

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

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматизації управління електротехнічними комплексами
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Віктор РОЗЕН

« ____ » _____ 2021 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності: 141 – «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

спеціалізації: «Інжиніринг автоматизованих електротехнічних комплексів»

на тему: «Автоматизована система енергоефективного керування
електроприводом мостового крану»

Виконав:

студент VI курсу, групи ОА - 91мп

Чередарик Михайло Іванович

Керівник:

ст. вик.

_____ Іван МАЙДАНСЬКИЙ

Керівник стартап-проєкту

канд. техн. Наук

_____ Наталія ШЕВЧУК

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Кафедра автоматизації управління електротехнічними комплексами

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 141 - "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

Спеціалізація - "Інжиніринг автоматизованих електротехнічних комплексів"

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Віктор РОЗЕН
« ____ » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Чередарика Михайла Івановича

1. Тема дисертації «Автоматизована система енергоефективного керування електроприводом мостового крану», науковий керівник дисертації Майданський Іван Ярославович, ст. викл. затверджені наказом по університету від 05 травня 2021 р. **№ 1110-с**
2. Термін подання студентом дисертації 10.05.2021
3. Об'єкт дослідження: електромеханічні об'єкти з частотним регулюванням
4. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - 1) Виконати аналіз сучасного стану асинхронних електроприводів, механізмів пересування кранів.
 - 2) Виконати самостійні дослідження і зробити оцінку системи електроприводу за критерієм енергоефективності.
5. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу : 50
6. Орієнтовний перелік публікацій: 3

7. Дата видачі завдання: 01.09.2020

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Вибір і затвердження теми	01.09.2020	
2	Підбір і ознайомлення з літературою	з 02.10 до 12.12. 2020	
3	Складання плану, розробка індивідуального завдання на магістерську дисертацію та календарного плану виконання магістерської дисертації	з 13.01.20 до 18.01. 2021	
4	Поглиблене вивчення літературних джерел і написання теоретичної частини магістерської дисертації	з 19.04 до 10.05. 2020	
5	Збір і аналітична обробка статистичних матеріалів з теми дослідження	з 10.09 до 11.10. 2020	
6	Написання магістерської дисертації та її оформлення	з 11.10 до 02.12.2020	
7	Проведення дослідів дослідження режимів ПЧ-АД	з 15.10 до 02.12.2020	
8	Розробка стартап-проєкту	з 20.11 до 30.11.2020	
9	Рецензії та відгук наукового керівника на магістерську дисертацію	13.12. 2020	
10	Подання магістерської дисертації в ЕК та її захист	з 15.12.20 до 21.12. 2020	

Студент

Михайло ЧЕРЕДАРИК

Науковий керівник

Іван МАЙДАНСЬКИЙ

Анотація

Магістерська дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, переліку використаної літератури (128 сторінок машинописного тексту, 50 рисунків, 22 таблиць, 30 бібліографічних джерел).

Актуальність теми. У теперішній час зберігається актуальність розробки нових енергоефективних об'єктно-орієнтованих систем регульованого асинхронного електроприводу для мостових і козлових кранів, залізничних укладальних і ремонтних кранів, транспортних візків, які в основному оснащені асинхронними двигунами (АД), як короткозамкненим, так і з фазним ротором, часто з системами параметричного управління, які вимагають вдосконалення. У зв'язку зі зростаючими вимогами, в першу чергу щодо енергозбереження, все більша частина асинхронних регульованих параметричними способами електроприводів кранових механізмів замінюється на частотно - регульовані електроприводи. Використання досягнень в області перетворювальної техніки, розвиток засобів і алгоритмів керування дозволяє створювати системи асинхронного електроприводу, які за своїми регульовальними характеристиками відповідають електроприводу постійного струму і задовольняють зростаючим вимогам. Розроблювальні системи управління повинні забезпечити поліпшені енергетичні показники частотних асинхронних електроприводів. Забезпечення енергозбереження в асинхронному електроприводі можливо за рахунок застосування коригувальних засобів, в тому числі враховують нелінійність магнітної системи АД. Недостатньо досліджені і потребують удосконалення системи електроприводу на базі асинхронного двигуна з фазним ротором, виконані в поєднанні принципів частотного та каскадного управління, для них необхідно провести вибір найбільш раціональних систем управління, що дозволить підвищити їх енергетичні та експлуатаційні характеристики. Для механізмів пересування кранів з дводвигунним електроприводом, що мають велику довжину моста, характерні коливальні процеси, пов'язані з його пружною деформацією.

Метою дисертаційної роботи є підвищення енергоефективності та поліпшення динамічних властивостей однодвигунних та пружно пов'язаних дводвигунних частотно регульованих асинхронних електроприводів на базі короткозамкнутого двигуна та двигуна з фазним ротором з каскадним блоком для використання на механізмах пересування мостових кранів.

Об'єктом дослідження є електромеханічні системи з однодвигунними та дводвигунними частотними та частотно-каскадними асинхронними електроприводами, що використовуються на кранових механізмах і транспортних візках.

Предметом дослідження є коригувальні засоби та алгоритми управління, що дозволяють поліпшити енергетичні та динамічні властивості асинхронних електроприводів, в тому числі з пружними зв'язками.

Методи дослідження. Методи теорії електроприводу, теорії графів та аналізу стійкості систем автоматичного управління; моделювання з використанням програмних засобів; експериментального підтвердження результатів

Ключові слова: мостовий кран, автоматизація, енергоефективність, двигун, електропривод.

Аннотація

Магістерська дисертація состоит из введения, четырёх разделов, списка использованной литературы (128 страниц машинописного текста, 50 рисунков, 22 таблицы, 30 библиографических источников).

