

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут
Кафедра електромеханічних та комп'ютерних систем

До захисту допущено

Завідувач кафедри


(підпис)

Інна НЕФЬОДОВА

(ім'я, прізвище)

«05» грудня 2024 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (ПРОЄКТ)

рівень вищої освіти другий (магістерський)

спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

освітньо-професійна Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

тема «Синтез електромеханічної системи із багатьма асинхронними двигунами і векторним керуванням»

Виконав(ла)

здобувач(ка) групи БД-П23мг
(шифр групи)

Ілля ЯСЬКОВ

(ім'я, прізвище)


(підпис)

Керівник роботи

д.т.н., проф. Борис КУЗНЕЦОВ

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

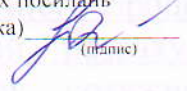

(підпис)

Рецензент роботи

к.т.н., доц. Юрій ЗАЧЕПА

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


(підпис)

Засвідчую, що у цій роботі
немає цитат та вилучень з
праць інших авторів без
відповідних посилань
здобувач (ка) 
(підпис)

Харків – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет/ІНІ Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут

Кафедра Електромеханічних та комп'ютерних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Інна НЕФЬОДОВА

(підпис) (ім'я, прізвище)

«08» жовтня 2024 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ)

Яськов Ілля Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Синтез електромеханічної системи із багатьма асинхронними двигунами і векторним керуванням

керівник роботи Кузнецов Борис Іванович, д. т. н., професор

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

затверджені наказом по університету від «08» жовтня 2024 року № 5101-5/3236

2. Строк подання здобувачем роботи «02» грудня 2024 р.

3. Перелік питань, які потрібно розробити: В пояснювальній записці необхідно відобразити аналітичний огляд та опис технологічного процесу, формулювання вимог до електроприводу, енергосиловий розрахунок параметрів технологічного об'єкта, обґрунтування вибору потужності двигуна, вибір електродвигуна та силового електрообладнання, математична модель електромеханічного об'єкта, розрахунок статичних та динамічних параметрів електроприводу, синтез системи керування та дослідження динамічних характеристик електромеханічної системи шляхом моделювання.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Огляд літературних джерел, нових розробок, опублікованих даних та іншої інформації, пов'язаної з темою роботи
2	Обґрунтування теоретичної бази обраної проблеми.
3	Характеристика об'єктів галузі: стан і стратегії розвитку
4	Дослідження синтезу електромеханічної системи із багатьма асинхронними двигунами і векторним керуванням
5	Розробка електромеханічної системи із багатьма асинхронними двигунами і векторним керуванням
6	Оформлення першого варіанту тексту, подання його на ознайомлення науковому керівнику
7	Усунення недоліків, написання остаточного варіанту тексту, оформлення дипломної роботи
8	Подання роботи на кафедру, перевірка на плагіат та зовнішнє рецензування роботи
9	Захист дипломної роботи у ЕК

5. Дата видачі завдання «08» жовтня 2024 р.

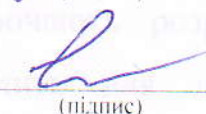
Здобувач(ка)


 (підпис)

Ілля ЯСЬКОВ

(ім'я, прізвище)

Керівник роботи


 (підпис)

Борис КУЗНЕЦОВ

(ім'я, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Об'єктом дослідження магістерської роботи є система векторного керування багатодвигунним асинхронним електроприводом. Основною метою роботи є урівноваження й зниження електричних навантажень на електродвигуни, а також динамічних навантажень на механічну частину. Це забезпечить підвищення терміну експлуатації системи, особливо в умовах інтенсивного використання, завдяки високонадійній багатодвигунній системі електроприводу з покращеною енергоефективністю.

У роботі розглянуто основні конструктивні, технологічні та техніко-експлуатаційні показники і характеристики, такі як жорсткість, пружність, потужність, швидкість обертання, передаточне число, діаметральний радіус і продуктивність. Система знайде своє застосування в електромеханічному обладнанні різних виробництв.

Отримані результати включають розробку математичної моделі механічної частини, яка підходить для дослідження різних систем регульованого електроприводу. Механізм було змодельовано в програмі Simulink / SimMechanics у вигляді віртуального прототипа. Вдалося скласти структурну і математичну модель передаточного механізму, враховуючи вплив зазору, а також дослідити, як величина цього зазору впливає на різні режими роботи електроприводу.

Крім того, було вивчено шляхи переходу електричних величин від однієї системи координат до іншої, а також різні об'єкти, які використовують цей метод під час експлуатації. Це дослідження виявилось важливим для вдосконалення системи управління та підвищення ефективності її роботи в реальних умовах.

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ОБ'ЄКТ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ,
СТРУКТУРНА СХЕМА, ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ, ЗВОРОТНІЙ ЗВ'ЯЗОК,
MATLAB

ABSTRACT

The object of the master's thesis is a vector control system for a multi-motor asynchronous electric drive. The main goal of the work is to balance and reduce electrical loads on electric motors, as well as dynamic loads on the mechanical part. This will ensure an increase in the service life of the system, especially in conditions of intensive use, thanks to a highly reliable multi-motor electric drive system with improved energy efficiency.

The work considers the main design, technological and technical and operational indicators and characteristics, such as rigidity, elasticity, power, rotation speed, gear ratio, diametrical radius and productivity. The system will find its application in electromechanical equipment of various industries.

The results obtained include the development of a mathematical model of the mechanical part, which is suitable for studying various systems of a regulated electric drive. The mechanism was modeled in the Simulink / SimMechanics program in the form of a virtual prototype. It was possible to create a structural and mathematical model of the transmission mechanism, taking into account the influence of the gap, and also to investigate how the size of this gap affects different operating modes of the electric drive.

In addition, the ways of transition of electrical quantities from one coordinate system to another were studied, as well as various objects that use this method during operation. This research turned out to be important for improving the control system and increasing the efficiency of its operation in real conditions.

TECHNOLOGICAL OBJECT, MATHEMATICAL MODEL,
STRUCTURE DIAGRAM, TRANSIENT PROCESSES, FEEDBACK, MATLAB

ВСТУП

На комплекс вагоноперекидача є найбільш ефективним механізмом для розвантаження сипучих матеріалів із залізничного транспорту. Дослідження в галузі енергозберігаючих систем електроприводу механізму кантування вагоноперекидача набуває особливої актуальності, адже вдосконалення систем електроприводу сприяє підвищенню енергоефективності та надійності роботи механізмів. Таке вдосконалення передбачає комплекс заходів, спрямованих на ефективне управління системою двигунів, необхідних для роботи механізму. У деяких випадках використання одного двигуна як приводу є недоцільним або навіть неможливим, тому зазвичай застосовується багатодвигунний привод, здебільшого з використанням двох або чотирьох двигунів. Це зумовлено кількома причинами: ступінчастою шкалою двигунів, необхідністю резервування для особливо відповідальних механізмів, а також тим, що момент інерції двох двигунів приблизно на 17% менший, ніж у одного двигуна з такою ж сумарною потужністю, що забезпечує швидкість роботи. Крім того, це спрощує конструювання приводу. Однак слід враховувати, що наявність більшої кількості двигунів призводить до додаткових витрат на ремонт і обслуговування. Через неточності у виготовленні може виникати різниця в створюваних моментах, що призводить до нерівномірного навантаження і частого виходу з ладу одного або кількох двигунів та супутніх механізмів [3].

Мета даної роботи полягає у створенні системи стабілізації моменту, яка дозволить відстежувати параметри всіх двигунів у цілому та регулювати вхідний сигнал для кожного двигуна окремо, знижуючи різницю в струмах та навантаженнях між ними.

1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТУ

Прилад використовується для розвантаження шахтних вагонеток шляхом їх повороту або нахилу в таке положення, яке дозволяє вантажу висипатися. Управління перекидачем може бути як напівавтоматичним, так і автоматичним.

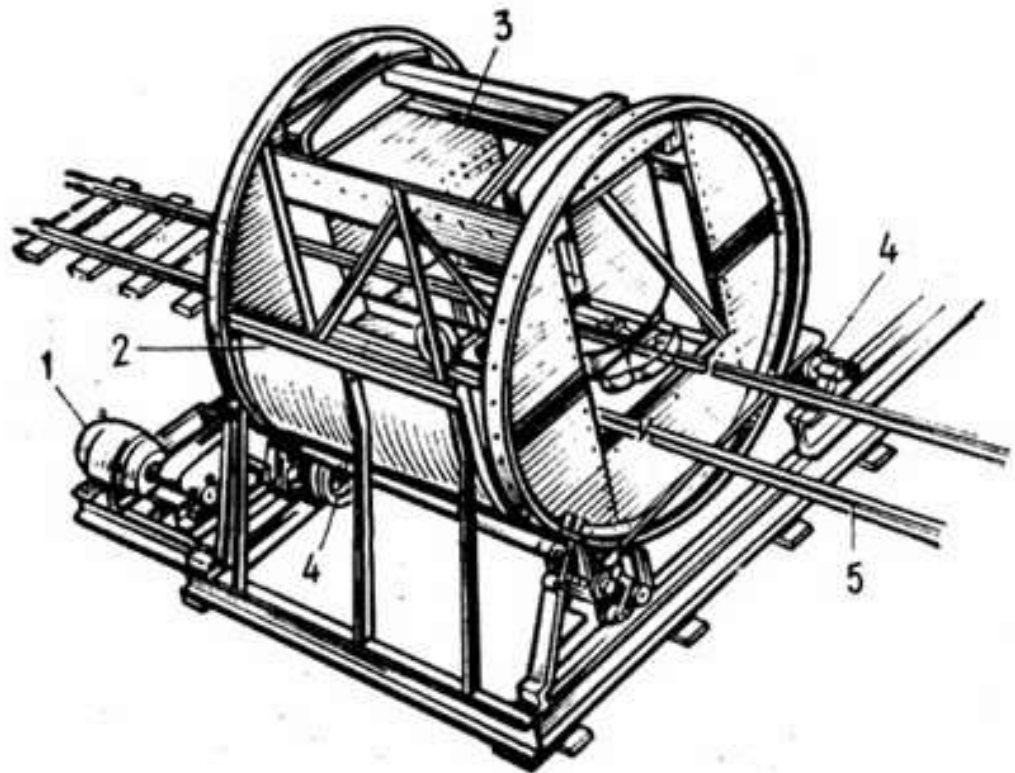


Рисунок 1.1 Круговий перекидач

1 — привод; 2 — барабан; 3 — вугли; 4 — роlikоопори; 5 — рейковий шлях

За способом розвантаження перекидачі вагонеток підрозділяють на кругові, бічні і лобові (торцеві).

Для інтенсифікації процесу розвантаження широко застосовуються різні вібраційні пристрої, вбудовані в барабан, які включаються автоматично. З метою забезпечення поточності робіт на розвантажувальному пункті і підвищення його пропускної здатності в гірничорудній промисловості використовуються перекидачі вагонеток, барабан яких забезпечує пропуск через нього локомотива. Параметри перекидачів вагонеток зумовлюються габаритними розмірами і числом одночасно розвантажуються вагонеток. У гірській промисловості застосовують барабани діаметром 2,5; 2,8; 3 і 4 м, при довжинах від 1,5 до 7,8 м. Час одного обороту від 18 до 30 с. Встановлені потужності від 4 до 40 кВт.

Бічні перекидачі вагонеток оснащені штоковим робочим органом з пневмо-або гідроприводом або поворотною платформою. Поворот платформи із зафіксованою на ній вагонеткою здійснюється за допомогою електро або гідроприводу. Перекидачами вагонеток, як правило, розвантажуються одиночні вагонетки, попередньо зупинені в зоні дії робочого органу. Застосовуються також технологічні схеми розвантажувальних пунктів, при яких вагонетки з відкидним бортом розвантажуються двома штоковий перекидачами вагонеток в автоматичному режимі при безперервному русі складу. Захоплення кузова вагонетки, поворот його і відкривання борта штоковий робочим органом забезпечуються за допомогою спеціального гака. Зусилля на гаку у вітчизняних конструкціях перекидача вагонеток близько 83 кН, у зарубіжних - в основному залежить від місткості кузова і об'ємної щільності розвантажуються матеріалу [2].

Лобові (торцеві) перекидачі вагонеток з поворотною платформою, на якій фіксується одиночна вагонетка, розвантажуються з торця, на підприємствах гірничодобувної промисловості країни не поширені [1].

1.2. Технічні характеристики механізму

Перекидачі вагонеток (Рис. 1.2) з електричним приводом призначені для розвантаження вагонеток із глухим кузовом типу ВГ, як у розщепленому, так і в нерозщепленому складі, без пропуску електровоза (ОК) та з пропуском (ОКЕ). Ці перекидачі використовуються на гірничодобувних підприємствах, що займаються видобутком чорних і кольорових металів.

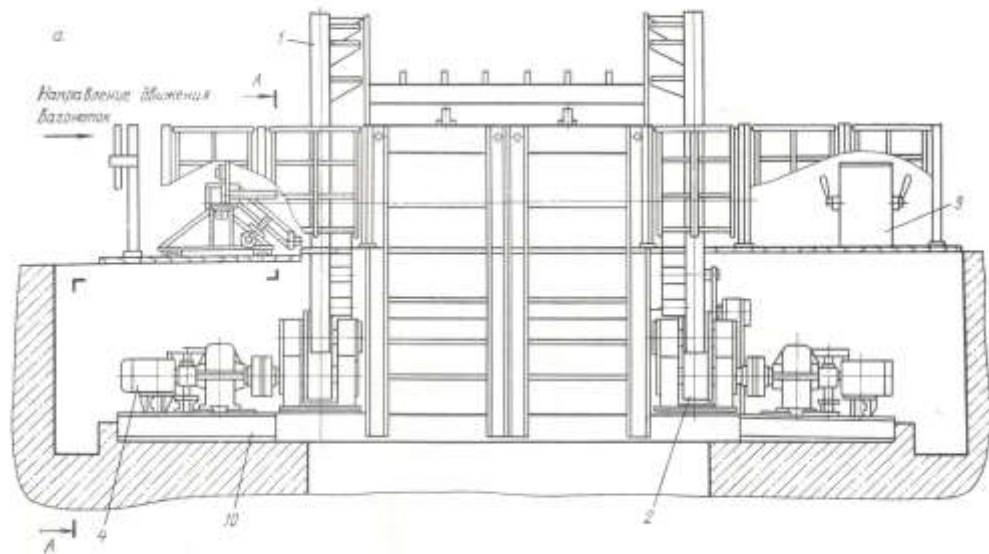


Рисунок 1.2. Перекидач вагонеток

Перекидачі типу ОКЕ і ОК (рис.1.3) застосовуються на гірничодобувних підприємствах чорної, кольорової та гірничо-хімічної промисловостей, в шахтах, не небезпечних по газу і пилу.

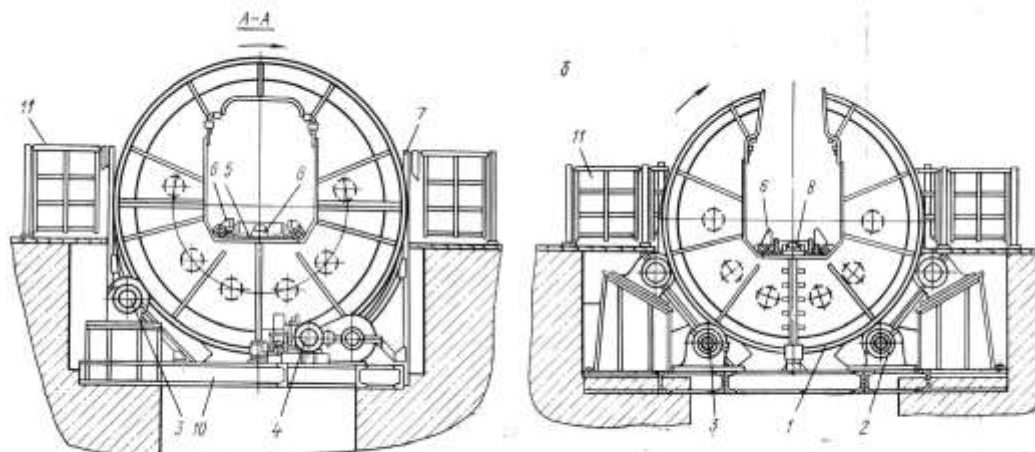


Рис. 11.4. Круговые опрокидыватели:
а — типа ОК; б — типа ОКЭ

Рисунок 1.3. Перекидач шахтних вагонеток типу ОК(а) та ОКЕ(б)

Характеристиками конструкцій розроблених перекидачів є широке використання уніфікованих складальних одиниць і деталей, а також підвищена продуктивність, яка досягається за рахунок збільшення швидкості обертання барабана та маси, що розвантажується за один цикл. Крім того, присутня звукоізольована кабіна для оператора, а також пневмопривід, який використовується для управління стопорами. Конструкція перекидачів обох типів включає в себе барабан, що спирається на приводні та підтримуючі ролики, електропривод з редуктором та електромагнітними гальмами, а також рейкову платформу, закріплену всередині барабана. Для фіксації вагонетки передбачені стопори, а відбійний щит направляє потік розвантажуваного гірського матеріалу в бункер. Вібродарник забезпечує очищення вагонеток через автоматичну подачу повітря, а управління реалізується за допомогою пульта. Вся система монтується на рамі, а огороження забезпечує безпечну експлуатацію [7].

Подача вагонеток до перекидача здійснюється за допомогою електровоза або штовхача. У барабані перекидача типу ОКЕ передбачений отвір для пропуску струмоприймача електровоза.

Передбачено як дистанційне кнопкове, так і автоматичне керування перекидачем. Нормальний режим роботи - автоматичний.

Навантажена вагонетка подається на рейкову платформу барабана і фіксується стопорами, після чого включається привід перекидача. Барабан повертається разом з вагонеткою, і гірська маса висипається з кузова вагонетки в бункер. При повороті барабана на 180 включається механізм для очищення вагонетки, а після повороту на 360 проводиться зупинка барабана. Стопори розкриваються і порожня вагонетка виштовхується з перекидача при відкритих стопорах, після чого цикл роботи перекидача повторюється [2].

Висновки до розділу

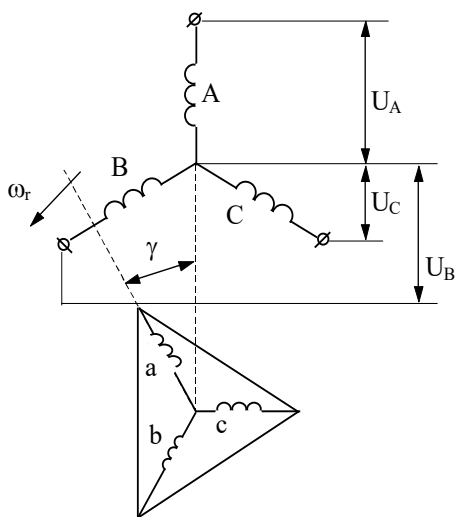
Аналіз основних та технічних характеристики. Процес експлуатації механізму розглянуто детально та послідовно. В результаті можна зробити висновок, що цикл роботи вагонооперекидача змінюється з часом, а динамічні навантаження є непостійними. Це пов'язано із положенням виконавчого органу та зміною його маси внаслідок висипання матеріалу.

