних процесів швидкості та моменту



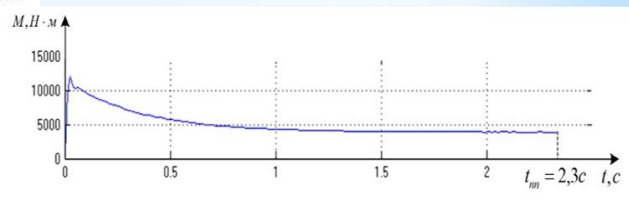
Частотні характеристики Найквіста і Боде для контура регулювання швидкості ротора



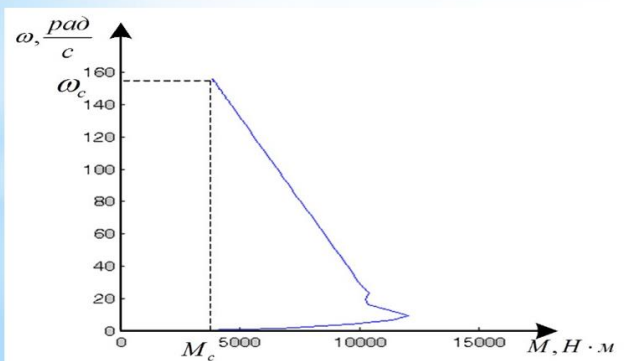
Структурна схема системи ПЧ-АД з скалярним управлінням



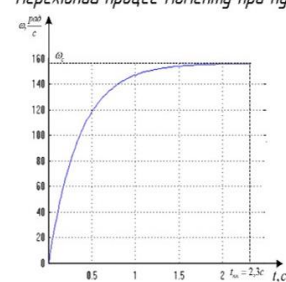
Модель системи ПЧ-АД з скалярним управлінням



Перехідний процес моменту при пуску АД

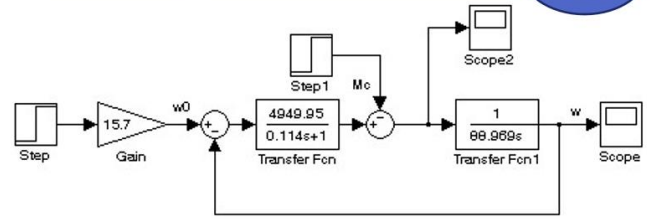
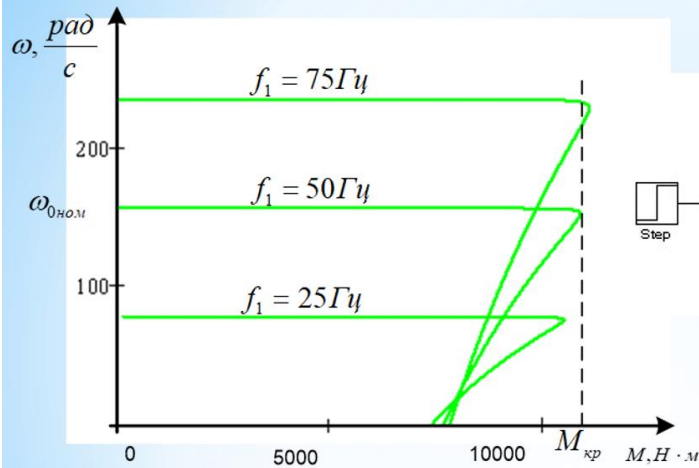


Механічна характеристика при пуску АД



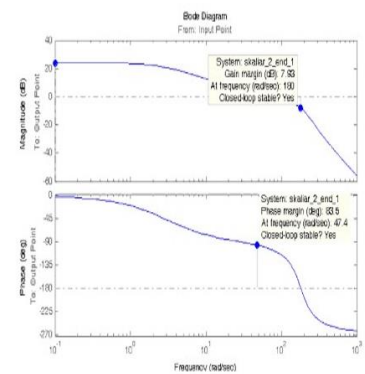
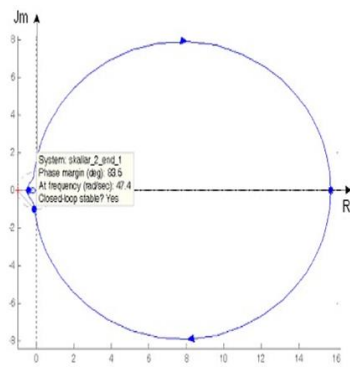
Перехідний процес швидкості при пуску АД