Актуальность темы. В настоящее время сохраняется актуальность разработки новых энергоэффективных объектно ориентированных систем регулируемого асинхронного электропривода для мостовых и козловых кранов, железнодорожных укладочных и ремонтных кранов, транспортных тележек, которые в основном оснащены асинхронными двигателями (АД), как короткозамкнутым, так и с фазным ротором, часто с системами параметрического управления, требующими совершенствования. В связи с возрастающими требованиями, в первую очередь в отношении энергосбережения, все большая часть асинхронных регулируемых параметрическими способами электроприводов крановых механизмов заменяется на частотно - регулируемые электроприводы. Использование достижений в области преобразовательной техники, развитие средств и алгоритмов управления позволяет создавать системы асинхронного электропривода, которые по своим регулировочным характеристикам соответствуют электроприводу постоянного тока и удовлетворяют возрастающим требованиям. Разрабатываемые системы управления должны обеспечивать улучшенные энергетические показатели частотных асинхронных электроприводов, такие системы исследованы в работах В.А. Мищенко и требуют дальнейшего развития. Обеспечение энергосбережения в асинхронном электроприводе возможно за счет применения корректирующих средств, в том числе учитывающих нелинейность магнитной системы АД. Недостаточно исследованы и требуют совершенствования системы электропривода на базе асинхронного двигателя с фазным ротором, выполненные с сочетанием принципов частотного и каскадного управления, для них необходимо провести выбор наиболее рациональных систем управления, что позволит повысить их энергетические и эксплуатационные характеристики. Для механизмов передвижения кранов с двух двигательным электроприводом, имеющих большую длину моста, характерны колебательные процессы, связанные с его упругой деформацией.

Целью диссертационной работы является повышение энергоэффективности и улучшение динамических свойств однодвигательных и упруго связанных двух двигательных частотно регулируемых асинхронных электроприводов на базе короткозамкнутого двигателя и двигателя с фазным ротором с каскадным блоком для использования на механизмах передвижения кранов и транспортных тележек.

Объектом исследования являются электромеханические системы с однодвигательными и двухх двигательными частотными и частотно-каскадными асинхронными электроприводами, используемые на крановых механизмах и транспортных тележках.

Предметом исследования являются корректирующие средства и алгоритмы управления, позволяющие улучшить энергетические и динамические свойства асинхронных электроприводов, в том числе с упругими связями.

Методы исследования. Методы теории электропривода, теории графов и анализа устойчивости систем автоматического управления; моделирования с использованием программных средств; экспериментального подтверждения результатов.

Ключевые слова: мостовой кран, автоматизация, энергоэффективность, двигатель, электропривод.

Annotation

The master's dissertation consists of an introduction, five chapters, a list of used literature (128 pages of typewritten text, 50 figures, 22 tables, 30 bibliographic sources).

Relevance of theme. Nowadays, still active demand for development of new energy-efficient object-oriented systems of variable asynchronous electric drive for bridge and gantry cranes, railway laying and repair cranes, transport trolleys, which are mainly equipped with asynchronous motors (AM), both short-circuited and phase rotor, where in often cases, parametric control systems need to be improved. In connection with the increasing requirements, that mainly are connected with energy saving policies, more and more asynchronous parametric-controlled electric drives of crane mechanisms are being replaced by frequency-controlled electric drives. Use of improvements in the area of converting technologies and development of instruments and control algorithms makes it possible to create systems of an asynchronous electric drive, which, in terms of their control characteristics, correspond to DC electric drive and can withstand increasing requirements. Already developed control systems should provide improved energy performance of asynchronous frequency drives, such systems were analyzed in the studies of V.A. Mishchenko, and require

for future studies in such a vector of research. Improvement in energy saving of asynchronous electric drive is possible due to the use of corrective devices, also paying attention to the nonlinearity of the AM magnetic system. The electric drive systems based on an asynchronous drive with a phase rotor, made with addition of frequency and cascade controlling principles. For those principles, it is important to choose the most rational control system, which will improve their energetic and operational performance. The mechanisms for the movement of cranes with two motor electric drives, that have a long bridge, it is more likely to witness oscillatory processes, caused by elastic deformation.

The purpose of the dissertation is to increase energy efficiency and improve the dynamic performance of single-engine and elastically coupled two motor frequency-controlled asynchronous electric drives based on a short-circuited motor and a phase-rotor motor with a cascade block for use on mechanisms from moving cranes and transport trolleys sphere.

The object of the study is electromechanical systems with single-motor and two-motor frequency and frequency-cascade asynchronous electric drives used on crane mechanisms and transport trolleys.

The subject of the study is corrective tools and control algorithms that can improve energetic and dynamic performance of asynchronous electric drives, including those with elastic connections.

Research methods. Methods of the electric drive theory, the theory of graphs and analysis of the stability of automatic control systems; modeling with specified software; experimental verification of the results.

Key words: bridge crane, automation, energy efficiency, motor, electric drive.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	12
1. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ З АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ТА ПРУЖНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ МЕХАНІЗМІВ ПЕРЕСУВАННЯ МОСТОВИХ КРАНІВ.....	16
1.1 Огляд досліджень електромеханічних систем з пружними зв'язками механізмів пересування мостових кранів	16
1.2 Огляд перспективних для застосування на механізмах пересування кранів та транспортних візків систем регульованого асинхронного електроприводу.....	22
2. ЗНИЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ МЕХАНІЗМІВ ПЕРЕСУВАННЯ МОСТОВИХ КРАНІВ	37
2.1 Дослідження динамічних властивостей двомасової пружної електромеханічної системи з однодвигунним електроприводом	37
2.2 Математичний опис та основні властивості двомасової ЕМС з дводвигунним електроприводом	46
2.3 Корекція динамічних характеристик двомасової ЕМС з дводвигунним електроприводом	50
2.4 Аналіз збурюючих впливів на двохмасову ЕМС з двохдвигунним електроприводом механізму пересування моста крана	60
3. АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ОДНОДВИГУННОГО ТА ДВОДВИГУНОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НА БАЗІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ.....	68
3.1 Автоматизовані системи частотного та частотно-каскадного електроприводу на базі асинхронного двигуна з фазним ротором	68
3.2 Системи дводвигунного електроприводу на базі АДФР з електричним зв'язком роторів двигунів	82
3.3 Експериментальне дослідження динамічних процесів в електромеханічній системі мостового крана, керованого дводвигунним електроприводом	95
3.4 Експериментальні дослідження дії вентильно-резисторної системи вирівнювання ЕРС асинхронних двигунів	98

4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МОСТОВОГО КРАНУ	101
4.1 Цілі та етапи реалізації стартап-проєкту.....	101
4.2 Обґрунтування актуальності та новизни інноваційної ідеї стартап-проєкту.....	102
4.3 Аналіз конкурентного середовища.....	103
4.4 Обґрунтування ресурсного забезпечення проєкту.....	104
4.5 Ключові види діяльності та ключові партнери.....	104
4.6 Прямі матеріальні витрати.....	105
4.7 Інші прямі витрати.....	106
4.8 Умовно-постійні витрати.....	106
4.9 Обґрунтування рівня рентабельності інноваційної ідеї.....	107
4.10 Обґрунтування собівартості інноваційної ідеї стартап-проєкту.....	108
4.11 Обґрунтування вартості виробництва інноваційної техніки.....	108
4.12 Цільові групи потенційних споживачів.....	109
4.13 Бізнес-модель проєкту.....	109
4.14 Аналіз ризиків стартап проєкту.....	110
ВИСНОВКИ.....	112
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	114
ДОДАТКИ.....	117

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 128 сторінок, 50 рисунків, 22 таблиці, 30 використаних джерел.