Зниження зносу конструкційних елементів механічної частини вагонооперекидача та піввагона в процесі перекидання шляхом покращення конструкції та технології на сьогодні майже вичерпано. Останнім засобом, який залишився, є впровадження систем електроприводу та управлінських законів для оптимізації їх роботи.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Для задач, що виходять за межі лінеаризованої моделі, необхідно моделювати асинхронний двигун (АД) на основі повної системи рівнянь. При складанні цих рівнянь використовуються такі припущення, що стосуються ідеалізованої машини: сталь машини не насичена, фазні обмотки симетричні та зміщені в просторі на 120 градусів, а магнітні та електричні потоки обмоток розподілені синусоїдально уздовж окружності повітряного зазору. Ротор вважається електрично і магнітно симетричним, а реально розподілені обмотки АД компактно замінюються еквівалентними, при цьому магнітна індукція вважається рівною магнітній індукції реальної обмотки.

Для опису перехідних процесів в АД необхідно скласти рівняння електричної рівноваги для всіх контурів, а також рівняння руху ротора. АД представляють як систему магнітозв'язаних обмоток, які розташовані на статорі і роторі (див. рис. 2.1). Система рівнянь електричної рівноваги для контурів статора і ротора має вигляд, зазначений у рівняннях (2.1) - (2.2).



$$\begin{cases} U_A = i_A R_s + \frac{d\psi_A}{dt}; \\ U_B = i_B R_s + \frac{d\psi_B}{dt}; \\ U_C = i_C R_s + \frac{d\psi_C}{dt}. \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} 0 = i_a R_r + \frac{d\psi_a}{dt}; \\ 0 = i_b R_r + \frac{d\psi_b}{dt}; \\ 0 = i_c R_r + \frac{d\psi_c}{dt}, \end{cases} \quad (2.2)$$

Рисунок 2.1. Схема обмоток статора і ротора

де ψ_A, ψ_B, ψ_C - потокозчеплення фаз статора; ψ_a, ψ_b, ψ_c - потокозчеплення фаз ротора; R_s, R_r - активні опори фаз статора і ротора.

З магнітний потік, що зчіплює всі витки котушки, називається потокозчепленням. Він чисельно дорівнює сумі потоків, які генеруються як власним струмом обмотки, так і струмами інших обмоток, які індуктивно пов'язані з основною обмоткою. Таким чином, потокозчеплення будь-якої фази асинхронного двигуна визначається величиною власної індуктивності обмотки та взаємною індуктивністю з усіма іншими обмотками.

Наприклад, для фази "А"

$$\Psi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Aa} i_a + M_{Ab} i_b + M_{Ac} i_c \quad (2.3)$$

де L_A - індуктивність фази; M_{xy} - взаємоіндуктивність між обмотками x і y .

Виходячи з прийнятих припущень про симетричність електричної машини взаємні індуктивності між обмотками статора і ротора:

$$M_{AB} = M_{AC} = M_{BC} = M_s; \quad (2.4)$$

$$M_{ab} = M_{ac} = M_{bc} = M_r. \quad (2.5)$$

Аспектами моделювання обертових електричних машин є те, що просторове розташування обмоток статора й ротора змінюється, що, у свою чергу, впливає на величину взаємної індуктивності між цими обмотками. Максимальне значення взаємної індуктивності досягається, коли осі двох фаз збігаються. У випадку, коли осі розташовані перпендикулярно одна одній, взаємна індуктивність дорівнює нулю. Загалом, взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора змінюється згідно з гармонійним законом.

Для фази "А"

$$M_{Aa} = M \cos \gamma, \quad (2.6)$$

де M - максимальна величина взаємної індуктивності; γ - кут повороту ротора.

Фаза “В” випереджає “А” на 120°

$$M_{Ab} = M \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (2.7)$$

тоді аналогічно для фази “С”, яка відстає на 120° ,

$$M_{Ac} = M \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right). \quad (2.8)$$

Аналогічно для фаз “В” і “С”

$$\begin{cases} M_{Ba} = M \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right), \\ M_{Bb} = M \cos\gamma, \\ M_{Bc} = M \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right); \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\begin{cases} M_{Ca} = M \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right), \\ M_{Cb} = M \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right), \\ M_{Cc} = M \cos\gamma. \end{cases} \quad (2.10)$$

Тепер рівняння потокозчеплення фази в розгорнутому вигляді

$$\begin{aligned} \psi_A = & L_A i_A + M_s i_B + M_s i_C + M i_a \cos\gamma + \\ & + M i_b \cos(\gamma + 2\pi/3) + M i_c \cos(\gamma - 2\pi/3). \end{aligned} \quad (2.11)$$

З урахуванням $i_A + i_B + i_C = 0$, то $-i_A = i_B + i_C$:

$$\Psi_A = (L_s - M_s)i_A + Mi_a \cos \gamma + Mi_b \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + Mi_c \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right). \quad (2.12)$$

Тепер рівняння електричної рівноваги:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_A}{dt} = & (L_s - M_s) \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_a}{dt} \cos \gamma - M\omega i_a \sin \gamma + \\ & + M \frac{di_b}{dt} \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) - M\omega i_b \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + \\ & + M \frac{di_c}{dt} \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) - M\omega i_c \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (2.13)$$

Звідки

$$\begin{aligned} U - i_A R_s + M\omega i_a \sin \gamma + M\omega i_b \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + M\omega i_c \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) = \\ = (L_s - M_s) \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_a}{dt} \cos \gamma + M \frac{di_b}{dt} \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + \\ + M \frac{di_c}{dt} \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (2.14)$$

Складаються ще два рівняння для фаз "В" і "С" статора, а також для всіх фаз ротора. У цій системі рівнянь асинхронного двигуна не передбачається потокозчеплення, а струми статора і ротора є шуканими функціями. Тому цю систему можна назвати системою рівнянь відносно струмів.

Основні недоліки цієї системи полягають у наступному: по-перше, система диференціальних рівнянь є нелінійною, оскільки містить функції від шуканих величин, такі як $\sin$ і $\cos$ кута повороту γ . По-друге, цю систему не можна представити в канонічній формі, оскільки зліва в кожному рівнянні є чотири похідних від невідомих функцій.

Розв'язок такої системи можливий завдяки використанню наступного алгоритму: спочатку, маючи початкові значення струмів, швидкості і кута повороту, знаходяться поточні значення взаємних індуктивностей між обмотками статора та ротора. Потім, на основі цих значень, обчислюються праві частини рівнянь електричної рівноваги для всіх фаз. Після цього система з шести рівнянь розглядається як система лінійних алгебраїчних рівнянь відносно похідних струмів. З використанням чисельних методів (наприклад, метод Крамера або Гаусса) можна знайти похідні струмів. Наприкінці, проводиться чисельна інтеграція системи диференціальних рівнянь для визначення невідомих.

Вирішити систему диференціальних рівнянь відносно струмів досить складно, оскільки струми залежать від потокозчеплення всіх обмоток. Однак, задавшись початковими значеннями потокозчеплення, можна визначити струми, розв'язуючи систему рівнянь для потокозчеплення як систему лінійних рівнянь.

Таким чином, систему диференціальних рівнянь асинхронного двигуна в фазній системі координат можна використовувати для розрахунків перехідних процесів. Головним недоліком є громіздкість, велика кількість нелінійних елементів та необхідність вирішення проміжної системи лінійних рівнянь.

Заної вище моделі асинхронного двигуна (АД) в фазних координатах видно, що рівняння в трифазній системі координат є об'ємними, і їх розв'язання пов'язане з істотними алгоритмічними ускладненнями. Для

спрощення системи диференціальних рівнянь АД доцільно використовувати метод лінійної заміни змінних.

$$\begin{cases} i_x = \varphi_{11}i_A + \varphi_{12}i_B + \varphi_{13}i_C; \\ i_y = \varphi_{21}i_A + \varphi_{22}i_B + \varphi_{23}i_C; \\ i_0 = \varphi_{31}i_A + \varphi_{32}i_B + \varphi_{33}i_C. \end{cases} \quad (2.15)$$

Лінійне перетворення повинно бути однозначним, тому що в будь-який момент часу має виконуватися нерівність:

$$\begin{vmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \varphi_{13} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \varphi_{23} \\ \varphi_{31} & \varphi_{32} & \varphi_{33} \end{vmatrix} \neq 0, \text{ або } \det(\varphi) \neq 0. \quad (2.16)$$

Виберемо струм i_0 у вигляді $i_0 = \frac{1}{3}(i_A + i_B + i_C)$. Зручність такого вибору полягає в тому, що часто $i_0 = 0$ (для схеми "зірки з ізолюваною нейтральною точкою").

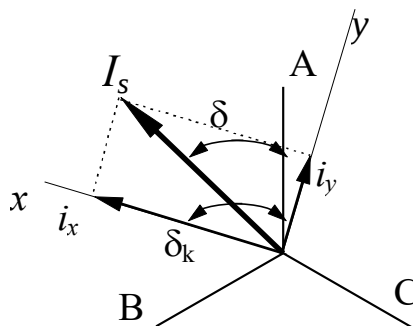


Рисунок 2.2. До висновку формул перетворення координат

Розглянемо, як висловлюються струми i_x і i_y через фазні струми. висловимо i_x і i_y як проекції зображуючого вектора. Для зображення двох струмів необхідно вибрати дві осі і прийняти ці осі ортогональними (рис.2.2).

Кут між віссю фази “А” і зображаючим вектором струму I_s складає δ , між віссю фази “А” і віссю фази Х $-\delta_k$. У загальному випадку координатна система ХУ обертається у просторі з постійною швидкістю ω_k .

Проекції зображуючого вектора на осі “А”, “В”, “С”:

$$\begin{cases} i_A = I_s \cos \delta; \\ i_B = I_s \cos \left(\delta - \frac{2\pi}{3} \right); \\ i_C = I_s \cos \left(\delta + \frac{2\pi}{3} \right). \end{cases} \quad (2.17)$$

В ортогональній системі xy :

$$\begin{cases} i_x = I_s \cos(\delta_k - \delta); \\ i_y = I_s \sin(\delta_k - \delta). \end{cases} \quad (2.18)$$

Використовуючи тригонометричну тотожність

$\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta + \sin \alpha \cdot \sin \beta$, остаточно отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} i_x = \frac{3}{2} \left[i_A \cos \delta_k + i_B \cos \left(\delta_k - \frac{2\pi}{3} \right) + i_C \cos \left(\delta_k + \frac{2\pi}{3} \right) \right]; \\ i_y = \frac{3}{2} \left[i_A \sin \delta_k + i_B \sin \left(\delta_k - \frac{2\pi}{3} \right) + i_C \sin \left(\delta_k + \frac{2\pi}{3} \right) \right]. \end{cases} \quad (2.19)$$

Оскільки в загальному випадку система координат ХУ обертається в просторі зі швидкістю ω_k , то $\delta_k = \omega_k t$. Тоді струми еквівалентних контурів статора і ротора пов'язані з фазними наступними співвідношеннями:

$$\begin{cases} i_{xs} = \frac{3}{2} \left[i_A \cos \omega_k t + i_B \cos \left(\omega_k t - \frac{2\pi}{3} \right) + i_C \cos \left(\omega_k t + \frac{2\pi}{3} \right) \right]; \\ i_{ys} = \frac{3}{2} \left[i_A \sin \omega_k t + i_B \sin \left(\omega_k t - \frac{2\pi}{3} \right) + i_C \sin \left(\omega_k t + \frac{2\pi}{3} \right) \right]. \end{cases} \quad (2.20)$$

$$\begin{cases} i_{xr} = \frac{3}{2} \left[i_a \cos(\omega_k t - \gamma) + i_b \cos \left(\omega_k t - \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left(\omega_k t - \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right]; \\ i_{yr} = \frac{3}{2} \left[i_a \sin(\omega_k t - \gamma) + i_b \sin \left(\omega_k t - \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \sin \left(\omega_k t - \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right]. \end{cases} \quad (2.21)$$

Формули зворотних перетворень:

для статора –

$$\begin{cases} i_A = i_{xs} \cos \omega_k t - i_{ys} \sin \omega_k t; \\ i_B = i_{xs} \cos \left(\omega_k t - \frac{2\pi}{3} \right) - i_{ys} \sin \left(\omega_k t - \frac{2\pi}{3} \right); \\ i_C = i_{xs} \cos \left(\omega_k t + \frac{2\pi}{3} \right) - i_{ys} \sin \left(\omega_k t + \frac{2\pi}{3} \right). \end{cases} \quad (2.22)$$

для ротора -

$$\begin{cases} i_a = i_{xr} \cos(\omega_k t - \gamma) - i_{yr} \sin(\omega_k t - \gamma); \\ i_b = i_{xr} \cos \left(\omega_k t - \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) - i_{yr} \sin \left(\omega_k t - \gamma - \frac{2\pi}{3} \right); \\ i_c = i_{xr} \cos \left(\omega_k t - \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) - i_{yr} \sin \left(\omega_k t - \gamma + \frac{2\pi}{3} \right). \end{cases} \quad (2.23)$$

Якщо реальні фазні напруги визначаються співвідношеннями

$$\begin{cases} U_A = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0); \\ U_B = U_m \cos \left(\omega_0 t + \varphi_0 - \frac{2\pi}{3} \right); \\ U_C = U_m \cos \left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{2\pi}{3} \right), \end{cases} \quad (2.24)$$

То напруги у перетвореній системі:

$$\begin{cases} U_{xs} = U_m \cos[(\omega_0 - \omega_k)t + \varphi_0] \\ U_{ys} = U_m \sin[(\omega_0 - \omega_k)t + \varphi_0] \end{cases} \quad (2.25)$$

Тепер рівняння АД будуть мати вигляд:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{xs}}{dt} - \omega_k \psi_{ys} + i_{xs} R_s = U_{xs}; \\ \frac{d\psi_{ys}}{dt} + \omega_k \psi_{xs} + i_{ys} R_s = U_{ys}; \\ \frac{d\psi_{xr}}{dt} + (\omega_k - \omega_r) \psi_{yr} + i_{xr} R_r = 0; \\ \frac{d\psi_{yr}}{dt} - (\omega_k - \omega_r) \psi_{xr} + i_{yr} R_r = 0; \\ M = \frac{3}{2} [\psi_{ys} \cdot i_{xs} - \psi_{xs} \cdot i_{ys}]. \end{cases} \quad (2.26)$$

Потокозчеплення еквівалентних контурів:

$$\begin{aligned} \psi_{xs} &= L_s i_{xs} + L_m i_{xr}; \\ \psi_{ys} &= L_s i_{ys} + L_m i_{yr}; \\ \psi_{xr} &= L_r i_{xr} + L_m i_{xs}; \\ \psi_{yr} &= L_r i_{yr} + L_m i_{ys}; \end{aligned} \quad (2.27)$$

У теорії моделювання електромагнітних і електромеханічних процесів в електричних машинах розглядають 3 основні координатні системи, які є окремими випадками розглянутої ортогональної системи.

1) Координатна система, нерухома відносно ротора - “ $d,q,0$ ”, $\omega_k = \omega_r$

Ця система найчастіше застосовується для аналізу синхронних і асинхронних машин при несиметрії ротора. Зручність цієї системи полягає в тому, що електрична машина, в магнітному відношенні, є симетричною незалежно від кутового положення ротора.

Система “ $d, q, 0$ ” є єдиною, що приводить диференціальні рівняння синхронної машини до системи рівнянь з постійними коефіцієнтами. Оскільки $\omega_k = \omega_r$, то перетворені напруги

$$\begin{cases} U_d = U_m \cos[(\omega_0 - \omega_r)t + \varphi_0]; \\ U_q = U_m \sin[(\omega_0 - \omega_r)t + \varphi_0]. \end{cases} \quad (2.28)$$

є несинусоїдальними функціями часу.

2) Координатна система, нерухома відносно статора “ $\alpha, \beta, 0$ ”, в неї $\omega_k = 0$. Система знаходить застосування при дослідженні частотно керованих електроприводів і груп електричних машин, які працюють від загальної мережі.

перетворені напруги

$$\begin{cases} U_\alpha = U_A = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0); \\ U_\beta = U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \end{cases} \quad (2.29)$$

Для такого напрямку α се перетворені змінні на цій осі збігаються з реальними фазними змінними.

3) Координатна система, нерухома відносно поля статора - “ $u, v, 0$ ”, в неї $\omega_k = \omega_0$. Ця система координат знаходить застосування при моделюванні АД в симетричних режимах роботи. Вісь α співпадає з віссю “А”.

перетворені напруги

$$\begin{cases} U_u = U_m \cos(\varphi_0); \\ U_v = U_m \sin(\varphi_0), \end{cases} \quad (2.30)$$

є постійними величинами.

Рівняння АД в ортогональній системі координат можуть бути записані відносно струмів або потокозчеплення.

Найбільш часто система диференціальних рівнянь АД в системі “ α, β , 0” записується відносно потокозчеплення. Така система має вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_{\alpha s}}{dt} = U_{\alpha s} - AR_s(\psi_{\alpha s}L_r' - \psi_{\alpha r}L_{\mu}); \\ \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} = -U_{\beta s} - AR_s(\psi_{\beta s}L_r' - \psi_{\beta r}L_{\mu}); \\ \frac{d\psi_{\alpha r}}{dt} = -AR_r'(\psi_{\alpha r}L_s - \psi_{\alpha s}L_{\mu}) + \psi_{\beta r}\omega; \\ \frac{d\psi_{\beta r}}{dt} = -AR_r'(\psi_{\beta r}L_s - \psi_{\beta s}L_{\mu}) + \psi_{\alpha r}\omega; \\ M = \frac{3}{2}pL_{\mu}A(\psi_{\alpha s}\psi_{\beta r} - \psi_{\beta s}\psi_{\alpha r}); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}pM - M_c. \end{array} \right. \quad (2.31)$$

де $A = \frac{1}{L_s L_r - L_{\mu}^2}$, R_s , R_r - активний опір фази відповідно статора і

ротора; L_s , L_r - повна індуктивність обмоток відповідно статора і ротора; L_{μ} - взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора.