13



Модель системи ПЧ-АД

Механічні характеристики АД при частотному регулюванні швидкості



Діаграма Найквіста і Бодє системи ПЧ-АД з скалярним управлінням

## Висновки

14

Основні результати кваліфікаційної роботимагістра полягають у наступному:

- \* Проведено аналіз основних технічних характеристик навантажень, які характерні для процесу пресування. Було обрано трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Цей тип двигуна оптимально відповідає вимогам безперервної роботи у складних технологічних умовах.
- \* Запропоновано застосування частотного перетворювача з векторним керуванням, що забезпечує високу точність і динамічну реакцію системи, знижує механічні навантаження на обладнання та сприяє економії електроенергії.
- \* Проведено розрахунок необхідного крутного моменту, визначено характеристики редуктора та обґрунтовано вибір елементів трансмісії, що забезпечує надійну роботу без перевантажень, мінімізацію втрат потужності та довговічність механічної системи.
- \* Моделювання асинхронного електропривода брикет-преса в MATLAB/Simulink надало можливість віртуально дослідити поведінку системи при різних режимах роботи, оцінити вплив змін навантаження, параметрів електропривода та керування. Моделювання підтвердило стабільність роботи та ефективність обраних параметрів, а також дало змогу провести попередню перевірку алгоритмів управління перед впровадженням у реальному обладнанні.
- \* Синтез структурних схем системи керування включав розробку ієрархії функціональних блоків системи, що забезпечують керування двигуном, захист обладнання та збір інформації для моніторингу. Запропоновані схеми підтримують гнучке налаштування режимів, адаптацію до змін технологічних параметрів і інтеграцію з існуючими автоматизованими системами управління підприємства.
- \* Розробка скалярного управління електродвигуном брикет-преса дозволила реалізувати простий і надійний спосіб регулювання швидкості без значних затрат на складні контролери. Запропонований алгоритм забезпечує стабільне керування, підтримку необхідної швидкості обертання та крутного моменту, що критично для якості брикетування та зменшення зносу обладнання.
- \* Комплекс виконаних завдань дає змогу рекомендувати розроблену систему керування для практичного застосування на промислових підприємствах, що займаються брикетуванням залізистих кварцитів. Впровадження цих рішень сприятиме підвищенню продуктивності, надійності та енергоефективності технологічного процесу, зменшенню експлуатаційних витрат і збільшенню терміну служби обладнання.

**ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!**

Додаток Б

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**  
за матеріалами XI Всеукраїнської науково-практичної конференції  
**«ЕЛЕКТРОННІ ТА МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ:  
ТЕОРІЯ, ІННОВАЦІЇ, ПРАКТИКА»**  
18 грудня 2025 року



Полтава 2025

**УДК 681.58**

*Є.С. Проскурня, магістрант,*

*Н.В. Єрмілова, к.т.н., доцент*

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»*

## **АНАЛІЗ МЕТОДІВ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ДЛЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ УСТАНОВКИ БРИКЕТУВАННЯ ЗАЛІЗИСТИХ КВАРЦИТІВ**

В роботі розглянутий технологічний процес брикетування залізистих кварцитів, визначено склад установки та важливу роль електропривода у забезпеченні стабільності, продуктивності та енергоефективного виробництва. В процесі розроблення виникло питання способу регулювання швидкості обраного для електроприводу установки брикетування асинхронного двигуна.

Найбільш раціональним в наш час вважається регулювання продуктивності електроприводу зміною частоти обертання електродвигуна, при цьому ККД установки буде достатньо великим й різко знижується споживана потужність. Найчастіше валки брикет-преса в установці брикетування встановлюються на одному валу з електродвигуном, тому зміна частоти обертання валків безпосередньо пов'язана зі зміною частоти обертання електродвигуна.