Метою дисертаційної роботи є підвищення енергоефективності та поліпшення динамічних властивостей однодвигунних та пружно пов'язаних дводвигунних частотно регульованих асинхронних електроприводів на базі короткозамкнутого двигуна та двигуна з фазним ротором з каскадним блоком для використання на механізмах пересування кранів і транспортних візків.

Об'єктом дослідження є електромеханічні системи з однодвигунними та дводвигунними частотними та частотно-каскадними асинхронними електроприводами, що використовуються на кранових механізмах і транспортних візках.

Предметом дослідження є коригувальні засоби та алгоритми управління, що дозволяють поліпшити енергетичні та динамічні властивості асинхронних електроприводів, в тому числі з пружними зв'язками.

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

МПК – механізм пересування крану

ПТМ – підйомно-транспортний механізм

АД – асинхронний двигун

АДКЗ – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором

АДФР – асинхронний двигун з фазним ротором

ПЧ – перетворювач частоти

ШІМ – широтно-імпульсний модулятор

КЗ – коротке замикання

ККД – коефіцієнт корисної дії

ПЧ з ЛПС – перетворювач частоти з ланцюгом постійного струму

ПУЕ – правила улаштування електроустановок

ЕМС – електромеханічні системи

ЧКЕ – частотно-каскадний електропривод

ВСТУП

В умовах сучасного виробництва велика увага приділяється проблемі підвищення енергоефективності електроприводів механізмів різного класу, у тому числі механізмів пересування кранів і транспортних візків, що може бути здійснено за рахунок розробки нових схемних рішень і алгоритмів управління.

Ідея роботи полягає у створенні та дослідженні систем частотного управління електроприводами на базі асинхронних двигунів - короткозамкнутого і з фазним ротором з каскадним блоком, в однодвигунному та дводвигунному виконанні з пружним механічним зв'язком та розробці систем корекції для використання на механізмах пересування кранів і транспортних візків.

Завдання, які ставилися та виконувалися в ході роботи:

- 1) Аналіз сучасного стану асинхронних електроприводів, механізмів пересування кранів та транспортних візків, особливостей їх спільної роботи з механічною частиною, динаміки, енергоефективності, працездатності та можливості застосування коригувальних засобів, що поліпшують динамічні властивості та енергетичні показники;
- 2) дослідження методами структурного аналізу та математичного моделювання впливу систем корекції, що забезпечують синхронізацію швидкостей двигунів дводвигунного електроприводу, на динамічні процеси в електромеханічних системах з пружними зв'язками;
- 3) розробка та дослідження енергозберігаючих частотно-каскадних електроприводів на базі асинхронного двигуна з фазним ротором з каскадним блоком, з'єднаним як послідовно, так і паралельно по відношенню до перетворювача частоти, розробка систем автоматичного управління;

4) аналіз систем дводвигунного асинхронного електроприводу, що забезпечують синхронізацію швидкостей двигунів, розробка та дослідження дводвигунного частотно-каскадного електроприводу з підключеним паралельно до загального перетворювача частоти каскадним блоком, що забезпечує енергозбереження, а також синхронізацію швидкостей двигунів, що дозволить домогтися зниження динамічних навантажень в електромеханічній системі.

Наукова новизна:

- встановлено, що демпфуюча здатність дводвигунного пружно пов'язаного електроприводу підвищується при введенні в систему управління негативного зворотного зв'язку по різниці відхилень швидкостей обертання двигунів від однакової для обох двигунів швидкості ідеального холостого ходу, дія цього зворотного зв'язку має такий же характер, як і дія негативного зворотного зв'язку по різниці швидкостей двигунів;

- розроблена система корекції намагнічуючої складової струму статора в частотному асинхронному електроприводі з векторним управлінням, що підвищує його енергоефективність, що відрізняється урахуванням навантаження на валу двигуна і не лінійності його кривої намагнічування за допомогою блоку кусково-лінійної апроксимації;

- розроблена система частотно-струмового управління дводвигунним частотно-каскадним електроприводом з загальними перетворювачем частоти та каскадним блоком, передає енергію ковзання асинхронних двигунів з фазним ротором в ланку постійного струму перетворювача частоти і здійснює вирівнювання ЕРС, швидкостей обертання роторів двигунів, що відрізняється наявністю системи корекції, що змінює сигнал завдання частоти ЕРС роторів в залежності від величини випрямленої вихідної напруги каскадного блоку.

Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів та висновків підтверджується відповідністю теоретичних досліджень і розрахунків,

отриманих аналітичним шляхом характеристик та залежностей, результатів комп'ютерного моделювання, загальним положенням теорії електроприводу і результатами експериментів.

Теоретична значимість роботи полягає:

- в теоретичному обґрунтуванні можливості поліпшення демпфуючої здатності систем дводвигунного електроприводу за рахунок використання коригувальних засобів, що реалізують негативний зворотний зв'язок по різниці швидкостей двигунів і негативний зворотній зв'язок по різниці відхилення швидкостей двигунів від швидкості ідеального холостого ходу;

- в теоретичному обґрунтуванні методу підвищення енергоефективності системи частотного асинхронного електроприводу з векторним управлінням, за рахунок застосування корекції сигналу завдання намагнічування складової струму статора, що враховує різну ступінь насичення нелінійного магнітного ланцюга, за допомогою блоку кусково-лінійної апроксимації;

- у теоретичному обґрунтуванні можливості досягнення кращих динамічних властивостей дводвигунних електроприводів на базі асинхронних двигунів з фазним ротором з електричним зв'язком двигунів по ланцюгу роторів і пружним механічним зв'язком, в тому числі частотно-каскадного електроприводу, із застосуванням корекції системи управління, дія якої спрямована на узгодження сигналу завдання частоти ЕРС ротора з вихідною напругою каскадного блоку.