Значення струмів пов'язані з потокозчеплення такими рівняннями:

$$i_{\alpha s} = A(L_s \psi_{\alpha s} - L_{\mu} \psi_{\alpha r}); \quad (2.32)$$

$$i_{\beta s} = A(L_r \psi_{\beta s} - L_{\mu} \psi_{\beta r}); \quad (2.33)$$

$$i_{\alpha r} = A(L_s \psi_{\alpha r} - L_{\mu} \psi_{\alpha s}); \quad (2.34)$$

$$i_{\beta r} = A(L_r \psi_{\beta r} - L_{\mu} \psi_{\beta s}). \quad (2.35)$$

У безпосередній системі координат (α, β) вектор струму, напруги або потокозчеплення може бути представлений в алгебраїчній і показовій формі:

$$\bar{i}_{S.H} = i\alpha + j \cdot i\beta = I_m \cdot e^{J\psi i} \quad (2.36)$$

В системі обертових координат (x, y) той же вектор представляють у вигляді:

$$\bar{i}_{S.BP} = ix + j \cdot iy = I_m \cdot e^{J(\psi i - \alpha k \cdot t)} = \bar{i}_{S.H} e^{-J\alpha k \cdot t} \quad (2.37)$$

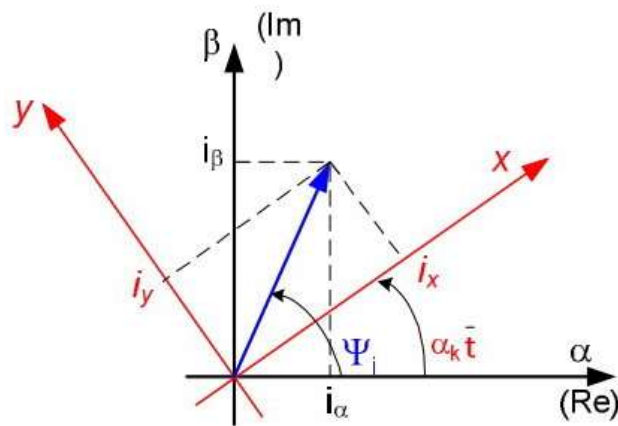


Рисунок 2.3. Обертова система координат

Рівняння переходу від нерухомої системи координат до обертової системи координат:

$$\begin{aligned} \bar{i}_{S.BP} &= \bar{i}_{S.H} \cdot e^{-j \cdot \alpha_k \cdot \bar{t}} \cdot \begin{cases} i_x = i_\alpha \cdot \cos \alpha_k \cdot \bar{t} + i_\beta \cdot \sin \alpha_k \cdot \bar{t} \\ i_y = i_\beta \cdot \cos \alpha_k \cdot \bar{t} + i_\alpha \cdot \sin \alpha_k \cdot \bar{t} \end{cases} \\ \bar{i}_{S.H} &= \bar{i}_{S.BP} \cdot e^{j \cdot \alpha_k \cdot \bar{t}} \cdot \begin{cases} i_\alpha = i_x \cdot \cos \alpha_k \cdot \bar{t} + i_y \cdot \sin \alpha_k \cdot \bar{t} \\ i_\beta = i_y \cdot \cos \alpha_k \cdot \bar{t} + i_x \cdot \sin \alpha_k \cdot \bar{t} \end{cases} \end{aligned} \quad (2.38)$$

В сучасних САЕП регулятори реалізовані в обертовій системі координат, а струми в обмотках - в нерухомій системі. Крім цього в ЕП використовують перетворювачі фаз 2/3 і 3/2

Перетворювачі фаз 2/3 перетворюють струми i_α , i_β в фазні струми i_A , i_B , i_C .

$$i_A = i_\alpha; i_B = -\frac{1}{2} \cdot i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_\beta; i_C = -\frac{1}{2} \cdot i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_\beta \quad (2.39)$$

Перетворювачі фаз 3/2 перетворюють фазні струми в проекції:

$$i_\alpha = i_A; i_\beta = \frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}}$$

У результаті функціональна схема САЕП має вигляд:

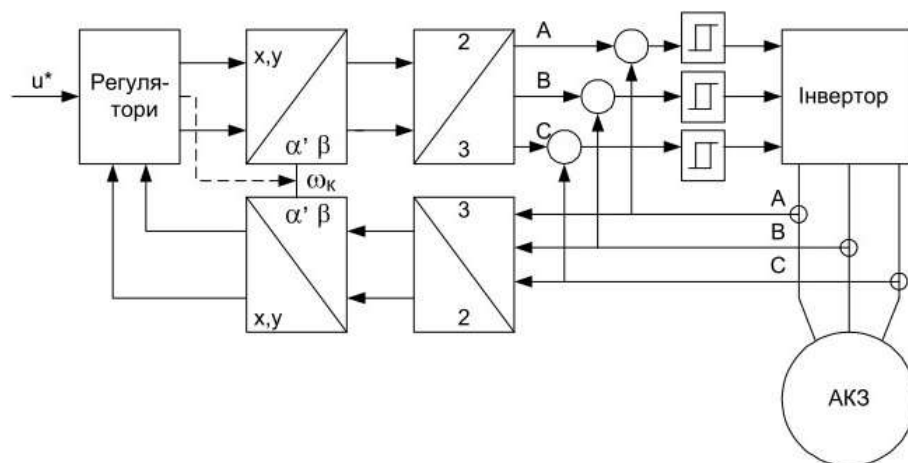


Рисунок 2.4. Функціональна схема САЕП

Схема асинхронної машини з короткозамкненим ротором (АКЗ) представлена рисунку 2.5.

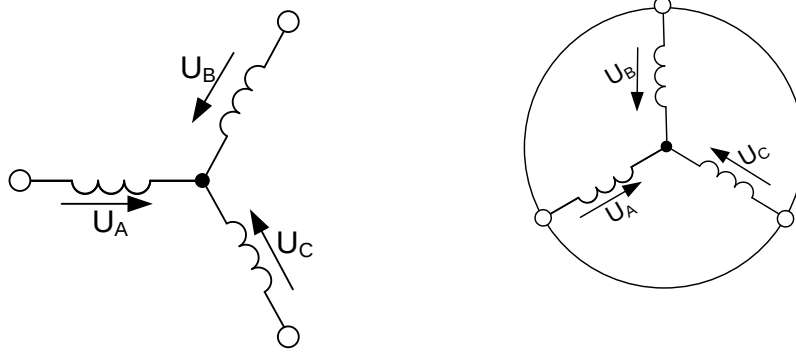


Рисунок 2.5. Узагальнена асинхронна машина

Якщо обмотку ротора при цьому замкнути закоротко система рівняння для опису асинхронної машини приймає вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{U}_S = R_S \cdot \bar{i}_S + \frac{d\bar{\psi}_S}{dt} + j \cdot \omega_K \cdot \bar{\psi}_S, \\ 0 = R_R \cdot \bar{i}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j \cdot (\omega_K \cdot p \cdot \omega_m) \cdot \bar{\psi}_R, \\ \bar{\psi}_S = L_S \cdot \bar{i}_S + L_m \cdot \bar{i}_R, \\ \bar{\psi}_R = L_m \cdot \bar{i}_S + L_r \cdot \bar{i}_R, \\ M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot k_R \cdot \text{Mod}(\bar{\psi}_R \times \bar{i}_S), \\ j \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_n. \end{array} \right. \quad (2.40)$$

Перетворимо ці рівняння, виключивши з них. ($\bar{i}_R$ и $\bar{\psi}_S$). Тоді рівняння після відповідних перетворень прийме вигляд:

$$\begin{cases} \bar{U}_S = r \cdot \bar{i}_S + L_S \frac{d\bar{i}_S}{dt} + j \cdot \omega_K \cdot L_S \cdot \bar{i}_S - \frac{k_R}{T_R} \cdot \bar{\psi}_R + j \cdot k_R \cdot p \cdot \omega_m \cdot \bar{\psi}_R, \\ 0 = -k_R \cdot R_R \cdot \bar{i}_S + \frac{1}{T_R} \cdot \bar{\psi}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j \cdot (\omega_K - p \cdot \omega_m) \cdot \bar{\psi}_R, \\ M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot k_R \cdot \text{Mod}(\bar{\psi}_R \times \bar{i}_S), \\ j \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H. \end{cases} \quad (2.41)$$

Для аналізу роботи групи асинхронних двигунів шахтного перекидача будемо користуватися аналізом АКЗ в нерухомій системі координат « α , β , 0».

В цій системі координат ($\omega_K = 0$), дійсна вісь позначається α , а уявна β . В цьому випадку просторові вектора розкладаються по осях [3].

$$\begin{cases} U_S = U_{s\alpha} + jU_{s\beta}, i_S = i_{s\alpha} + ji_{s\beta}, \psi_R = \psi_{R\alpha} + j\psi_{R\beta} \\ U_{s\alpha} = r \cdot i_{s\alpha} + L_S \cdot \frac{di_{s\alpha}}{dt} - \frac{K_R}{T_R} \cdot \psi_{R\alpha} - K_R \cdot p \cdot \omega_m \cdot \psi_{R\beta}, \\ U_{s\beta} = r \cdot i_{s\beta} + L_S \cdot \frac{di_{s\beta}}{dt} - \frac{K_R}{T_R} \cdot \psi_{R\beta} - K_R \cdot p \cdot \omega_m \cdot \psi_{R\alpha}, \\ 0 = -K_R \cdot R_R \cdot i_{s\alpha} + \frac{1}{T_R} \cdot \psi_{R\alpha} + \frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} + p \cdot \omega_m \cdot \psi_{R\beta}, \\ 0 = -K_R \cdot R_R \cdot i_{s\beta} + \frac{1}{T_R} \cdot \psi_{R\beta} + \frac{d\psi_{R\beta}}{dt} + p \cdot \omega_m \cdot \psi_{R\alpha}, \\ M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot K_R \cdot (\psi_{R\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{R\beta} \cdot i_{s\alpha}), \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H \end{cases} \quad (2.42)$$

Дана система рівнянь в операторній формі має наступний вигляд:

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = r \cdot (1 + T'_S \cdot S) \cdot i_{s\alpha} - \frac{K_R}{T_R} \cdot \psi_{R\alpha} - K_R \cdot p \cdot \omega_m \cdot \psi_{R\beta}, \\ U_{s\beta} = r \cdot (1 + T'_S \cdot S) \cdot i_{s\beta} - \frac{K_R}{T_R} \cdot \psi_{R\beta} - K_R \cdot p \cdot \omega_m \cdot \psi_{R\alpha}, \\ 0 = -K_R \cdot R_R \cdot i_{s\alpha} + \frac{1}{T_R} \cdot (1 + T_R \cdot S) \cdot \psi_{R\alpha} + p \cdot \omega_m \cdot \psi_{R\beta}, \\ 0 = -K_R \cdot R_R \cdot i_{s\beta} + \frac{1}{T_R} \cdot (1 + T_R \cdot S) \cdot \psi_{R\beta} + p \cdot \omega_m \cdot \psi_{R\alpha}, \\ M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot K_R \cdot (\psi_{R\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{R\beta} \cdot i_{s\alpha}), \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H. \end{cases} \quad (2.43)$$

Де $\bar{T}'_S = \frac{L'_S}{r}$, $r = (R_S + K_R^2 \cdot R_R)$, $L'_S = (L_S - \frac{L_m^2}{L_R})$, $K_R = \frac{L_m}{L_R}$, $T_R = \frac{L_R}{R_R}$

Структурна схема АКЗ, яка побудована на підставі отриманих виразів представлена на рис. 2.6.

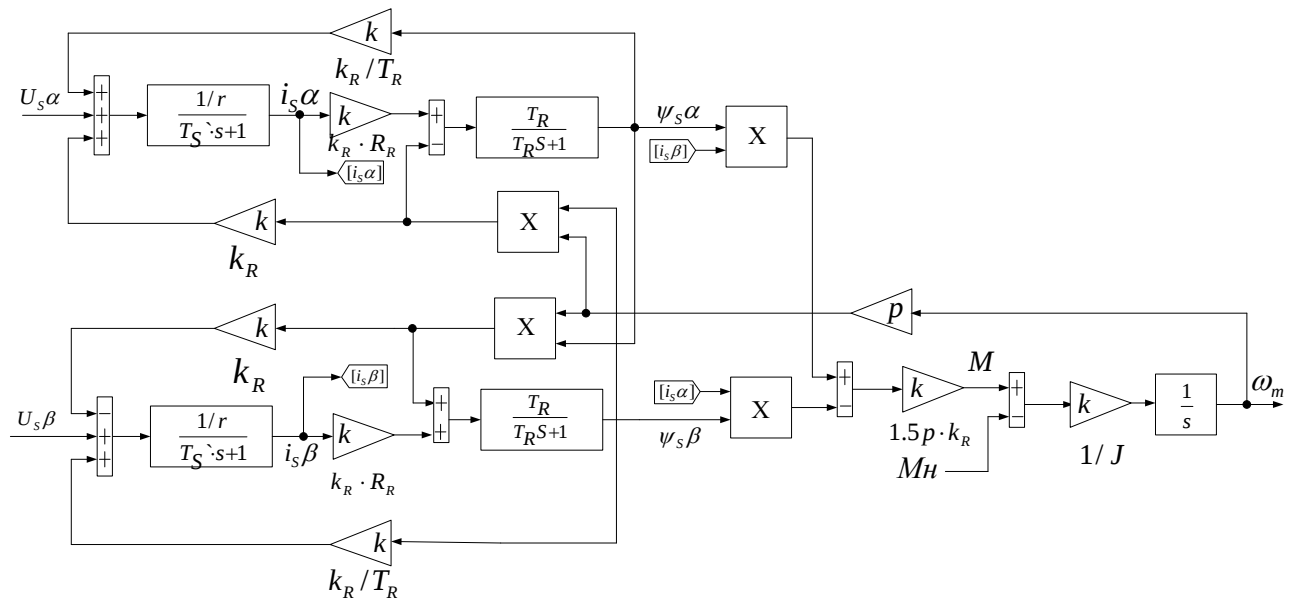


Рисунок 2.6. Структурна схема АКЗ

З урахуванням наявних і розрахованих параметрів електродвигуна складаємо модель АКЗ в нерухомій ортогональній системі координат «α, β».

0» в програмному пакеті MatLab 7. На основі структурної схемі зображеної на рис 2.6 і із відповідними підстановками складаю математичну модель у програмному пакеті MatLab/Simulink.

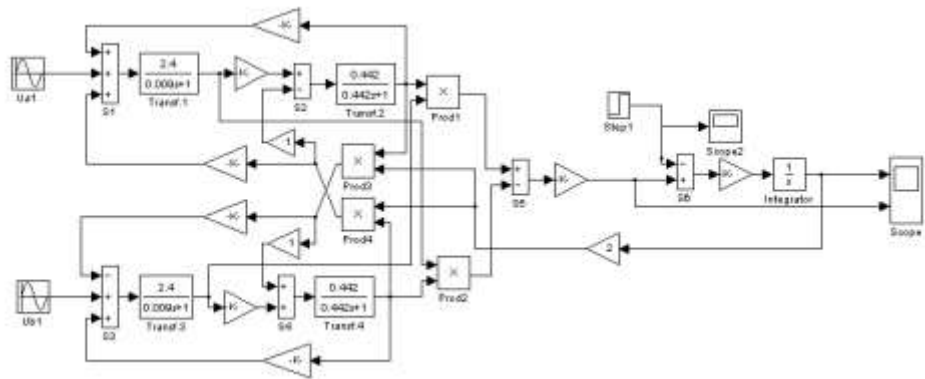


Рисунок 2.7. Модель АКЗ для одного двигуна

Отримані перехідні процеси в електромеханічній системі по кутовий швидкості $\omega(t)$ і сумарним електромагнітним моментом $M_e(t)$ відповідно:

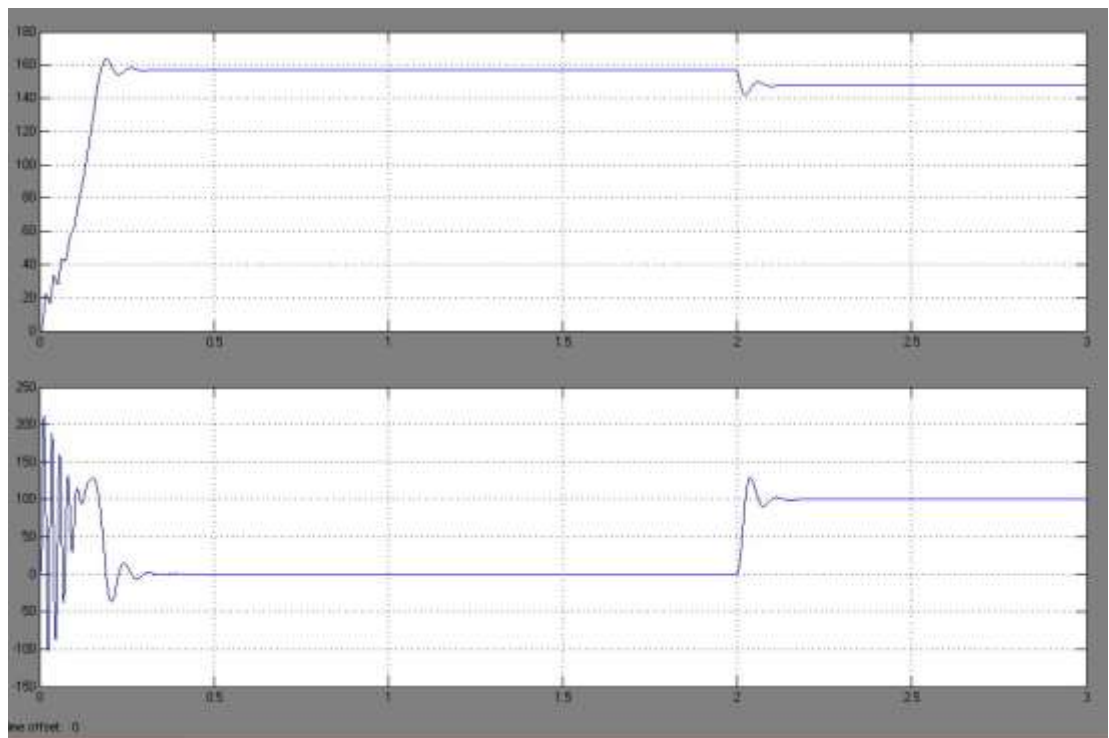


Рисунок 2.8. Перехідні процеси $\omega(t)$ і $M_e(t)$ для системи АКЗ

Перехідні процеси підтверджують правильність роботи схеми, а характеристики відповідають паспортним даним обраного двигуна. Було

вирішено досліджувати цей об'єкт у системі координат « α , β , 0», оскільки вона оптимально підходить для аналізу груп електродвигунів, що працюють від однієї мережі. Ця система, на відміну від інших, дозволяє більш точно дослідити електропривідну систему та методи її управління.

Дослідження багатодвигунного електроприводу будуть проведені в чотирьох розділах. Також планується провести порівняння всіх можливих варіантів налаштування схеми з обґрунтуванням обраного рішення.

Висновки до розділу

Су диференціальних рівнянь асинхронного двигуна (АД) у фазній системі координат можна використовувати для аналізу перехідних процесів. Основним недоліком цього підходу є громіздкість, велика кількість нелінійних елементів, а також необхідність розв'язувати проміжну систему лінійних рівнянь. Для спрощення розрахунків зручно застосовувати ортогональну систему координат. З трьох можливих варіантів була вибрана система « α , β , 0», оскільки вона дозволяє ефективно розрахувати параметри роботи групи двигунів електроприводу вагоноперекидача.