Широко відомі наступні способи регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна: реостатне регулювання, регулювання зміною напруги живлення, регулювання перемиканням числа пар магнітних полюсів, регулювання за допомогою силових напівпровідникових перетворювачів [1].

Для регулювання кутової швидкості, крім згаданих, можуть бути використані деякі інші способи: імпульсне регулювання, регулювання зміною величини напруги, що підводиться до статора, регулювання за допомогою електромагнітної муфти ковзання.

Недоліками реостатного регулювання швидкості є необхідність дискретної зміни опору в роторному ланцюзі за допомогою силових апаратів, керованих дистанційно або вручну, що дає ступінчасте регулювання швидкості й виключає можливість використання замкнених систем автоматичного керування, також невисока швидкодія та значні втрати енергії. У наш час спостерігається тенденція до зменшення використання розглянутого виду регулювання швидкості через його недоліки в порівнянні з іншими наявними методами регулювання.

Якщо регулювати напругу, яка підводиться до трьох фаз статора асинхронного двигуна, то можна, відволікаючись від впливу параметрів регулюючого пристрою на характеристики двигуна, змінювати максимальний момент, не змінюючи критичного ковзання. Пристроєм для регулювання напруги може бути, наприклад, тиристорний регулятор напруги (ТРН). Він перетворює напругу живильної мережі в регульовану напругу тієї ж частоти. У зв'язку зі значними втратами ковзання в асинхронних приводах, ТРН здебільшого застосовується для керування двигунами з фазним ротором. Використання ТРН в електроприводах асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором рекомендоване лише для формування пуско-гальмівних режимів, і в нашому випадку не є економічно обґрунтованим [2].

Регулювання швидкості перемиканням полюсів вважають досить економічним, його широко застосовують там, де не потрібне плавне регулювання швидкості, наприклад у деяких металорізальних верстатах з метою зменшення кількості механічних передач. Для плавного регулювання швидкості двигунів валків брикет-преса цей метод вважаємо недоцільним.

Враховуючі переваги та недоліки способів регулювання швидкості асинхронних двигунів, що використовуються в установках брикетування залізистих кварцитів, ми прийшли до висновку, що найбільш сучасним та оптимальним для даної розробки способом є регулювання за допомогою силових напівпровідникових перетворювачів частоти [3].

Створено математичні та віртуальні моделі електропривода з частотним регулюванням [4], проведено моделювання динамічних характеристик, яке довело надійність та стабільність роботи системи керування електроприводом установки брикетування залізистих кварцитів при пуску та різних величинах навантажень.

Отримані результати продемонстрували можливість їх практичного застосування для підвищення продуктивності та надійності роботи установки брикетування.

### ЛІТЕРАТУРА:

1. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. *Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1: Навчальний посібник.* – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.
2. Голодний І.М., Червінський Л.С., Жильцов А.В., Санченко О.В. Романенко О.І. *Моделювання регульованого електропривода: Підручник.* – К.: Аграр Медіа Груп, 2019. – 266 с.: іл.
3. *Електротехніка та електроніка. Теоретичні відомості, розрахунки та дослідження за підтримкою комп'ютерних технологій: Навч. посіб.* /Щерба А.А., Рябенький В.М., Кучеренко М.Є. та ін. – К.: "Корнійчук", 2007. - 488 с. з іл.
4. *Довідник з MATLAB / Електронний навчальний посібник з курсового і дипломного проектування.* – К.: НТУУ "КПІ", 2013. – 132 с.

### ***ANALYSIS OF THE METHODS OF REGULATING THE SPEED OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR FOR THE ELECTRIC DRIVE OPERATION OF THE BRIQUETTING PLANT IRON QUARTZITEN***

*E. Proskurnia, Master's Student,*

*N. Yermilova, Ph.D., Associate professor*

*National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»*