Практична цінність полягає:

- у зниженні за рахунок застосування коригувальних засобів струму статора в середньому на 6% в порівнянні зі звичайними системами частотного асинхронного електроприводу, при статичному моменті, що не перевищує половину від номінального значення;

- у підвищенні демпфуючої здатності дводвигунних пружно пов'язаних електроприводів за рахунок включення в роторні ланцюги загального блоку, який може мати різні конструкції, через які протікають випрямленні струми роторів, що дозволяє знизити рівень максимальних динамічних навантажень в електромеханічній системі в середньому на 25-30 %;

- у можливості адаптації запропонованих коригувальних засобів, що мають просту апаратну і програмну реалізацію, до спільної роботи зі стандартними електроприводами, що підвищує привабливість таких систем корекції для електроприводів кранових механізмів.

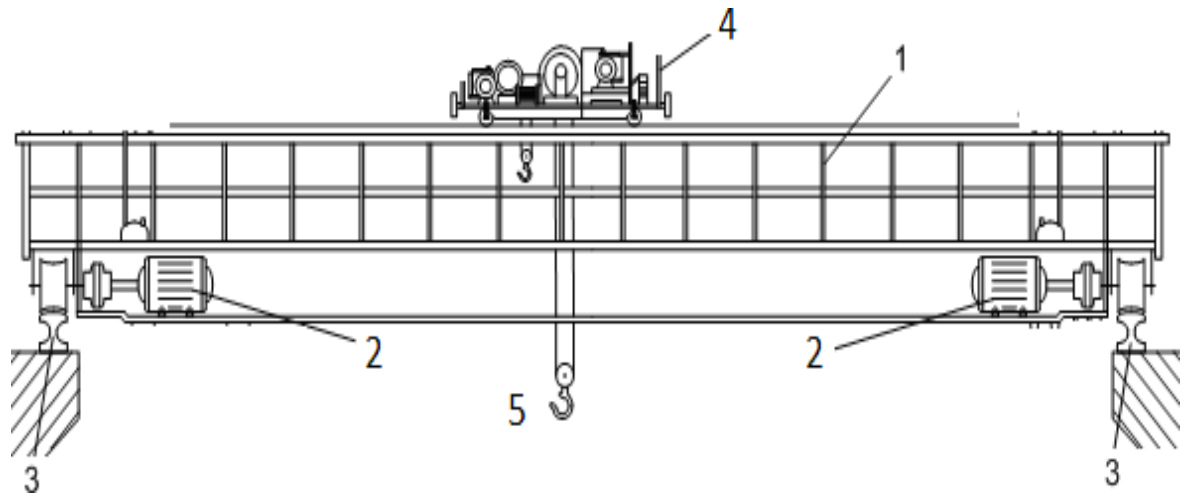
РОЗДІЛ 1

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ З АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ТА ПРУЖНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ МЕХАНІЗМІВ ПЕРЕСУВАННЯ МОСТОВИХ КРАНІВ

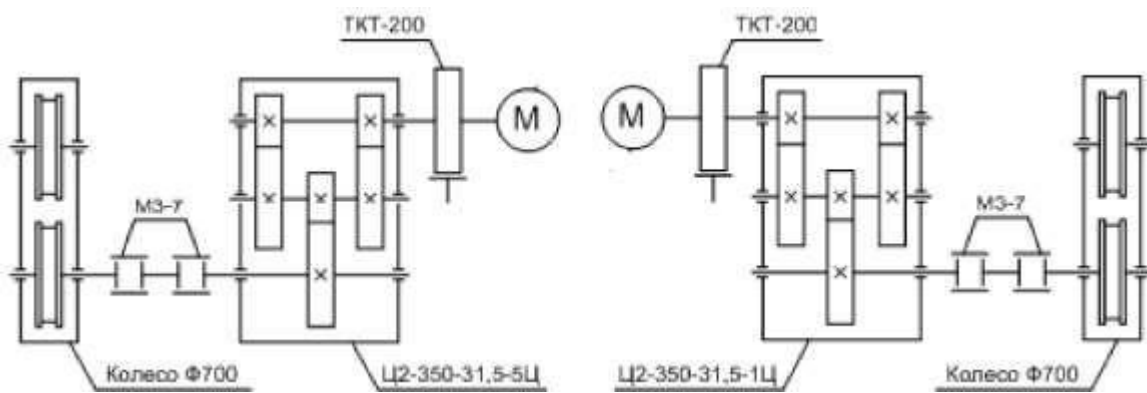
1.1. Огляд досліджень електромеханічних систем з пружними зв'язками механізмів пересування мостових кранів

У сучасній промисловості, широко застосовуються кранові механізми і транспортні візки, які виконують горизонтальне або вертикальне пересування вантажів, або рух по похилому рейковому, безрейковому і канатному шляху. По дворельсовій колії пересуваються мостові, козлові, баштові, порталні та залізничні крани, пересувні візки та мостові перевантажувачі. У металургії, використовуються мостові і козлові крани, сталевози, шлаковози, електропередавальні мости, залізничні ремонтні та укладальні крани та ін. (додаток А). У деяких металургійних виробництвах кранове та інше підйомно-транспортне обладнання є допоміжним, а в таких цехах, як копровий цех, а також в ремонтних підрозділах на залізниці, кранові механізми входять до складу основного обладнання.

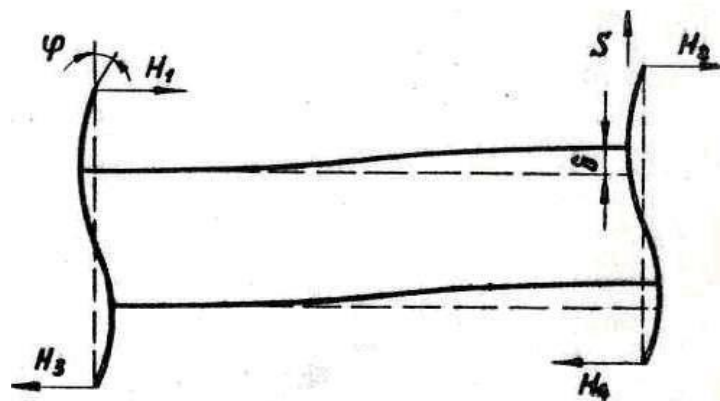
Найбільш поширеними серед кранових механізмів є мостові та козлові крани, що мають типові конструкції. Мостовий кран (рисунок 1.1) зазвичай має механізм пересування мосту, механізм підйому вантажів і механізм пересування візка. Міст крана виконаний у вигляді рами 1, що складається з чотирьох балок - двох кінцевих і двох прогонових, він переміщається на колесах з ребордами по підкранових шляхах.