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ВАГОНОПЕРЕКИДАЧА

Simics — це окрема бібліотека в пакеті Simulink середовища MATLAB, призначена для моделювання механічного руху твердих тіл. Основна мета цієї бібліотеки полягає в моделюванні просторових рухів твердотільних машин і механізмів під час інженерного проектування, сполучуючись законами теоретичної механіки.

До переваг використання SimMechanics для моделювання механічних систем можна віднести простоту створення моделей, що дозволяє навіть користувачам з обмеженими знаннями отримати результат, а також високу швидкість обчислень, що є особливо важливим при моделюванні рухів багатоланкових об'єктів з великою кількістю ступенів свободи.

Механічна система представлена у вигляді пов'язаної блокової діаграми, аналогічно іншим моделям Simulink, з використанням блоків з бібліотеки SimMechanics. Параметри механічних блоків визначаються масово-інерційними властивостями тіл, координатами ключових точок (центри мас, точки прикладання сили, точки приєднання шарнірів і з'єднань). На відміну від інших блоків Simulink, які виконують математичні операції або обробляють сигнали, механічні блоки в SimMechanics безпосередньо представляють фізичні тіла або зв'язки між ними.

Моделі механічних систем можуть включати будь-яку кількість твердих тіл, з'єднаних між собою шарнірами, з можливістю наявності поступальних і обертальних ступенів свободи. SimMechanics також дозволяє моделювати механізми в ієрархічних структурах, накладати кінематичні обмеження, сили та обертаючі моменти, а також визначати взаємні траєкторії руху об'єктів. Термін "механізм" у SimMechanics має два значення: по-перше, це фізична система, що включає принаймні одне тверде тіло, і, по-друге, це

топологічно окрема блокова діаграма, що відображає один фізичний механізм. Модель може містити один або декілька механізмів і складається з блокової діаграми, що включає один або більше механізмів, які є набором з'єднаних між собою вузлів і представляють єдиний фізичний механізм.

Основною складовою механізму перекидача вагонеток є сукупність зубчастих коліс і зубчатий вінець барабана. Ця частина буде реалізована в даному підрозділі.

Блоки твердих тіл

Блок *Body* являє собою тверде жорстке тіло (окрему ланку механізму, рухи якого моделюються) з визначеним користувачем параметрами. Він і представлятиме частині це механізму окремо

У якості заданих параметрів блока BODY маємо:

а) Маса тіла (Mass) яка може бути виражена в різних одиницях

в) Тензор інерції тіла відносно його центру мас (Inertia), що представляє собою матрицю розміром 3×3 :

$$H = \begin{bmatrix} J_{ix} & 0 & 0 \\ 0 & J_{iy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{iz} \end{bmatrix},$$

де J_{ix} , J_{iy} , J_{iz} , – осьові моменти інерції тіла відносно осей власної локальної системи координат, пов'язаної з його центром мас.

Зубчасті колеса і барабан в простому поданні мають циліндричну форму, тому для обчислення тензора інерції тіла відносно його мас використовую наступні формули, з відповідною постановою розмірних даних перекидача:

$$J_{ix} = \frac{1}{4} \cdot m \cdot (R_2 + \frac{1}{3} \cdot h^2); J_{iy} = \frac{1}{4} \cdot m \cdot (R^2 + \frac{1}{3} \cdot h^2); J_{iz} = \frac{1}{2} \cdot (m \cdot R^2) \quad (3.1)$$

Представляє собою нерухому опору (підставу), яка жорстко закріплена в абсолютній інерціальній системі координат Землі. Присутність хоча б одного такого блоку є обов'язковою в будь-якій механічній моделі окремого механізму. У вікні налаштування блоку задається вектор координат $[X,Y,Z]$ для однієї нерухомої точки механізму відносно глобальної інерціальної системи координат WORLD. Механічний вхід/вихід блоку Ground, що відповідає заданій нерухомій точці, має бути підключений до блока шарнірного зчленування (з розділу Joints), після чого під'єднується блок Body, і цей процес повторюється для забезпечення руху наступних тіл Body.

Блок Machine Environment служить для налаштування параметрів механічного середовища моделювання для машини (механізму) та пов'язаний з механічним блоком Ground. Розділ Joints бібліотеки SimMechanics є другим за важливістю після розділу Bodies. Він містить блоки шарнірних зчленувань з різною кількістю ступенів свободи, які зв'язують між собою окремі блоки Body (також блок Ground з блоком Body). Це дозволяє тілесним системам (ланкам механізму) здійснювати відносний рух.

Будуть використані кілька блоків. По-перше, блок Revolute забезпечує одну обертальну ступінь свободи для тіла, що слідує за ним. У SimMechanics всі поступальні ступені свободи блоків з розділу Joints позначаються символом P з порядковим номером, тоді як обертальні ступені свободи мають позначення R. До цих блоків будуть підключені сигнали управління за допомогою віртуальних збудників (блоків) руху Actuators.

Крім того, блок Weld (Зварювання) дозволяє встановити жорстке з'єднання між двома тілами і може бути використаний для створення моделей повідкових механізмів.

Блоки шарнірних зчленувань (Joints)

Дляення відносних рухів тіл під час моделювання машин і механізмів, недостатньо лише блоків із розділу Bodies та Joints. Ці блоки лише описують

структуру механізму, але не дозволяють отримати інформацію про рухи. Тому необхідно підключити інші блоки, які моделюють впливи і знімають параметри системи. З'єднання механічних блоків SimMechanics з звичайними S-блоками Simulink можливе тільки за допомогою спеціалізованих блоків механічних віртуальних реєстраторів (Sensors) та збудників (Actuators).

Блок Joint Actuator дозволяє задати сигнал залежно від часу. Це може бути або силовий вплив між елементами примітиву, обраного зі списку, або відносний рух частин даного примітиву. Блок Joint Sensor надає можливість вимірювати характеристики відносного руху частин обраного примітиву, такі як кут повороту, відносна кутова швидкість, відносне кутове прискорення, обчислений момент, позиція, швидкість, прискорення, обчислена сила і кватерніони, що описують кутове положення.

Блок Body Sensor дозволяє вимірювати параметри руху точки тіла, до порту якої він підключений. Серед вимірюваних характеристик є координати, швидкість, кутова швидкість, матриця обертання, прискорення та кутове прискорення. Вибір необхідних вимірюваних параметрів здійснюється шляхом установки прапорців в полях налаштувань блоку. Всі виміряні параметри можуть бути об'єднані в один вектор на виході, якщо активувати опцію "Output selected parameters as one signal".

Блоки розділу Constraints & Drivers дозволяють моделювати як стаціонарні, так і нестаціонарні обмеження на переміщення між тілами. Стаціонарні обмеження, які не залежать від часу, позначаються словом "Constraint", тоді як нестаціонарні обмеження, що змінюються в часі, мають в назві слово "Driver".

Блок Gear Constraint дозволяє моделювати обертання двох тіл, подібно до зубчастого зачеплення, з визначеними радіусами ділительних кіл. Передавальне відношення визначається, як у зубчастій передачі, через відношення діаметрів ділительних кіл. Параметрами блоку є два умовних радіуси: ділительна окружність ведучого тіла (Base) та ділительна окружність

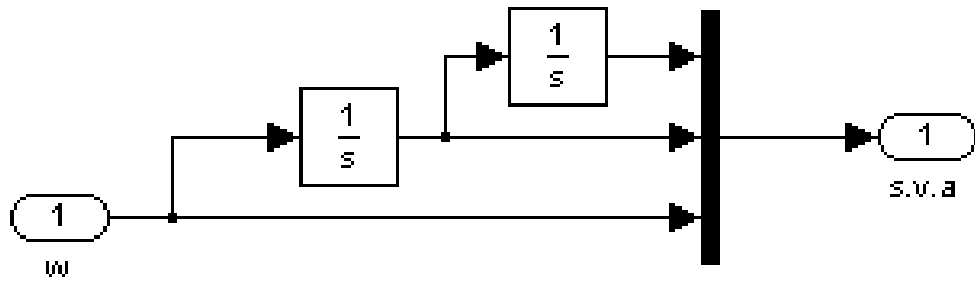


Рисунок 3.2. Структурна схема алгоритму перетворення сигналу завдання

Отриману віртуальну модель основного механізму перекидача має наступний вигляд:

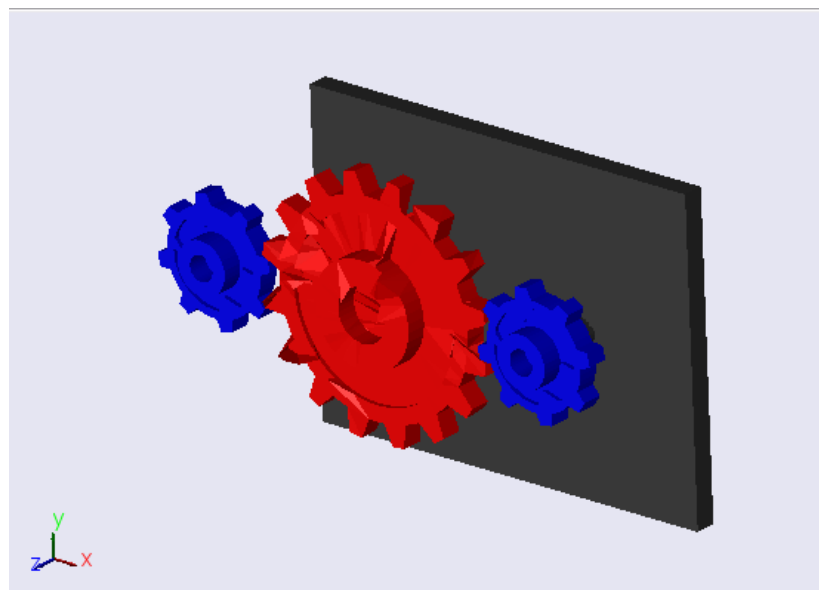
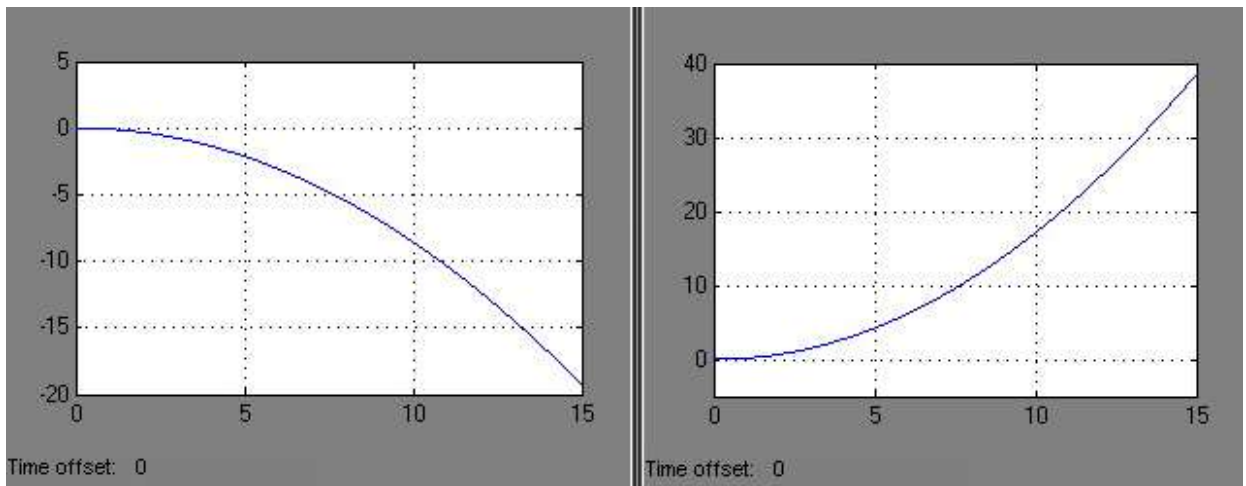


Рисунок 3.3. Віртуальна модель основного механізму перекидання

Проінтегрувавши характеристики кутової швидкості, отримуємо графіки кута повороту частини примітиву барабана (рис. 3.4,а) і зубчастого колеса (рис. 3.4, б), з'єднаної з тілом Follower, відносно його частини, з'єднаної з тілом Base.



а)

б)

Рисунок 3.4. Графік кута повороту примітива а) барабана и б) зубчатого колеса

Механізми, що з'єднують двигун з робочою машиною, можуть бути представлені не лише суцільними валами, планетарними передачами або канатами. Зазвичай між двигуном і робочою машиною встановлюються редуктори, що змінюють швидкість обертання. При механічному з'єднанні через шестерні важливо враховувати вплив зазору на динаміку всієї механічної системи, тому розглянемо рівняння двомасової системи в таких умовах.

Наявність зазору призводить до нелінійності в залежностях. Щоб проаналізувати цю нелінійність, звернемося до впливу зазору на прикладі зубчастої передачі (див. рис. 3.5). На початку обертання ротора двигуна робоча машина залишатиметься нерухомою через наявність зазору. У цей момент виникає пружний момент. Як тільки зазор буде вичерпаним, робоча машина почне обертатися, що викликатиме появу нового пружного моменту. Залежність у такій ситуації має вигляд нелінійності типу "нечутливість", графік якої продемонстровано на рис. 3.6.

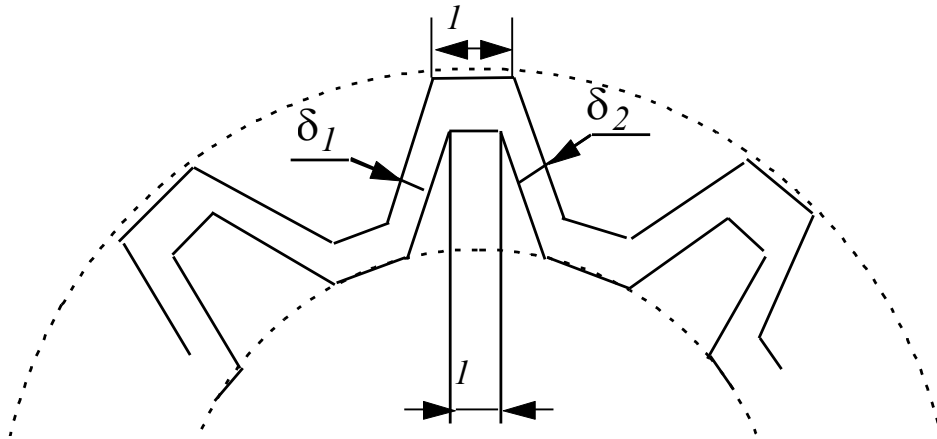


Рисунок 3.5. До визначення зазору в механічній передачі

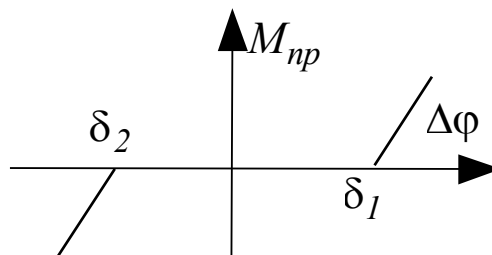


Рисунок 3.6. Нелінійна залежність пружного моменту за наявності зазору

Величина зазору δ_1 і δ_2 залежить від початкового положення передачі. Зазвичай беруть

$$\delta_1 = \delta_2 = \frac{\delta}{2}, \quad (3.2)$$

де $\delta = l_1 - l_2$.

Система диференціальних рівнянь двохмасової механічної системи з урахуванням зазору має вигляд .

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_{\partial\partial} - M_{np}; \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{np} - M_{cm}; \\ \frac{d\Delta\varphi}{dt} = \omega_1 - \omega_2; \\ M_{np} = \begin{cases} c_{12} \left(\Delta\varphi - \frac{\delta}{2} \right), & \Delta\varphi \geq \frac{\delta}{2}; \\ 0, & |\Delta\varphi| < \frac{\delta}{2}; \\ c_{12} \left(\Delta\varphi + \frac{\delta}{2} \right), & \Delta\varphi \leq -\frac{\delta}{2}. \end{cases} \end{array} \right. \quad (3.3)$$

Структурна схема, що відповідає даній системі рівнянь наведена на рис.3.7.

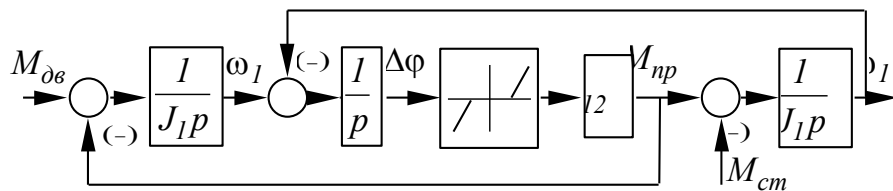


Рисунок 3.7. Структурна схема двохмасової системи з урахуванням зазору

Для моделювання використовуємо структурну схему зображену на рис.3.8. Крок інтегрування становить 0.001 с.

Структурна схема моделі при використанні розширення пакета MATLAB - SIMULINK наведена на рис.3.8 .На рис.3.9. наведено приклади розрахунків коливань кутових швидкостей: кутова швидкість першої маси; та другої маси з урахуванням зазору [5].

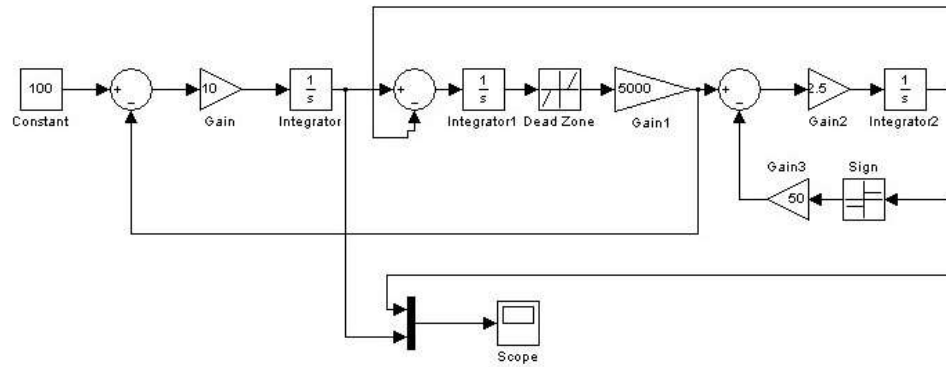


Рисунок 3.8. Структурна схема моделі двохмасової системи з урахуванням зазору

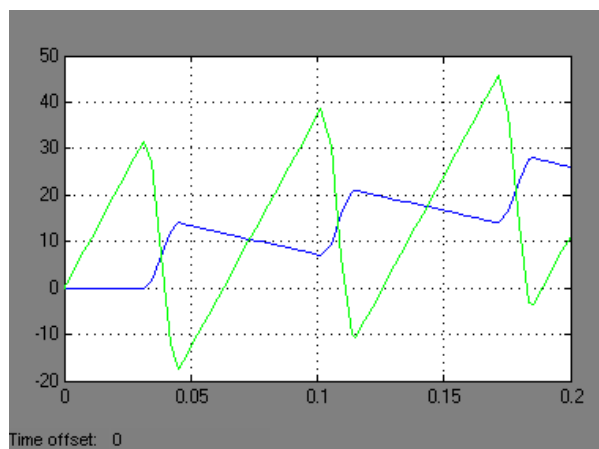


Рисунок 3.9. Кутові швидкості першої та другої маси з урахуванням зазору

Висновки до розділу

Було надано приклад розрахунку схеми, в якому враховано зазор. На основі отриманих даних можливо скласти аналогічну схему, яка відповідатиме досліджуваному об'єкту. Структурна та математична модель нової схеми, а також результати розрахунків, будуть представлені в наступному розділі.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ НА МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ

Як зазначалося в попередніх розділах, багатодвигунна система електроприводу є основою керування вагоноперекидачем. У цій главі основну увагу буде приділено двохдвигунній системі електроприводу, оскільки закони та пропорції для інших кількостей двигунів залишаються незмінними.