а



б



в

Рисунок 1.1 - Мостовий кран: а - загальний вигляд; б - схема кінематичного ланцюга механізму пересування моста; в - вигин рами моста при русі крана з перекосом

Двигуни 2 пов'язані з ведучими колесами, що переміщуються по рейках 3, через вали, муфти, редуктор. Схема кінематичного ланцюга механізму пересування моста наведена на малюнку 1.1, б. Візок 4 переміщується по рейках, розміщених на прогонових балках моста. На візку встановлено механізм 5 підйому вантажів.

Більшість електромеханічних систем сучасних кранових механізмів мають уніфіковані конструкції і складаються з типових елементів. Металоконструкції кранів мають значні габаритні розміри, великі маси складових вузлів і кінцеву жорсткість елементів. Наявність пружних зв'язків є причиною підвищених динамічних навантажень в ЕМС кранів, так як такі елементи, як рама моста, гнучкий канат, мають обмежену жорсткість.

На мостових і козлових кранах в найбільш інтенсивних режимах працює електропривод механізму пересування моста. Це пов'язано з необхідністю зупинок механізму в заданому положенні, частою зміною напрямку руху.

Високий рівень динамічних навантажень в металоконструкції крана в основному пов'язаний з несиметричністю керуючих впливів дводвигунного електроприводу, різними статичними навантаженнями двигунів, і різними наведеними сумарними моментами інерції електроприводів при несиметричному положенні візка, що призводить до перекосу моста крана.

Присутність в механічній частині ЕМС елементів з великими вантажами, а також з малими жорсткостями визначає складний характер динамічних процесів в ЕМС. Вигин ферми моста може становити кілька десятків міліметрів при довжині прольоту моста декілька десятків (до 50) метрів.

Дослідження, виконані в ряді робіт дозволили встановити, що найбільш значні динамічні навантаження пов'язані з пружною перекісною деформацією моста крана.

Механізми пересування мостових кранів оснащуються системами дводвигунного або багато двигунного електроприводу. Внаслідок

технологічних причин, візок з вантажем часто розташований ближче до однієї з опор моста, в результаті цього металоконструкція при русі моста піддається додатковим пружним деформаціям. У пружній ЕМС за рахунок розгойдування вантажу виникає коливальний процес, в який втягуються маси кранового візка та моста крана. На низькочастотні коливання в фермі крана, пов'язані з розгойдуванням вантажу, накладаються більш високочастотні власні коливання ферми моста, викликані його деформаціями внаслідок неоднакових керуючих впливів з боку дводвигунного електроприводу.

Механізми з жорстким закріпленням вантажу, до яких відносяться транспортні візки, передавальні мости, що переміщуються по рейковому шляху та ін., зазвичай мають жорстку металоконструкцію, в меншій мірі піддається пружних деформацій при поступальному русі.

Вхідні до складу ЕМС електроприводи багато в чому визначають характер динамічних процесів, так як здатні надавати демпфуючий вплив на пружні коливання ЕМС. Слід зазначити, що особливості динамічних властивостей ЕМС вантажопідйомних механізмів, керованих асинхронними електроприводами, досліджені недостатньо детально і вимагають подальшого опрацювання.

В умовах повторно-короткочасного режиму роботи механізмів пересування крана (МПК), підвищений рівень вібрацій елементів механічного обладнання, при цьому для гасіння коливань пружних ЕМС механічні демпфери виявляються малоефективними. Отже, використовуючи результати робіт, необхідно підвищувати демпфуючу здатність систем асинхронного електроприводу, широко використовуваного на підйомно-транспортних механізмах (ПТМ). Вирішення цього завдання вимагає докладного вивчення динамічних властивостей пружно пов'язаних ЕМС.

Серед великих зарубіжних фірм, що випускають Підйомно-транспортне обладнання, виділяються "Demag" (Німеччина), "Cleveland " (США), "Mitshubishi" (Японія), "Matterson" (Великобританія), які застосовують системи

електроприводу з поліпшеними динамічними властивостями.

Сучасні вимоги до матеріаломістких об'єктів, таким як кранові механізми, полягають в застосуванні ресурсозберігаючих технічних рішень. У зв'язку з цим можлива розробка мостових кранів з полегшеними металоконструкціями, що характерно для промислових маніпуляторів. Однак при цьому зростають вимоги щодо їх динамічних властивостей систем електроприводу, демпфуючої здатності, плавність пускових і гальмівних режимів.

На кранових механізмах і транспортних візках широко використовуються асинхронні двигуни, як з короткозамкненим (АДКЗ), так і з фазним ротором (АДФР). Системи дводвигунного асинхронного електроприводу оснащені механізмом пересування моста, а на грейферних кранах - механізм підйому і закривання грейфера крана.

Дослідження показали, що в дводвигунному та багатодвигунному електроприводі на базі АДФР при наявності пружного механічного зв'язку доцільно виконувати синхронізацію швидкостей двигунів, реалізувавши їх електричний зв'язок по ланцюгу ротора з організацією загальної ланки постійного струму. Однак запропонована система узгодженого параметричного резисторно-контакторного управління електрично пов'язаними двигунами має низькі енергетичні показники.

На кранових механізмах і транспортних візках все більш широко використовуються системи регульованого асинхронного електроприводу з частотним управлінням. Використання досягнень в області перетворювальної техніки, систем і алгоритмів управління дозволило значно поліпшити енергетичні і динамічні показники роботи асинхронних електроприводів, разом з тим зберігається необхідність продовження досліджень спільної роботи асинхронного електроприводу і механічного обладнання кранових механізмів і транспортних візків.

1.2. Огляд перспективних для застосування на механізмах пересування кранів та транспортних візків систем регульованого асинхронного електроприводу

В даний час найбільш перспективним і широко впроваджуваним на МПК є частотно-регульований асинхронний електропривод на базі АДКЗ. При створенні систем частотного асинхронного електроприводу використовуються теоретичні розробки. В даний час в основному вирішення проблеми, пов'язане з використанням на мостових і козлових кранах живленням електроприводів через тролєї, що не гарантує безперервність зв'язку електроприводу з мережею живлення. У той же час в експлуатації знаходиться велика кількість енерговитратних систем електроприводу на базі АДФР з контакторно-резисторним управлінням. Враховуючи необхідність їх модернізації, доцільно розглянути можливість продовження використання АДФР, але з більш енергоефективною системою управління.

Електропривод МПК повинен забезпечувати необхідні режими роботи механічного обладнання в пускових, гальмівних і сталих режимах за рахунок регулювання двох змінних двигуна: частоти обертання ω та моменту M . Процес регулювання координат супроводжується зміною механічних характеристик двигуна. Системи електроприводу МПК повинні забезпечувати статичні механічні характеристики, наведені на рисунку 1.2.

На багатьох механізмах пересування кранів і транспортних візків до «жорсткості» робочої ділянки механічних характеристик електроприводу не пред'являють високих вимог. У ряді випадків достатня жорсткість природної механічної характеристики двигуна. Статичний момент є реактивним. Зазвичай він не перевищує 50% від номінального моменту приводних двигунів. Це пов'язано з повторно-короткочасним режимом роботи таких механізмів з ТВ% до 40% і вище.

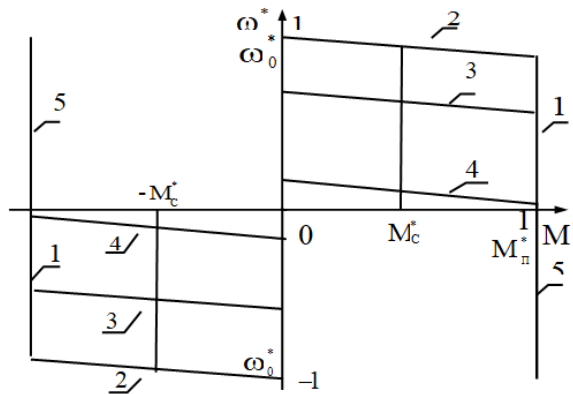


Рисунок 1.2 - статичні механічні характеристики

з розбивкою по ділянках для реверсивного електроприводу: 1 - пусковий;

2 - робочий; 3 та 4 - регульовальні; 5 - гальмування

Вимоги до механічних характеристик електроприводів, які використовуються на різних ПТМ, в основному відрізняються необхідним діапазоном регулювання частоти обертання. У загальному випадку електропривод ПТМ повинен задовольняти наступним вимогам:

- надійність двигуна, простота конструкції, можливість використання в несприятливих умовах експлуатації;
- потрібні механічні характеристики, що забезпечують регулювання швидкості;
- сталість пускового та гальмівного моменту, для забезпечення сталості прискорення в динамічних режимах;
- застосування уніфікованих схем силової частини, алгоритмів та систем управління.

В даний час найбільш перспективним і широко впроваджуваним на МПК є частотно-регульований асинхронний електропривод з АДКЗ. Частотне регулювання АД дозволяє регулювати швидкість обертання магнітного поля статора та плавно регулювати швидкість в широких межах з добрими економічними показниками. Частотний асинхронний електропривод успішно застосовується на конвеєрах, мостових і козлових кранах, транспортних візках та інших механізмах підйомно-транспортного призначення.

Особливість роботи металургійного обладнання, в порівнянні з аналогічними механізмами загальнопромислового призначення, полягає в більш складних умовах експлуатації та більшій інтенсивності роботи. Для багатьох кранових механізмів характерний важкий та досить важкий режими (А5, А6) з ТВ 40-60%. У металургії в сталеплавильних, конверторних та цехах гарячого прокату ПТМ працюють в умовах високої температури, запиленості, вібрації. Це накладає обмеження на використання складних систем електроприводу. Перевага при експлуатації віддається на користь найбільш простих, працездатних і надійних систем електроприводу.

Саме тому в даний час вже використовується ряд добре зарекомендованих себе розробок частотного електроприводу з асинхронними короткозамкненими двигунами і триває розробка систем частотного асинхронного електроприводу, які розрізняються за складністю технічної реалізації, показниками якості регулювання та вартості.

Класифікація асинхронних електроприводів базується на їх угрупованні за: способом формування характеристик, базовими принципами регулювання та іншими показниками.

Системи керування АДКЗ виконуються на основі:

- безпосередніх або матричних ПЧ (НПЧ);
- ПЧ з ланцюгом постійного струму між випрямлячем та інвертором (ПЧ з ЛПС).

В даний час перевага віддається ПЧ з ланкою постійного струму. Основною є мостова схема інвертора напруги на IGBT – транзисторах зі зворотними діодами. Її принцип роботи заснований на широтно-імпульсній модуляції (ШІМ).

Основним типом ПЧ є використання в частотно-регульованих асинхронних електроприводах ПТМ, є ПЧ на базі АІН, який містить мостовий нерегульований випрямляч - В, ємнісний фільтр - С та мостовий АІН, виконаний на IGBT-транзисторах зі зворотними діодами. У гальмівному режимі

використовуються резистор R_T та транзисторний ключ K_T (рисунок 1.3). Для формування трифазного струму використовується принцип широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) випрямленої напруги, з почерговим перемиканням транзисторів, що входять до складу анодної і катодної груп мостового інвертора.