З урахуванням наявних і розрахованих параметрів електродвигуна, буде створена модель АКЗ в нерухомій ортогональній системі координат « α , β , 0» за допомогою програмного пакету MatLab 7. Розглянемо систему двохдвигунного асинхронного електроприводу (див. рис. 4.1) і проаналізуємо роботу приводу, враховуючи відхилення параметрів окремих двигунів на 20%. Це забезпечить відмінність електромагнітних моментів, що є необхідним для аналізу та порівняння їх працездатності, під час спільного споживання електричної енергії з одного джерела.

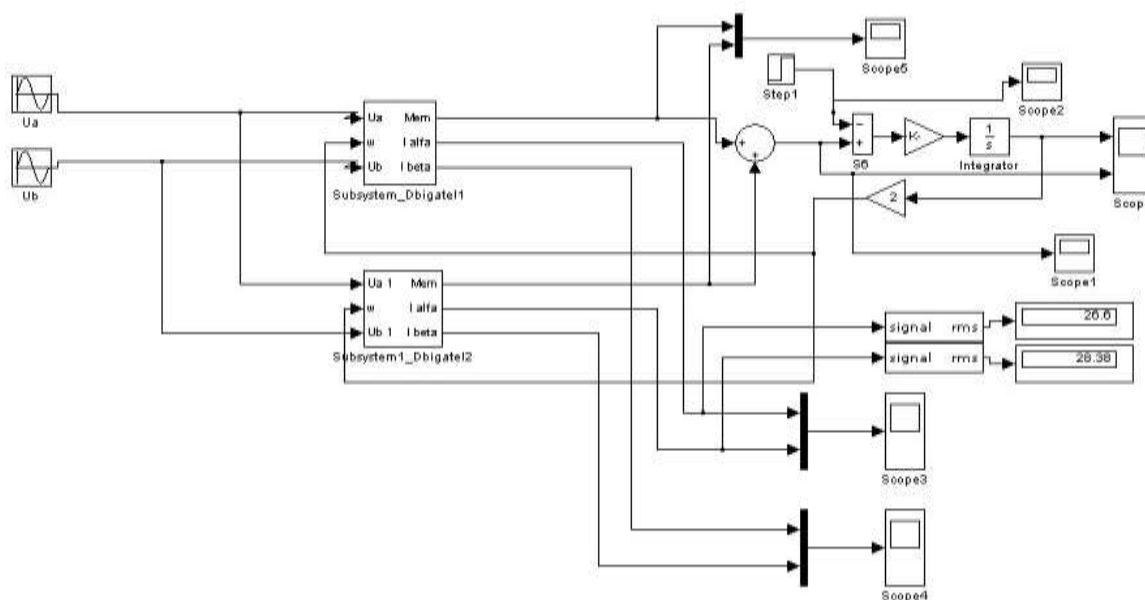


Рисунок 4.1. Модель АКЗ при 2-х двигунах

На рис.4.1. структура підсистеми subsystem_dbigatel1 відповідає першому АД. Структура цієї підсистеми представлена на рис.4.2

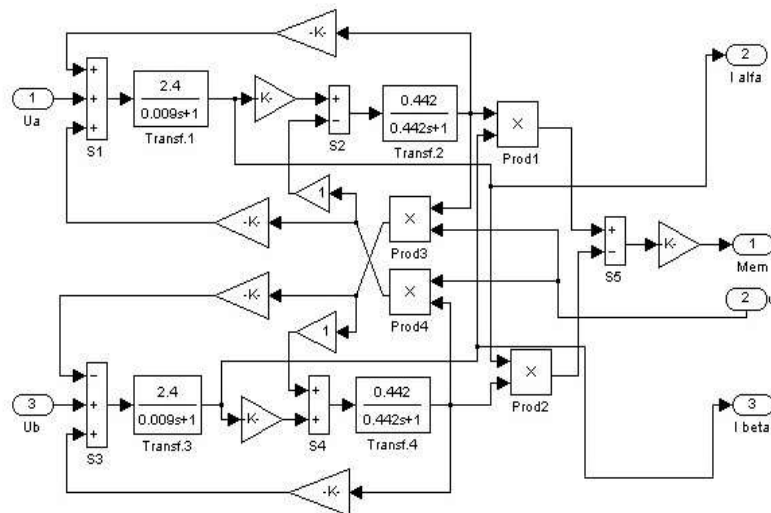


Рисунок 4.2. Модель АКЗ першого двигуна в нерухомій системі координат

Підсистема subsystem_dbigatel2 відповідає другому АД, структура цієї підсистеми представлена на рис.4.3.

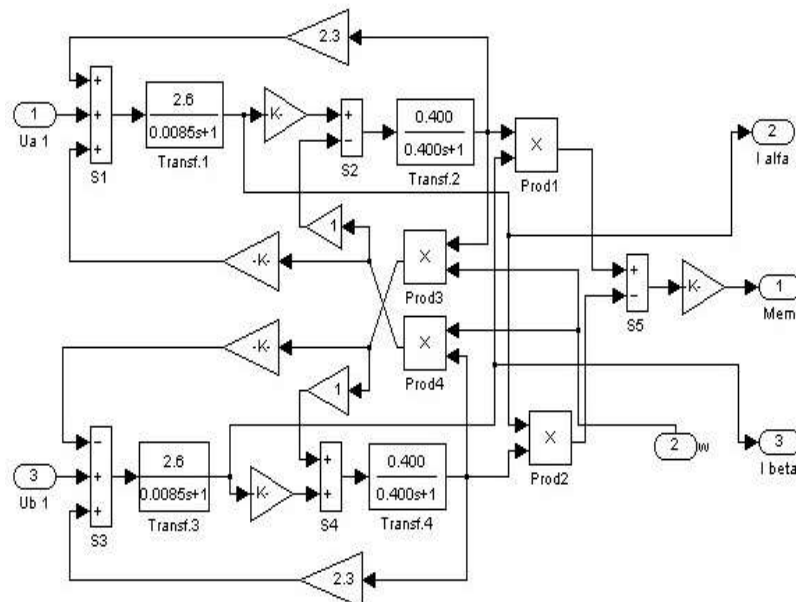


Рисунок 4.3. Модель АКЗ другого двигуна в нерухомій системі координат

За структурною схемою рис.4.1 отримані перехідні процеси в електромеханічній системі по кутовий швидкості $\omega(t)$ і сумарним електромагнітним моментом $M_e(t)$ відповідно:

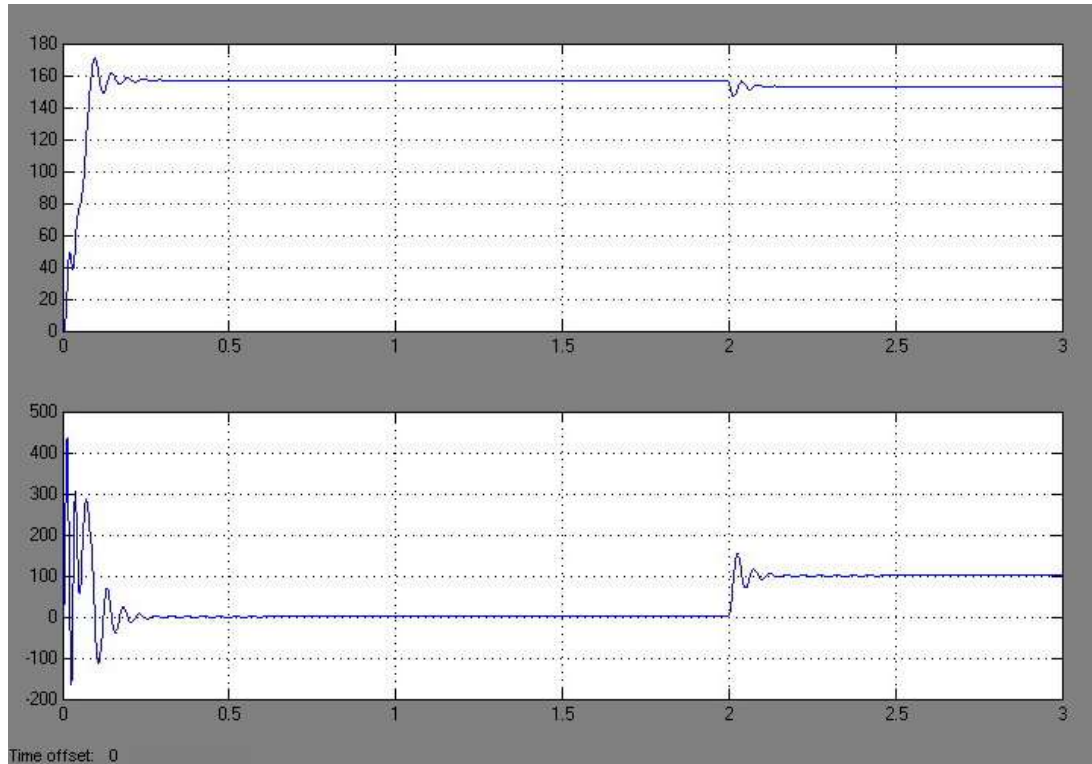


Рис 4.4. Перехідні процеси $\omega(t)$ і $M_e(t)$ для системи АКЗ

Отримання діючі значення струмів $i_{\alpha 1}$ і $i_{\alpha 2}$ з блоку Display обох двигунів наступні:

$$i_{\alpha 1} = 26.6 \text{ A}$$

$$i_{\alpha 2} = 28.38 \text{ A}$$

Різниця діючих значень струмів в цьому режимі становитиме

$$\Delta i = 28.38 - 26.6 = 1.78 \text{ A} \quad (4.1)$$

Для забезпечення рівності моментів і відповідно зменшення різниці струмів скористаємося зворотним зв'язком по струму для обох двигунів, і

деякими перетворення враховуючи їхні вихідні параметри. Така система отримає назву система стабілізації моменту (рис.4.5).

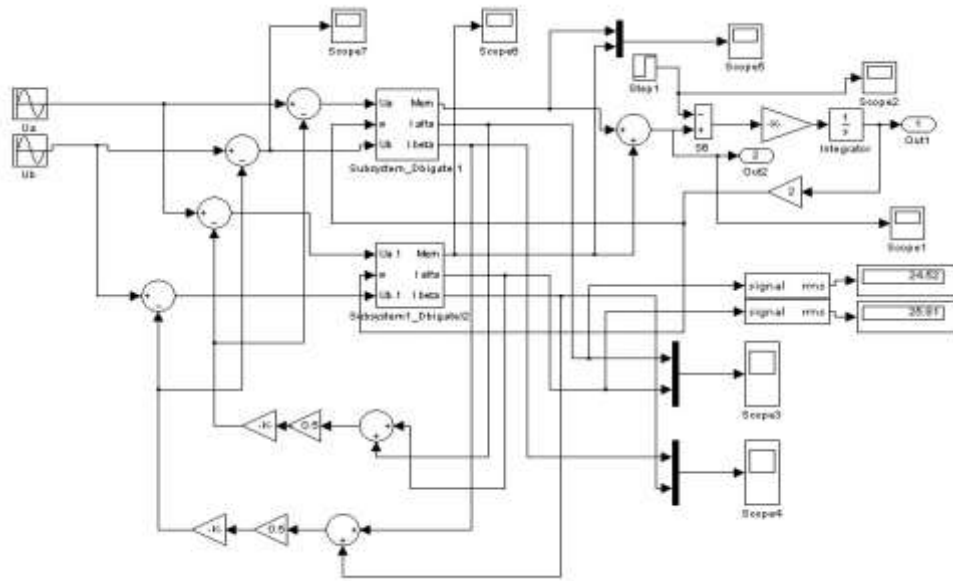


Рисунок 4.5. Модель АКЗ із зворотними зв'язками по струму (система стабілізації моменту)

В цій системі присутні дві зворотні зв'язки по струму i_a і i_β відповідно. Середні значення цих струмів, враховуються при формуванні нової напруги на статорі кожного АД.

Отримані наступні перехідні процеси:

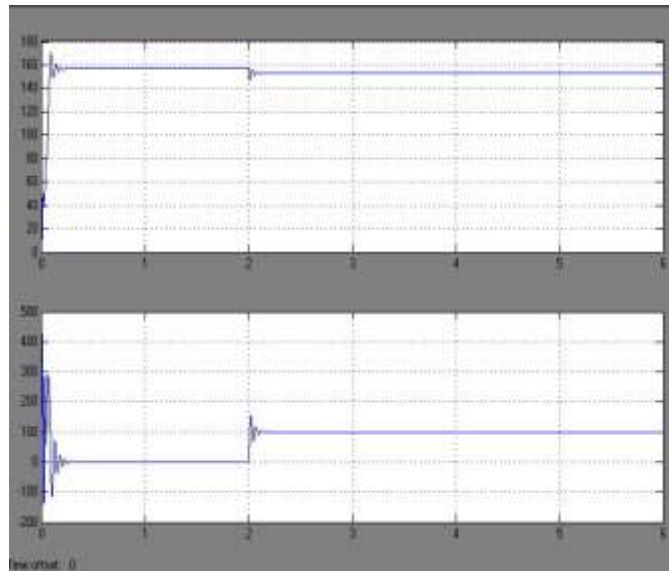


Рисунок 4.6. Перехідні процеси $\omega(t)$ і $M_e(t)$ для системи АКЗ із зворотними зв'язками по струму

Значення струмів $i_{\alpha 1}$ і $i_{\alpha 2}$, отриманих з блоків Display для обох двигунів наступні:

$$i_{\alpha 1} = 24.52 \text{ A}$$

$$i_{\alpha 2} = 25.81 \text{ A}$$

Різниця діючих значень струмів при цьому складе:

$$\Delta i = 25.81 - 24.52 = 1.3 \text{ A} \quad (4.2)$$

Отримана різниця струмів при використанні зворотного зв'язку по струму для обох двигунів, є меншою а відповідно і значення різниці моментів знизилася.

Тепер здійснимо реалізацію урівноваження моментів на підставі нижче наведеної схеми, вона є більш складною у реалізації, але вона повинна забезпечити меншу різниці струмів для наших двигунів. Тут на відміну від попередньої схеми є регулятори струму, які, крім того зможуть також

забезпечити збільшення швидкодії системи, обмежити кидки по струму і більш плавний пуск механізму (рис.2.9).

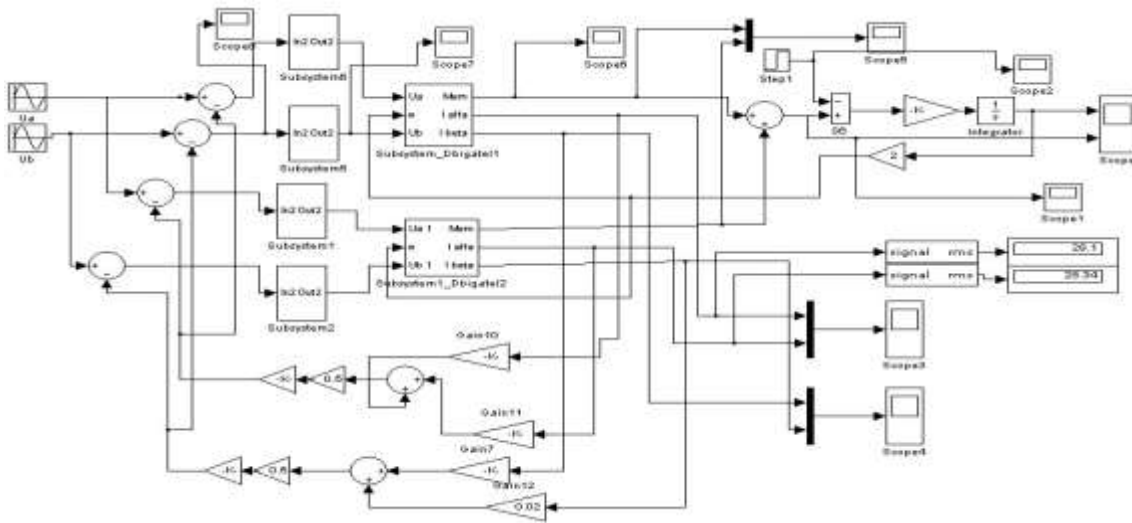


Рисунок 4.7. Модель АКЗ із зворотними зв'язками і регуляторами струму (система стабілізації моменту)

Підсистеми subsystem1, subsystem2, subsystem5 та subsystem6 мають наступну структуру:

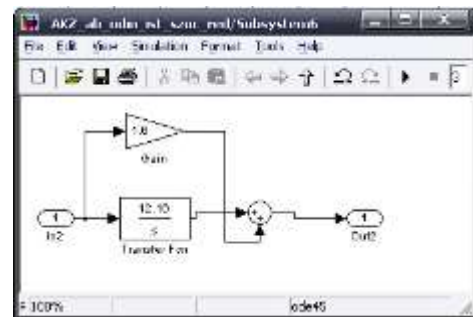
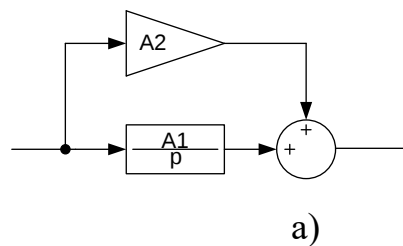


Рисунок 4.8. Структурна схема(а) та модель регулятора струму (б)

Такий вид підсистеми в блоці пов'язаний з урахуванням перетворень передаточної функції по струму для кожного з складових струму двигуна окремо i_α і i_β . Передавальна функція об'єкта управління в контурі струму:

$$W_{oc}(p) = \frac{K_{mn} K_{\partial c}}{R_0 (T_{\Sigma} p + 1)} \quad (4.3)$$

А відповідно до модульного оптимуму:

$$W(p) = \frac{3_{н(о)}}{a T_{\mu} p} \quad (4.4)$$

де a – коефіцієнт, який враховує ступінь компенсації постійної часу

$$W_{pm}^{mo}(p) = \frac{3_{н(о)}}{a T_{\mu} p} = \frac{R_0 (T_{\Sigma} p + 1)}{2 T_{\mu} p K_{\partial c} K_{mn}} = A1 + \frac{A2}{p} \quad (4.5)$$

де $A1$, $A2$ - коефіцієнти, отримані при розрахунку попередньої формули. Такий регулятор має назву "ПІ – регулятор" реалізація регулятора на ПІТ, який представлений на рисунку 2.11.

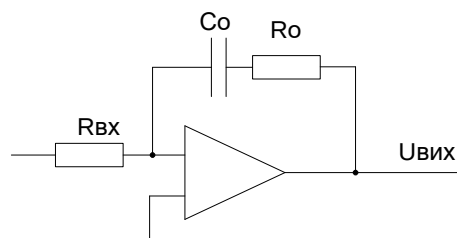


Рисунок 4.6. Структурна схема ПІ – регулятора

Отримані наступні перехідні процеси:

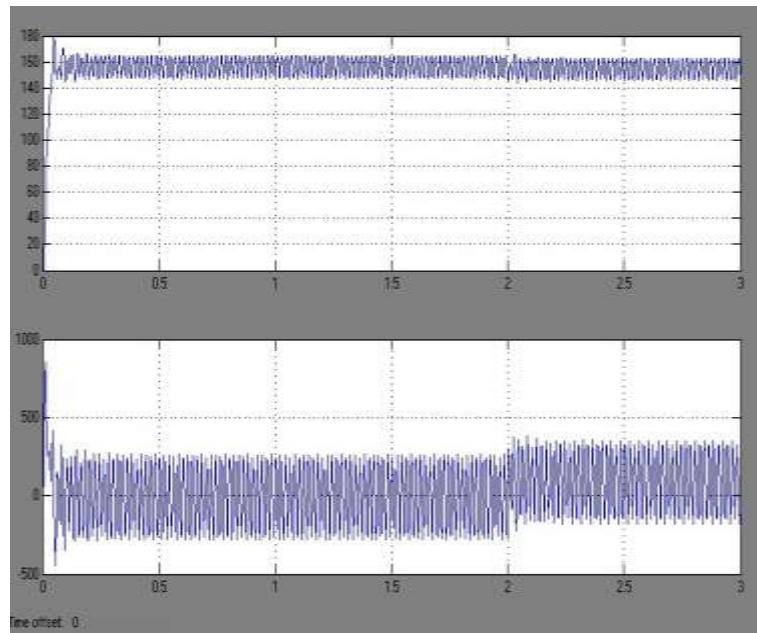


Рисунок 4.10. Перехідні процеси $\omega(t)$ і $M_e(t)$ для системи АКЗ із зворотними зв'язками по струму

Значення струмів $i_{\alpha 1}$ і $i_{\alpha 2}$, отриманих з блоків Display для обох двигунів наступні:

$$i_{\alpha 1} = 28.1 \text{ A}$$

$$i_{\alpha 2} = 28.34 \text{ A}$$

Різниця діючих значень струмів при цьому складе:

$$\Delta i = 28.34 - 28.1 = 0.24 \text{ A} \quad (4.7)$$

Тут же отримана різниця струмів при використанні зворотного зв'язку по струмові для обох двигунів ще менше, отже значення різниці моментів також знизилося.

Однак коливання, які виникли в перехідних процесах не задовольняють вимогам стабілізації роботи механізму, тому надалі будемо

користуватися системою стабілізації моменту, яка містить лише зворотні зв'язки по струму.

Була складена структурна і математична модель дослідження зазору між двома тілами. Саме на неї можна спиратися при складанні нової схеми дослідження, механічні передачі якої є пара зубчатих коліс та зубчатий вінець барабана вагоноперекидача. Нова структурна схема, представлена на рис.4.11:

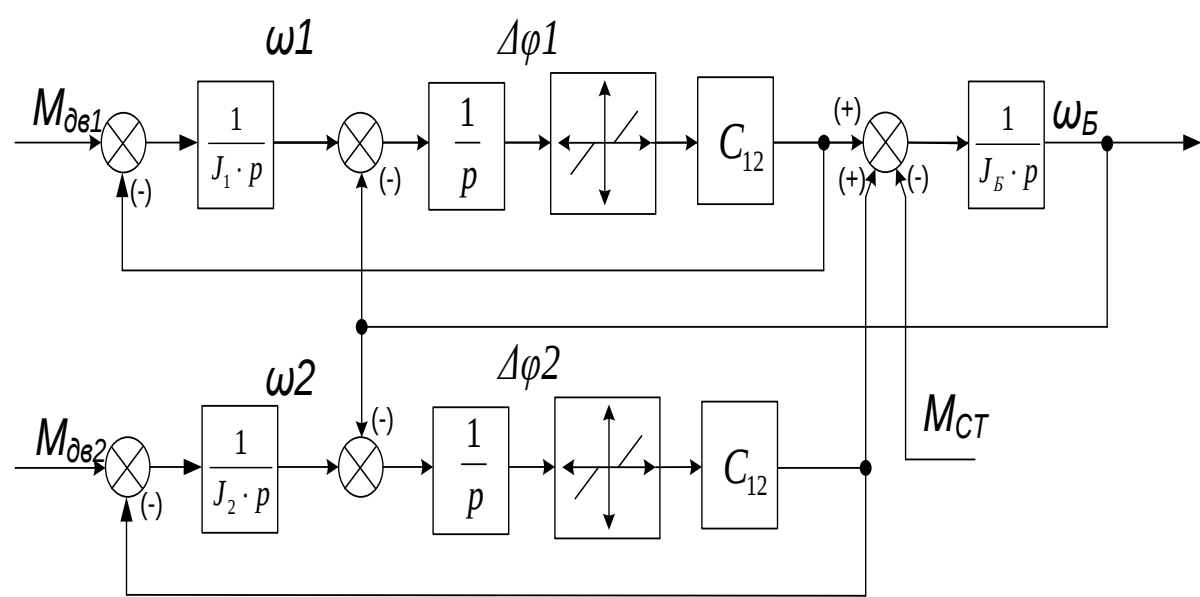


Рисунок 4.11. Структурна схема трьохмасової системи

Вихідні дані для розрахунку динаміки трьохмасової системи з пружністю:

Таблиця 4.1

Дані трьохмасової системи з пружністю

Мдв1, Н·м	Мдв2, Н·м	J1,кгм²	J2,кгм²	JБ,кгм²	Мст, Н·м	C12(1)	C12(2)	2δ, c ⁻¹
97,49	74,74	0,09	0,09	10490	80	428500	428500	0,01

$M_{дв1}$, $M_{дв2}$ – Номінальний момент першого та другого двигуна відповідно

J_1 , J_2 – Момент інерції першого та другого двигуна відповідно

$M_{ст}$ - Статичний момент навантаження

C_{12} – коефіцієнт пружності

Структурна схема моделі при використанні розширення пакета MATLAB - SIMULINK наведена на рис.4.12 .На рис.4.13 наведено приклади розрахунків коливань кутових швидкостей: кутова швидкість зубчатих коліс та барабана. Параметри блока нечуттєвості (Dead Zone) та (Dead Zone 1) наступні: початок мертвої зони – (-0,01); кінець мертвої зони – (0) отримані наступні результати:

Таблиця 4.2

Параметри блока нечуттєвості

	Dead Zone	Dead Zone 1
Початок мертвої зони	-0.002	0
Кінець мертвої зони	0	0.002

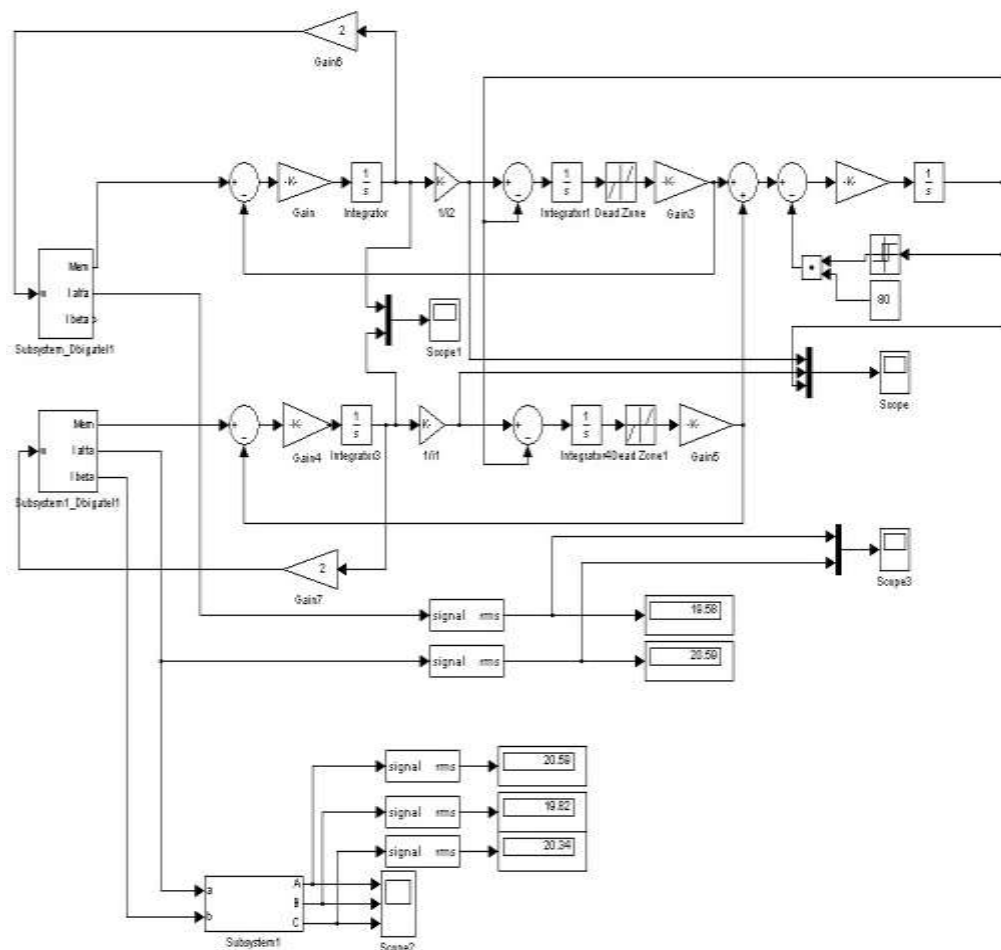


Рисунок 4.12. Структурна схема моделі трьохмасової системи з урахуванням зазору

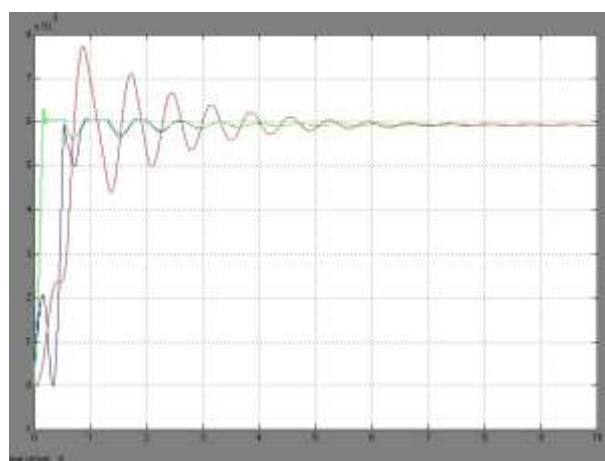


Рисунок 4.13. Кутові швидкості першого, другого зубчатого колеса та барабана

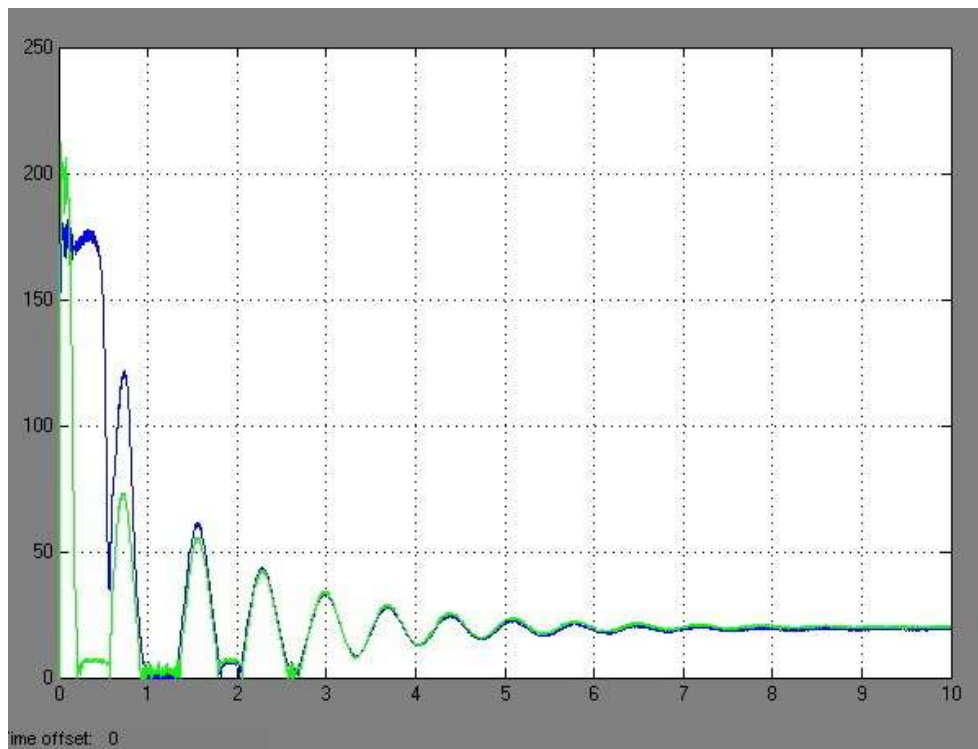


Рисунок 4.14.Складові струмів i_a для першого та другого двигуна

Отримані результати дозволяють робити висновок, що в перший проміжок часу навантаження на двигуни нерівномірне, один з працює зі струмом холостого ходу а інший зі значенням струму у півтора рази більше номінального. І тільки на 2.5 с. ці значення компенсуються один одного і система працює в рівновазі, що позначається позитивно на процес роботи механізму.

Проаналізувавши отримані результати, при дослідженні вище представленої схеми, стають цікавими можливі результати при інших параметрах блоків, а саме блоку нечуттєвості, який в основному і реалізує зазор у даному механізмі. Для порівняння будемо змінювати параметри тільки верхнього блоку нечуттєвості (Dead Zone).

Тепер змінивши параметри блоку нечуттєвості на наступні: початок мертвої зони – (-0,001); кінець мертвої зони – (0,001) .Отримані наступні результати:

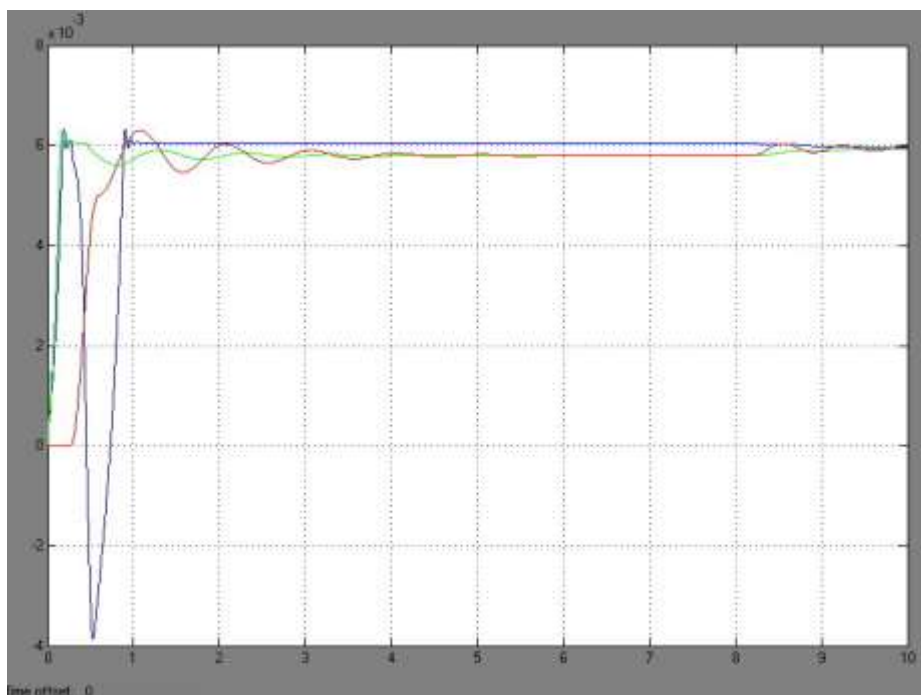


Рисунок 4.15. Кутові швидкості першого, другого зубчатого колеса та барабана

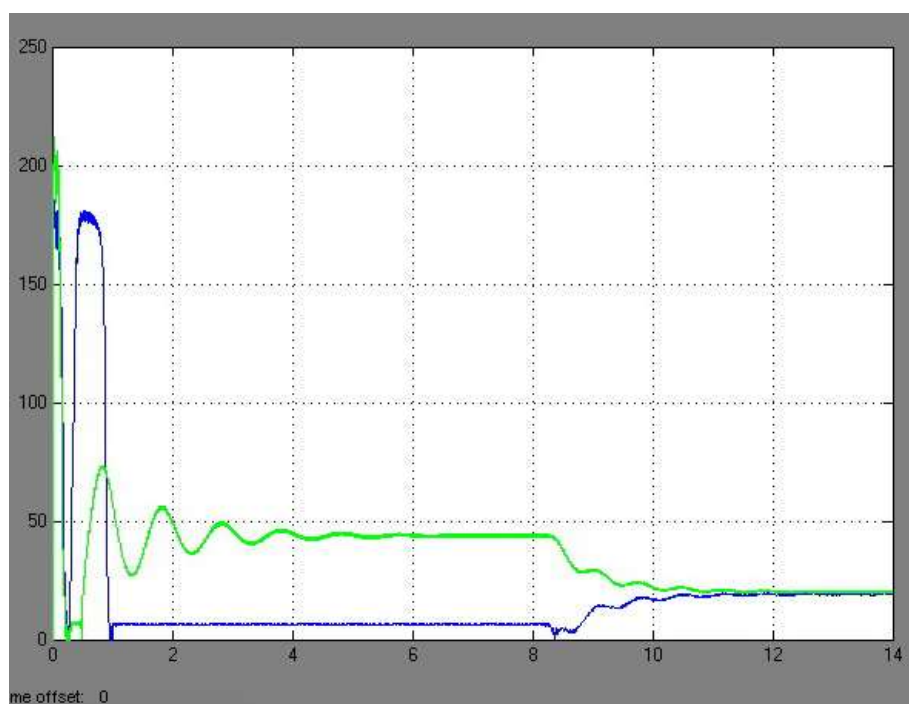


Рисунок 4.16. Складові струмів i_a для першого та другого двигуна

На відміну від попередніх результатів, в цій схемі час досягання рівноваги є довшим, але так само як і у попередній схемі один з двигунів працює зі струмом холостого ходу а інший зі значенням струму у півтора рази більше номінального.