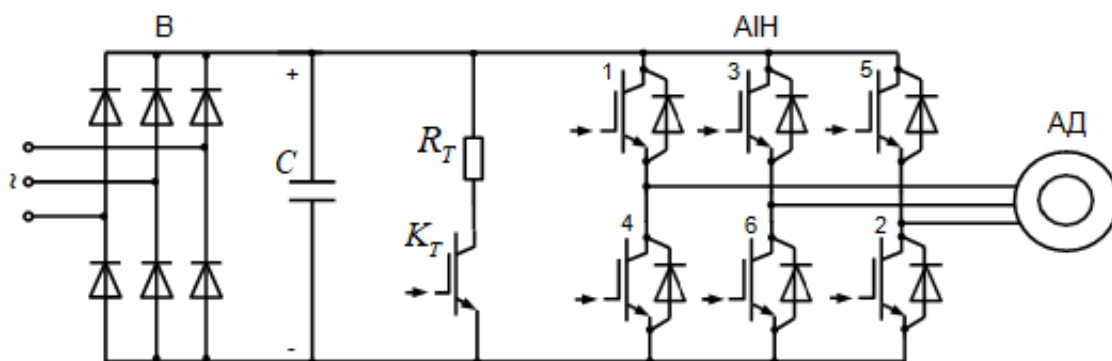


Рисунок 1.3 - Система ПЧ-АД на базі АІН

Автономні інвертори струму (АІТ), що забезпечують якісну форму вихідної напруги виконуються на базі повністю керованих силових електронних ключів, що допускають в тривалому режимі підвищену частоту перемикання силових ключів інвертора більше 7,5 кГц, вихідна напруга АІТ забезпечує мінімальний рівень гармонік напруги і струму статора. Така частота комутації силових ключів (IGBT - транзисторів) вже досягається, наприклад в розробках фірми “Siemens”, але масового застосування такі ключові елементи ще не мають. Схема електроприводу з автономним інвертором струму (АІТ), що забезпечує при підвищеній частоті перемикань ключових елементів інвертора, високу якість живлення двигуна напруги, наведена на рисунку 1.4, а.

До складу ПЧ на базі АІТ входить тиристорний регульований випрямляч, реактор, інвертор, конденсаторний фільтр, підключений до виходу інвертора. В АІТ в кожне плече моста включені IGBT-транзистори і послідовно з ними - відсікають діоди, крім того, до точок їх з'єднання підключені додаткові комутуючі конденсатори, що підвищують якість вихідної напруги.

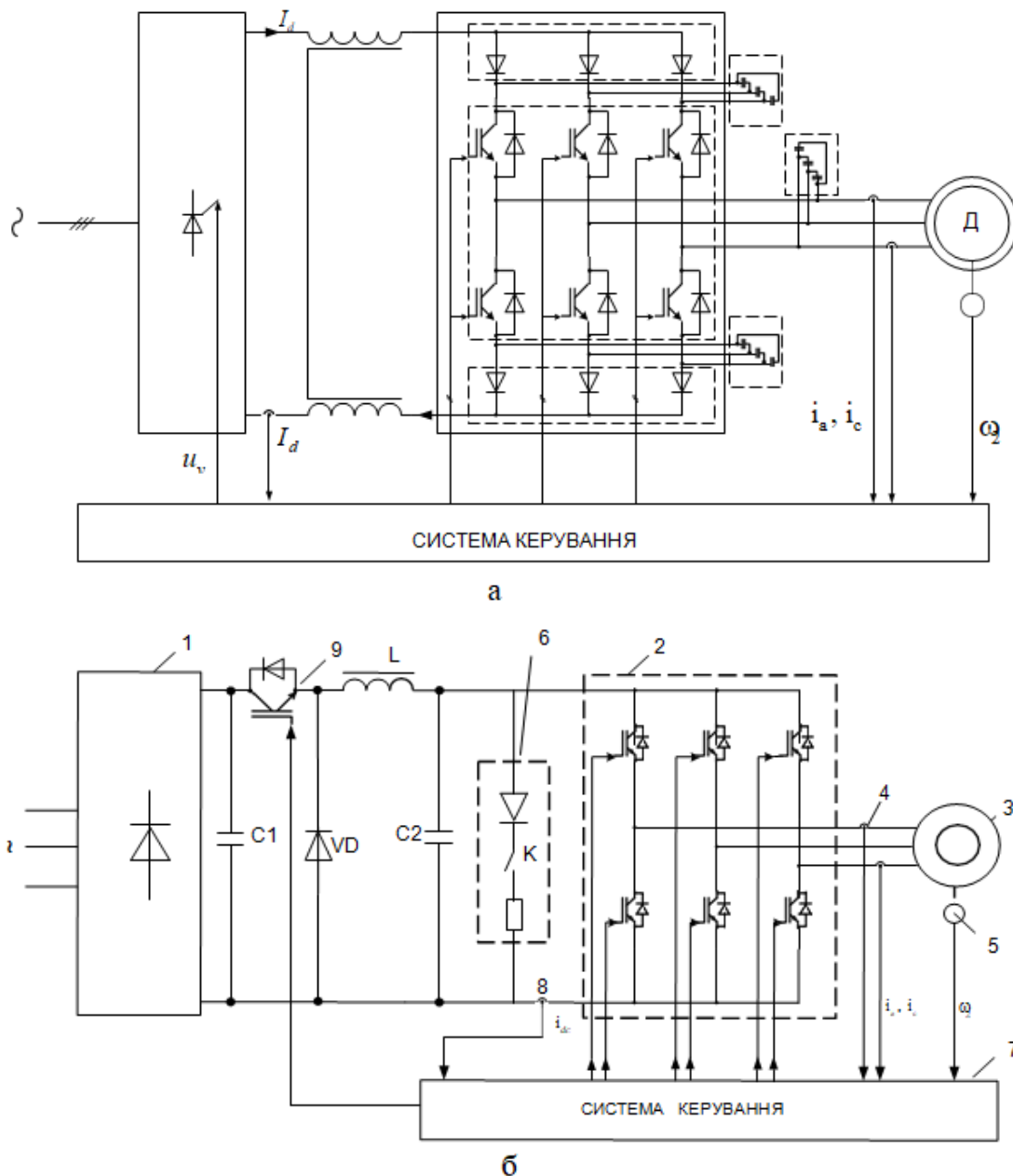


Рисунок 1.4 - системи ПЧ – АД з додатковими елементами: а - на базі АІТ з додатковими елементами в плечах моста; б - на базі АІН з додатковим комутуючим IGBT - транзистором в ланці постійного струм

Керування таким АІТ з додатковим IGBT - транзистором ведеться на основі релейного принципу керування. За допомогою додаткового комутатора змінюється рівень випрямленої напруги і потужності, що надходить на вхід інвертора.

При керуванні АІН використовується широтно-імпульсна модуляція. У системах на базі АІТ пропонується використання принципу релейного

управління. На ПТМ застосовуються в основному системи частотного асинхронного електроприводу на базі АІН з ШІМ модуляцією.