Наступний експеримент будемо проводити із наступні параметрами блока не-чуттєвості (Dead Zone): початок мертвої зони – (0); кінець мертвої зони – (0,002) отримані наступні результати:

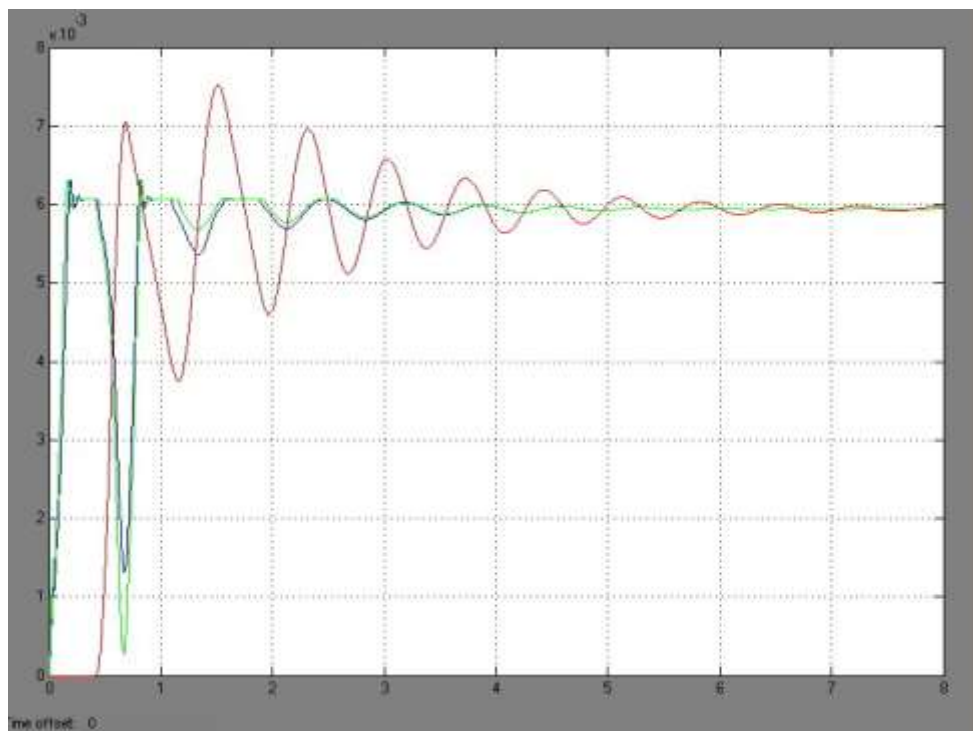


Рисунок 4.17. Кутові швидкості першого, другого зубчатого колеса та барабана

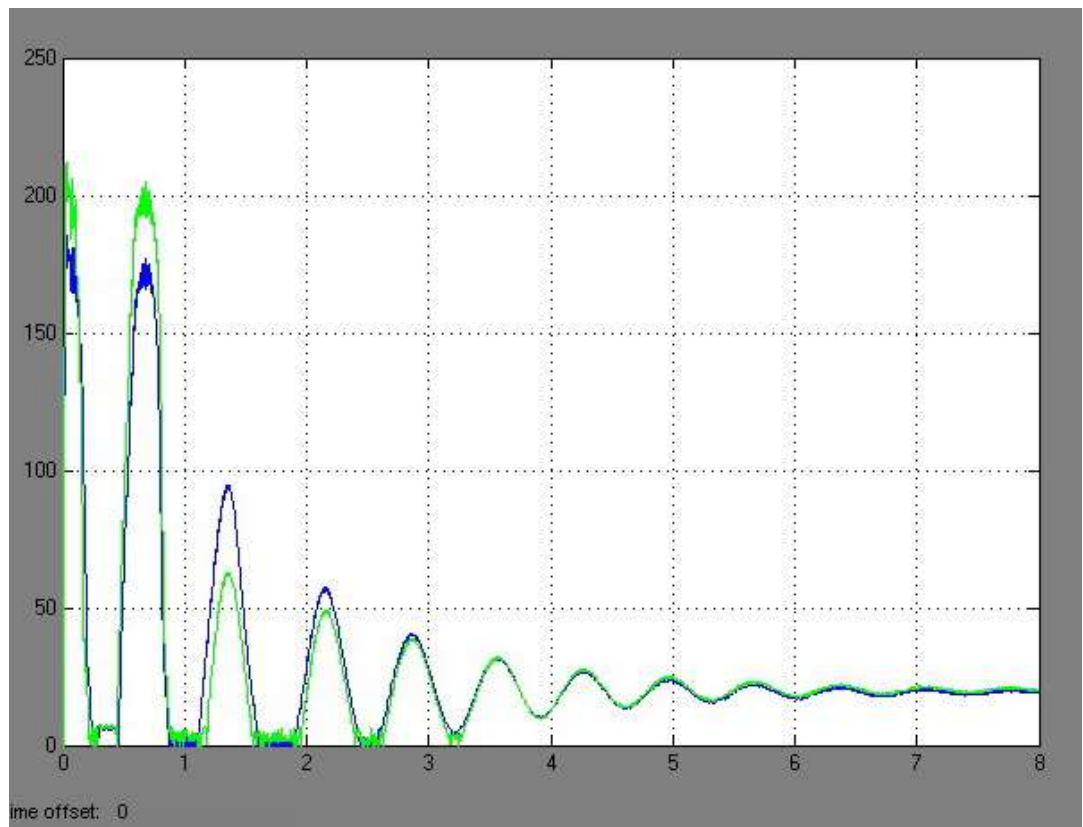


Рисунок 4.18. Складові струмів іа для першого та другого двигуна

Отримані значення кутових швидкостей дозволяють робити висновок, що при однакових параметрах блока нечуттєвості початок перехідного процесу настає на $2-0.5\text{с.}$, також виникають коливання швидкості оберту барабана. Значення складових струмів при цьому майже однаково і час врівноваженої роботи системи настає раніше чим в вищій запропонованих схемах.

Передостанній експеримент, де параметри кожного з двигунів будуть однакові. Метою цього експерименту є порівняння ступеня впливу значення зазору. Для цього будемо використовувати раніше отримані результати рис.4.13 и 4.14. и наступні перехідні процеси при наступним параметрах блока нечуттєвості (Dead Zone): початок мертвої зони – (-0.002) ; кінець мертвої зони – (0) отримані наступні результати.

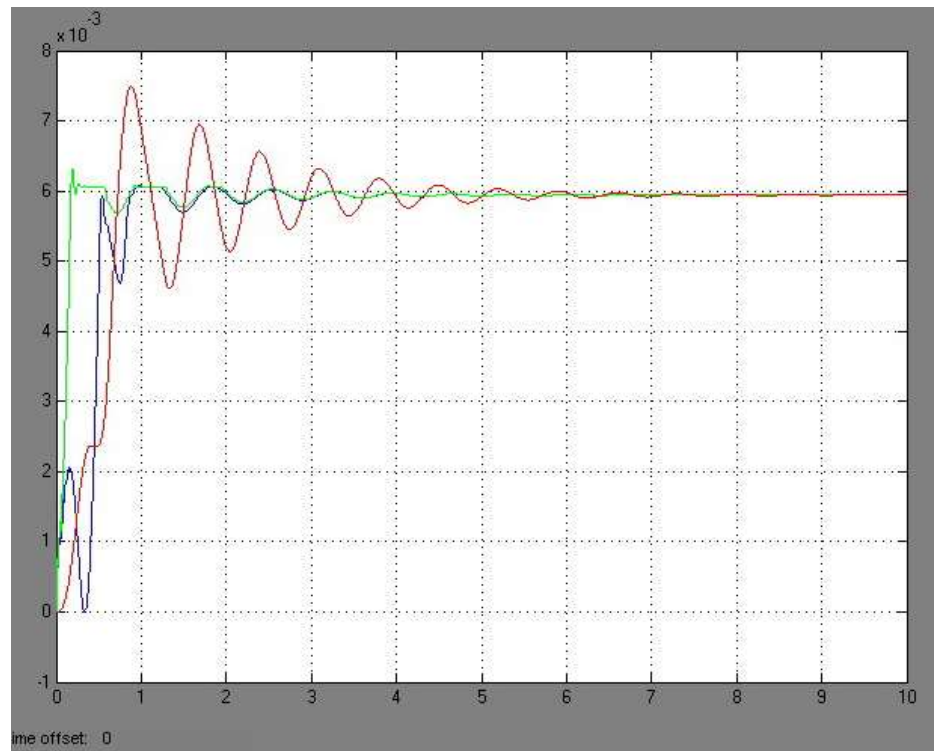


Рисунок 4.19. Кутові швидкості першого, другого зубчатого колеса та барабана

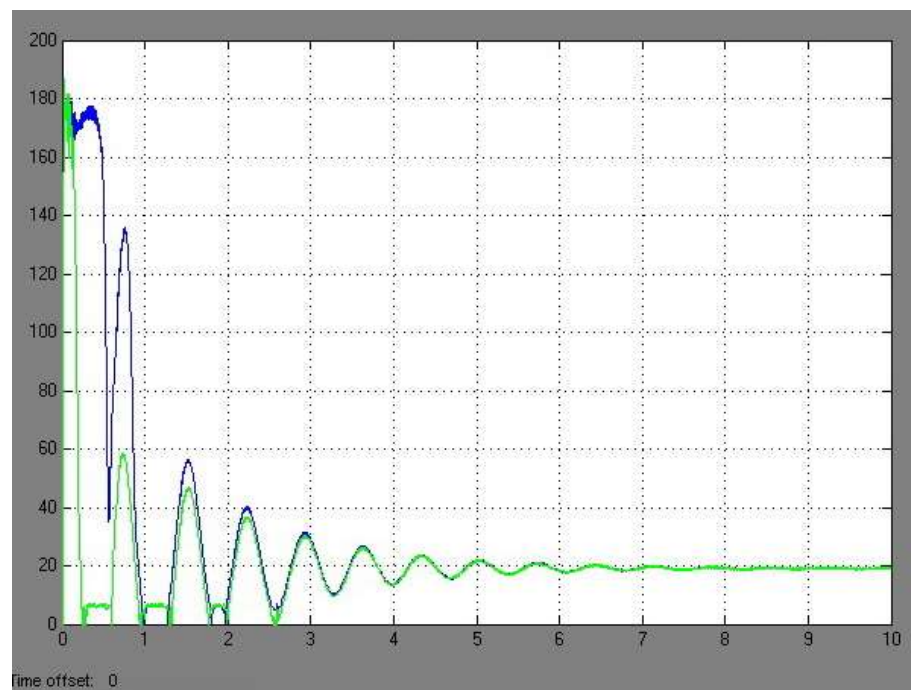


Рисунок 4.20. Складові струмів іа для першого та другого двигуна

З отриманих результатів можна зробити висновок, що значення пускових струмів збільшилися в порівнянні з результатом отриманим на рис 4.14, проте значення швидкості обертання при цьому майже не змінилися.

Останній експеримент, також при однакових параметрах двигунів, передбачає такі значення блока нечуттєвості (Dead Zone): початок мертвої зони – (-0.002); кінець мертвої зони – (0).

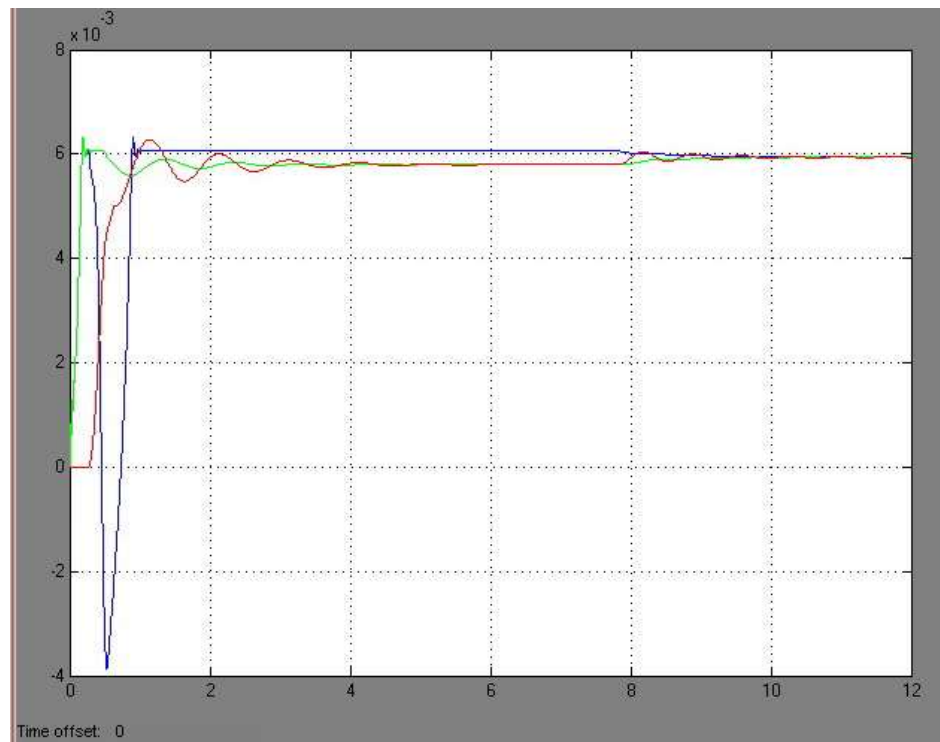


Рисунок 4.21. Кутові швидкості першого, другого зубчатого колеса та барабана

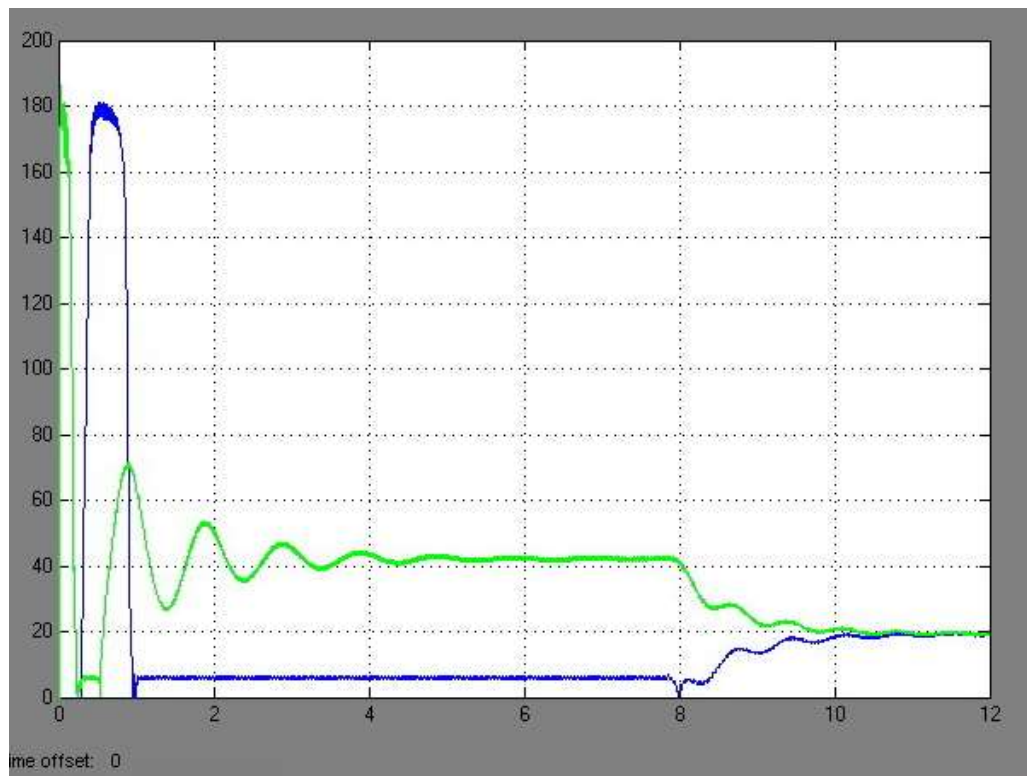


Рисунок 4.22. Складові струмів i_a для першого та другого двигуна

Так само, як і у попередній схемі, змінилися тільки значення пускових струмів, графік швидкості обертання залишився майже незмінним.

$$\bar{x}_1 = \frac{\bar{x}_2}{T_1 p}; \quad \bar{x}_2 = \frac{\bar{x}_3}{T_m p}; \quad \bar{x}_3 = \frac{\bar{U}_3 \beta_n - \bar{x}_2}{T p + 1};$$

Так як система астатична, то додатково вводиться координата: $\dot{x}_0 = -\mathcal{K}_1$

Для вільного руху рівняння стану об'єкта управління можна записати:

$$X = \begin{cases} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{cases} = \begin{cases} \dot{x}_0 = -K_n x_1 \\ \dot{x}_1 = \frac{x_2}{T_1} \\ \dot{x}_2 = \frac{x_3}{T_m} \\ \dot{x}_3 = \frac{U_3 \beta_n}{T} - \frac{x_2}{T} - \frac{x_3}{T} \end{cases}.$$

Складемо матриці A , Φ , A_m, ψ :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -K_{II} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/T_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/T_m \\ 0 & 0 & -1/T & -1/T \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_o \end{bmatrix}; b_o = \frac{\beta_n}{T}.$$

Для простоти при складанні матриць Φ і ψ необхідн обмежитися двома членами розкладання:

$$\Phi = E + A\tau = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -K_{II}\tau & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tau/T_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \tau/T_m \\ 0 & 0 & -\tau/T & -\tau/T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -K_{II}\tau & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \tau/T_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \tau/T_m \\ 0 & 0 & -\tau/T & 1-\tau/T \end{bmatrix};$$

$$\begin{aligned} \psi = E\tau + \frac{A\tau^2}{2!} &= \begin{bmatrix} \tau & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tau & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tau & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -K_{II}\tau^2/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tau^2/2T_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \tau^2/2T_m \\ 0 & 0 & -\tau^2/2T & -\tau^2/2T \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \tau & -K_{II}\tau^2/2 & 0 & 0 \\ 0 & \tau & \tau^2/2T_1 & 0 \\ 0 & 0 & \tau & \tau/T_m \\ 0 & 0 & -\tau^2/2T & \tau - \tau^2/2T \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Еталонна матриця A_m відрізняється від матриці A тільки рядком коефіцієнтів:

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & -K_{II} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/T_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/T_m \\ a_o & a_1 & a_2 & a_3 \end{bmatrix};$$

$$\det[PE - A_m] = \begin{vmatrix} p & -K_{II} & 0 & 0 \\ 0 & p & -1/T_1 & 0 \\ 0 & 0 & p & -1/T_M \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & p - a_3 \end{vmatrix} =$$

$$= p \left[p^2(p - a_3) - \frac{a_1}{T_1 T_M} - \frac{p a_2}{T_M} \right] - K_{II} \left[-\frac{a_0}{T_1 T_M} \right] = p^4 - p^3 a_3 - \frac{p a_1}{T_1 T_M} - \frac{p^2 a_2}{T_M} + \frac{K_{II} a_0}{T_1 T_M} =$$

$$= p^4 + 2,64H p^3 + 3,4H^2 p^2 + 2,6H^3 p + H^4.$$

$$H=0,5H_{\min}=0,5H_{\text{мод. кер.}}=24,01$$

Таким чином отримаємо:

$$a_3 = 2,64H;$$

$$a_3 = 2,64H = 2,64 \cdot 24,01 = 62,43;$$

$$\frac{a_2}{T_M} = 3,4H^2;$$

$$a_2 = 3,4H^2 T_M = 3,4 \cdot 24,01^2 \cdot 0,053 = 103,88;$$

$$\frac{a_1}{T_M T_1} = 2,6H^3;$$

$$a_1 = 2,6H^3 T_M T_1 = 2,6 \cdot 24,01^3 \cdot 0,053 \cdot 17,8 = 24000$$

$$K_{II} \frac{a_0}{T_M T_1} = H^4;$$

$$a_0 = \frac{H^4 T_M T_1}{K_{II}} = \frac{24,01^4 \cdot 0,053 \cdot 17,8}{3,18} = 98600$$

$$\Phi_m = E + A_m \tau = \begin{bmatrix} 1 & -K_{II} \tau & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \tau/T_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \tau/T_M \\ a_0 \tau & a_1 \tau & a_2 \tau & 1 + a_3 \tau \end{bmatrix};$$

$$\Phi_m - \Phi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_0 \tau & a_1 \tau & a_2 \tau + \tau/T & a_3 \tau + \tau/T \end{bmatrix};$$

$$\begin{aligned}
(\Phi_{\mathcal{M}} - \Phi) \Phi_{\mathcal{M}} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_o \tau & a_1 \tau & a_2 \tau + \tau/T & a_3 \tau + \tau/T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -K_{\Pi} \tau & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \tau/T_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \tau/T_{\mathcal{M}} \\ a_o \tau & a_1 \tau & a_2 \tau & 1 + a_3 \tau \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ f_1 & f_2 & f_3 & f_4 \end{bmatrix};
\end{aligned}$$

$$\Psi_{nn} = \tau - \frac{\tau^2}{2T} = 0,0001 - \frac{(0,0001)^2}{2 \cdot 0,018} = 1 \cdot 10^{-4};$$

$$b_o = \frac{\beta_{\Pi}}{T} = \frac{25}{0,018} = 1389;$$

$$\Psi_{nn} b_o = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 1389 = 0,139;$$

$$f_1 = a_o \tau + a_o \tau (a_3 \tau + \tau/T);$$

$$f_2 = -K_{\Pi} \tau^2 a_o + a_1 \tau + a_1 \tau (a_3 \tau + \tau/T);$$

$$f_3 = \frac{a_1 \tau^2}{T_1} + a_2 \tau + \frac{\tau}{T} + a_2 \tau (a_3 \tau + \tau/T);$$

$$f_4 = (a_2 \tau + \tau/T) \tau/T_{\mathcal{M}} + (a_3 \tau + \tau/T)(1 + a_3 \tau);$$

$$f_1 = 98600 \cdot 0,0001 - 98600 \cdot 0,0001 \cdot (62,43 \cdot 0,0001 + \frac{0,0001}{0,018}) = 10;$$

$$f_2 = -3,18 \cdot 0,0001^2 \cdot 98600 + 24000 \cdot 0,0001 + 24000 \cdot 0,0001 \cdot (62,43 \cdot 0,0001 + 0,0001/0,018) = 2;$$

$$f_3 = 24000 \cdot 0,0001^2 / 17,8 + 10388 \cdot 0,0001 + 0,0001/0,018 + 10388 \cdot 0,0001 (62,43 \cdot 0,0001 + 0,0001/0,018) = 0,016;$$

$$f_4 = (10388 \cdot 0,0001 + 0,0001/0,018) \cdot 0,0001/0,053 + (62,43 \cdot 0,0001 + 0,0001/0,018) \cdot (1 + 62,43 \cdot 0,0001) = 0,0119;$$

$$K_o = \frac{f_1}{\Psi_{nn} b_o}; \quad K_1 = \frac{f_2}{\Psi_{nn} b_o}; \quad K_2 = \frac{f_3}{\Psi_{nn} b_o}; \quad K_3 = \frac{f_4}{\Psi_{nn} b_o}$$

$$K_0 = \frac{10}{0,139} = 72;$$

$$K_1 = \frac{2}{0,139} = 14;$$

$$K_2 = \frac{0,016}{0,139} = 0,115;$$

$$K_3 = \frac{0,0119}{0,139} = 0,086.$$

Таким чином маємо рівняння:

$$U_i = K_0 X_0(i-1) + K_1 X_1(i-1) + K_2 X_2(i-1) + K_3 X_3(i-1) = 178X_0(i-1) + 35X_1(i-1) + 0,166X_2(i-1) + 0,103X_3(i-1).$$

Розрахунок регулятора положення

$W_{PI} = K_P$ - регулятор положення пропорційний.

Структурна схема контуру положення представлена на рис.4.23.

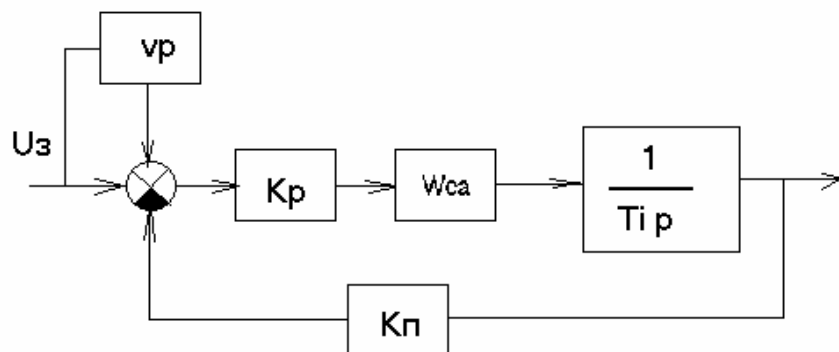


Рисунок 4.23. – Структурна схема контуру положення

З структурної схеми можна записати:

$$(\bar{U}_3 + \bar{U}_3 vp - K_{\Pi} \bar{\varphi}) K_P \frac{1}{\gamma T_i p (32 T_0^2 p^2 + 8 T_0 p + 1)} = \bar{\varphi}.$$

Передаточна функція регулятора положення:

$$W_{\Pi} = \frac{K_p(1 + \nu p)}{32T_0^2 \gamma T_i p^3 + 8T_0 \gamma T_i p^2 + \gamma T_i p + K_p K_{\Pi}}.$$

При синтезі контуру положення робимо припущення: нехтуємо коефіцієнтом при вищому степені p .

$$W_{\Pi} = \frac{K_p(1 + \nu p)}{8T_0 \gamma T_i p^2 + \gamma T_i p + K_p K_{\Pi}};$$

$$p^2 + \frac{1}{8T_0} p + \frac{K_p K_{\Pi}}{8T_0 \gamma T_i} = (p - p_1)(p - p_2).$$

Прийmemo корені характеристичного рівняння відповідні технічному оптимуму.

$$p_{1,2} = -\sigma_{\Pi} \pm j\sigma_{\Pi};$$

$$p^2 + \frac{1}{8T_0} p + \frac{K_p K_{\Pi}}{8T_0 \gamma T_i} = p^2 + 2\sigma_{\Pi} p + 2\sigma_{\Pi}^2;$$

$$\frac{1}{8T_0} = 2\sigma_{\Pi}; \quad \sigma_{\Pi} = \frac{1}{16T_0};$$

$$t_{p,\Pi} = 48T_0 = 48 \cdot 0,01 = 0,48 \text{ с};$$

$$\frac{K_p K_{\Pi}}{8T_0 \gamma T_i} = 2\sigma_{\Pi}^2 = \frac{1}{128T_0^2};$$

Як датчик зворотного зв'язку по положенню використовується фотоімпульсний датчик. Одному обороту датчика відповідає 1000 імпульсів. Один імпульс - 20 мВ.

Одному імпульсу відповідає $\frac{2 \cdot \pi}{1000} = 6,28 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$, тоді коефіцієнт зворотного зв'язку по положенню:

$$K_{\Pi} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{6,28 \cdot 10^{-3}} = 3,18$$

$$K_P = \frac{\gamma T_i}{16 T_0 K_{\Pi}} = \frac{0,031 \cdot 17,8}{16 \cdot 0,01 \cdot 3,18} = 1,08$$

Виходячи з заданого значення добротності необхідно визначити коефіцієнт ν .

$$\left\{ \left[\left(\overline{U_3} + \overline{U_3} \nu p - K_{\Pi} \overline{\varphi} \right) K_P - \gamma T_i p \overline{\varphi} \right] \frac{1}{p} - \gamma T_i p \overline{\varphi} \right\} K_C - K_T T_M T_i p^2 \overline{\varphi} \left\{ \frac{\beta_{\Pi} (T_P + 1)}{\alpha_T p^2 T_i (T_0 p + 1) (T_M T_P^2 + T_M p + 1)} \right\} = \overline{\varphi}.$$

Для квазісталого режиму, коли швидкість не змінюється ($p^r = 0, r \geq 2$)

можна записати:

$$\left(\overline{U_3} + \overline{U_3} \nu p - K_{\Pi} \overline{\varphi} \right) K_P - \gamma T_i p \overline{\varphi} = 0; \quad U_3 = K_{\Pi} \cdot \varphi_3; \quad p \varphi = \omega = \omega_3; \quad \delta = \varphi_3 - \varphi; \quad D_{\omega} = \frac{\omega_3}{\delta}$$

$$(K_{\Pi} \delta + K_{\Pi} \varphi_3 \nu p) K_P - \gamma T_i \omega_3 = 0;$$

$$K_{\Pi} \delta K_P + K_{\Pi} K_P \nu \omega_3 = \gamma T_i \omega_3;$$

$$K_{II}K_P + K_{II}K_P\nu \cdot \Delta\omega = \gamma T_i D_\omega;$$

$$\nu = \frac{\gamma T_i}{K_{II}K_P} - \frac{1}{D_\omega} \quad (6.1)$$

При $D_\omega = \infty$ з формули (6.1) отримуємо:

$$\nu = \frac{\gamma T_i}{K_{II}K_P} = \frac{0.031 \cdot 17.8}{3.18 \cdot 1.08} = 0.161$$

Структурна схема, використовувана при моделюванні за допомогою програми MatLab САУ, синтезована методом модального керування, представлена на рис 4.24

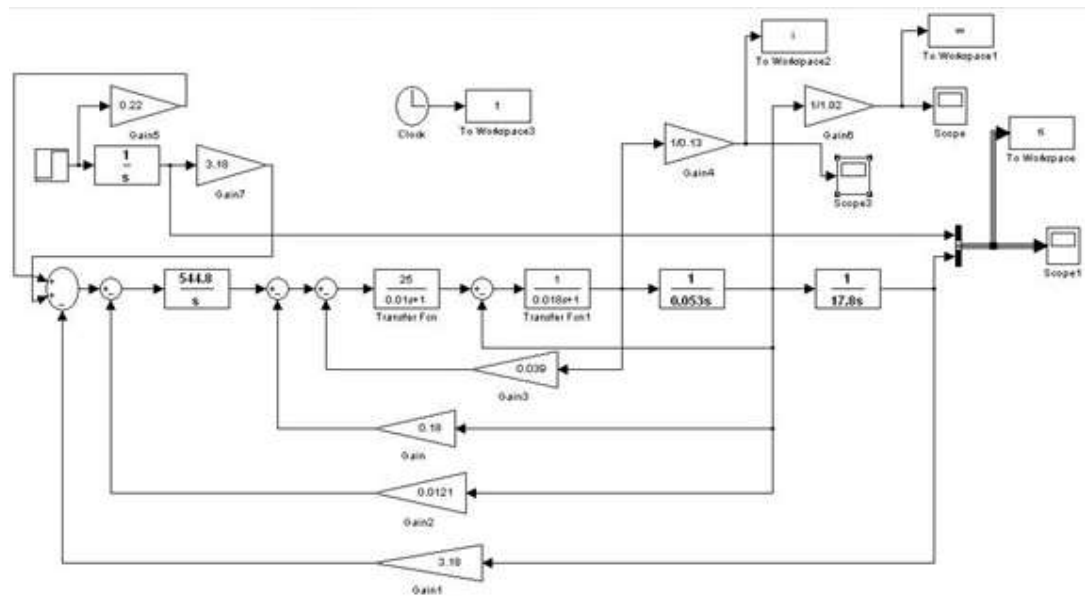


Рисунок 4.24 Структурна схема САУ, синтезованої методом модального управління

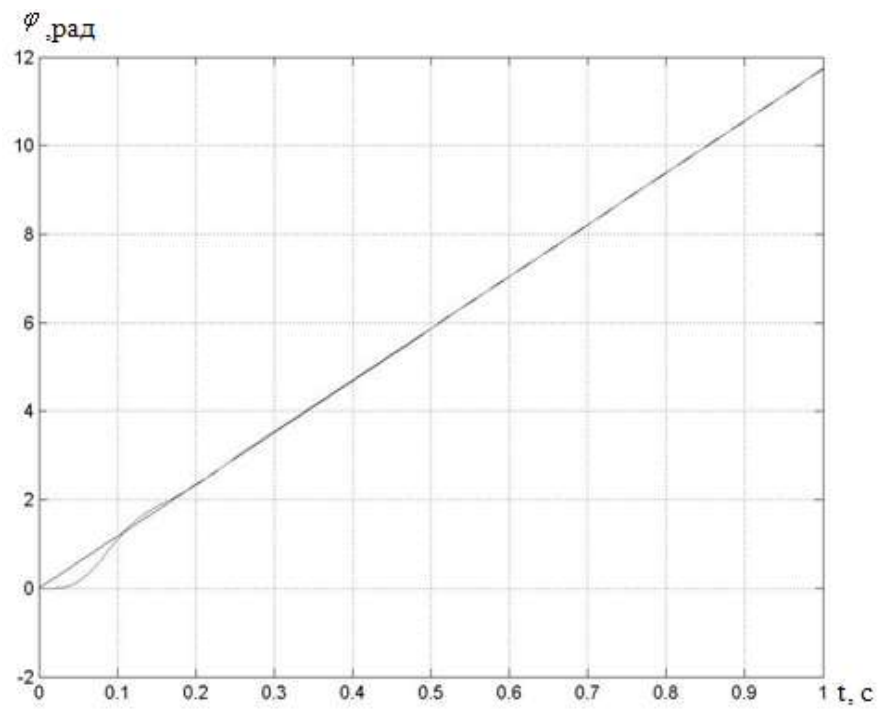


Рисунок 4.25 Залежність $\varphi=f(t)$

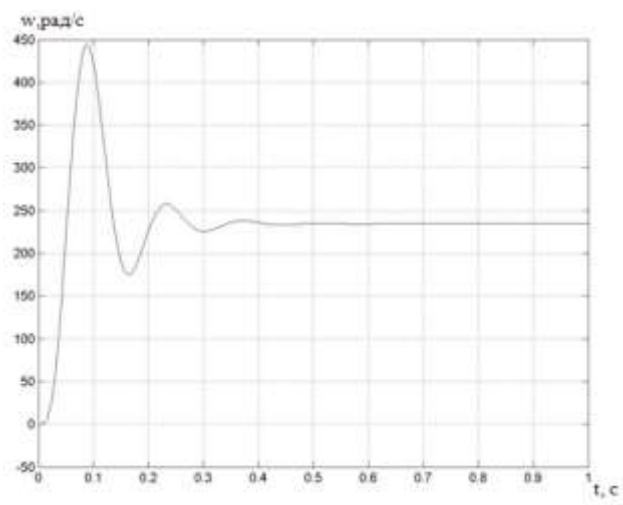


Рисунок 4.26 Залежність $\omega=f(t)$

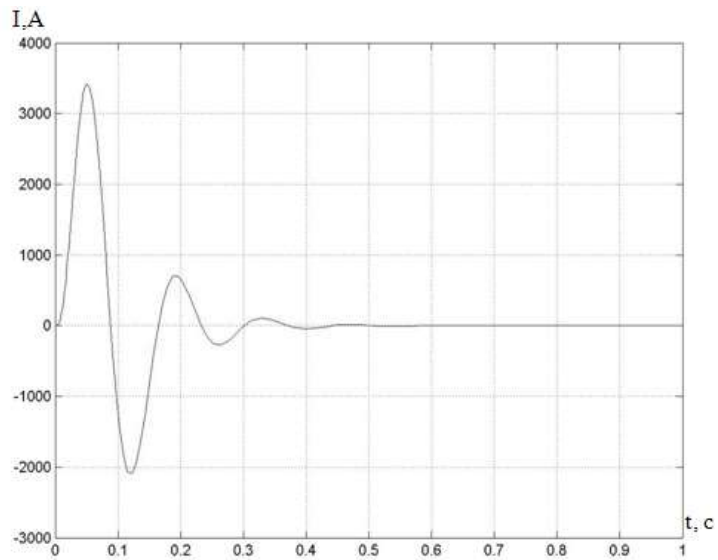


Рисунок 4.28 Залежність $i=f(t)$

Висновки до розділу

Проведені експерименти та отримані результати дають змогу обрати оптимальний варіант закону керування електроприводами вагоноперекидача, для отримання найкращих показників на весь період його експлуатації.

ВИСНОВКИ

Еромеханічна система (ЕМС) механізму кантування є складною конструкцією, яка може бути досліджена лише за допомогою чисельних методів і методів моделювання. Динаміка вагоноперекидача значно залежить від зміни моменту інерції механізму, що пов'язано з положенням виконавчого органу та зміною його маси через висипання матеріалу. Крім того, механічні напруги, що виникають внаслідок різниці механічних моментів між двигунами приводної системи, мають істотний вплив на зношення зубців. Усі ці аспекти, а також інші фактори, відкривають нові напрямки для покращення експлуатаційних характеристик даного об'єкта дослідження.

У загальному підсумку вирішено наступні задачі. По-перше, завдяки аналізу багатодвигунного електроприводу у системі " α , β , 0" було виявлено різницю навантажень на двигуни при рівному статичному моменті. Пропонується вигідне рішення цієї проблеми через введення обернених зв'язків за струмом.

З урахуванням змін моменту інерції його елементів була змодельована відповідна конструкція у програмі Simulink/SIMMechanics. Це дозволило реалізувати механізм у вигляді віртуального прототипу з основними вузлами: люлькою, механізмом перекидання, ротором та платформою. Отримано анімаційну модель, що демонструє функціонування збірки, а імітація руху механізму проводиться з урахуванням впливу двигунів, сил пружності та тяжіння.

Третім досягненням стало створення структурної і математичної моделі передаточного механізму з урахуванням зазору, а також дослідження впливу величини зазору на різні режими роботи електроприводу. Математична модель була розроблена на основі отриманих результатів і відповідає технічним параметрам шахтного перекидача.