Основними принципами побудови систем управління частотним асинхронним електроприводом, що застосовується на МПК є: скалярне та векторне управління.

В даний час не отримало широке застосування на МПК пряме управління моментом АД.

Серед застосування на кранових механізмах систем управління затребуваними, внаслідок їх простоти, є системи скалярного управління. Найбільш легко реалізуємо закон скалярного управління вниз від основної швидкості $U_1/f_1 = const$. Однак в більшості випадків доводиться використовувати додаткові заходи по корекції закону зміни напруги, що дозволяють поліпшити показники роботи електроприводу при низьких частотах обертання ротора. Скалярне управління $U/f = const$ з корекцією напруги забезпечує діапазон регулювання швидкості до 10:1, при відсутності датчика швидкості.

Відомі більш складні системи частотного управління АД, що реалізують закони, які дозволяють наблизитися до оптимального управління, що забезпечує, Наприклад мінімум втрат енергії, або оптимізацію за іншим критерієм.

Серед систем скалярного частотного управління в якості основних можна виділити:

- розімкнуті - без стабілізації магнітного потоку; зі стабілізацією магнітного потоку; зі стабілізацією магнітного потоку та частоти обертання; зі стабілізацією електромагнітного моменту (магнітного потоку або струму статора та ковзання);

- замкнуті - з регулюванням магнітного потоку з одночасною стабілізацією ковзання; з регулюванням магнітного потоку в функції статичного моменту; оптимальні.

Прийнятні для МПК регулювальні та пускові характеристики в системах скалярного управління забезпечуються при побудові замкнутих систем управління АД.

Більш якісне управління АД забезпечують системи векторного управління та прямого управління моментом.

При роботі векторної системи управління аналізується стан просторових векторів електромагнітних змінних АД, що впливають на входні регульовані координати АД - швидкість та момент. Такі системи є швидкодіючими і забезпечують діапазон регулювання швидкості 1:1000 при використанні датчика швидкості. Векторні системи управління здатні забезпечувати оптимальні режими, спрямовані на мінімізацію втрат або струмів в обмотках АД і ряд інших завдань. Слід зазначити, що зазвичай у векторних системах управління намагнічує поздовжню складову вектора струму статора задають постійною величиною, що в ряді випадків ускладнює або не дозволяє здійснювати вирішення завдань оптимізації роботи АД за обраними критеріями.

Максимум моменту електричної машини досягається, якщо вектори двох формують момент змінних, одна з яких визначає величину магнітного потоку, будуть зрушені один щодо одного на 900 ел. Реалізувати таке взаємне положення формуючи момент векторів змінних в асинхронному двигуні вдається тільки в системах подвійного живлення. Однак системи електроприводи на базі машини подвійного живлення конструктивно складні і на ПТМ не застосовуються.

При побудові систем оптимального керування важливою частиною системи є блок непрямого визначення кута між векторними змінними АД, так як пряме визначення цього кута найчастіше неможливо. Для цієї системи характерним є чутливість до зміни опорів обмоток АД при нагріванні.

Для визначення кута між векторами формуючих момент АД змінних доводиться здійснювати побудову спостерігачів, що дозволяє здійснювати

корекцію алгоритмів управління миттєвими значеннями трифазних змінних АД.

Мінімізації струму статора асинхронного двигуна при заданій продуктивності електроприводу, а також побудові систем оптимального управління частотним асинхронним електроприводом присвячені роботи ряду зарубіжних вчених.

Системи оптимального управління частотними асинхронними електроприводами, що забезпечують енергозберігаючий режим роботи, можуть знайти застосування на ПТМ.

Відомі системи прямого управління моментом асинхронного двигуна, істотною відмінністю яких від векторного управління є використання релейних регуляторів і вибір моменту включення такого ключа, який викликає зміну магнітного потоку і моменту АД в потрібному напрямку. Однак у теперішній час системи прямого управління моментом асинхронного двигуна на кранових механізмах не знайшли широкого поширення, тому що вони складніше систем скалярного і векторного управління.

На кранових механізмах і транспортних візках при помірних вимогах до динамічних показників та діапазону регулювання сталої швидкості перевагу віддають в першу чергу скалярним системам частотного управління АД з мінімальною кількістю датчиків. Якщо потрібно точне позиціонування механізму, то електропривод повинен мати механічні характеристики з діапазоном регулювання швидкості до 10:1, в цьому випадку використовують датчикові системи управління.

Протягом декількох минулих десятиліть вважалося, що складним умовам експлуатації МПК в достатній мірі задовольняє системи електроприводу на базі АДФР з параметричним управлінням, в яких енергія ковзання виводиться з ланцюга ротора і розсіюється на зовнішніх резисторах. У металургії на МПК все ще використовується велику кількість АДФР, керованих енерговитратними системами резисторно-контакторного параметричного регулювання з силовими

контролерами. Такі системи електроприводу, незважаючи на низькі енергетичні показники, успішно застосовувалися раніше для роботи у важких умовах - інтенсивних повторно-короткочасних режимах з ТВ 40 – 60%, при високій температурі, вологості, запиленості, вібрації. Слід зазначити, що сучасний рівень розвитку систем асинхронного електроприводу вимагає переходу до енергоефективних систем управління АДФР.

Відома система асинхронного вентильного каскаду, показана на рисунку 1.5, А, побудована на базі АДФР, характеризується досить високими енергетичними показниками, але тільки при невисокому (до 20% вниз від основної механічної характеристики) діапазоні регулювання швидкості.

Стандартні системи асинхронного вентильного каскаду на кранових механізмах і транспортних візках не використовуються, тому що не можуть забезпечити необхідних пускових і гальмівних характеристик. В системі асинхронного вентильного каскаду додаткова напруга вводиться в ланцюг ротора АДФР через нерегульований випрямляч, вхід якого підключений до обмоток ротор та інвертора, з'єднаний через трансформатор з мережею живлення. В асинхронно вентильних каскадах положення вектора додаткової напруги \vec{U}_2 , введеного в ланцюг ротора, жорстко визначено, він спрямований протилежно вектору струму ротора (рисунок 1.5, в). Якщо прийняти, що активний опір джерела ЕРС дорівнює нулю ($R_d = 0$), то рівняння, що зв'язує вектора додаткової напруги в ланцюзі ротора і струм ротора має вигляд:

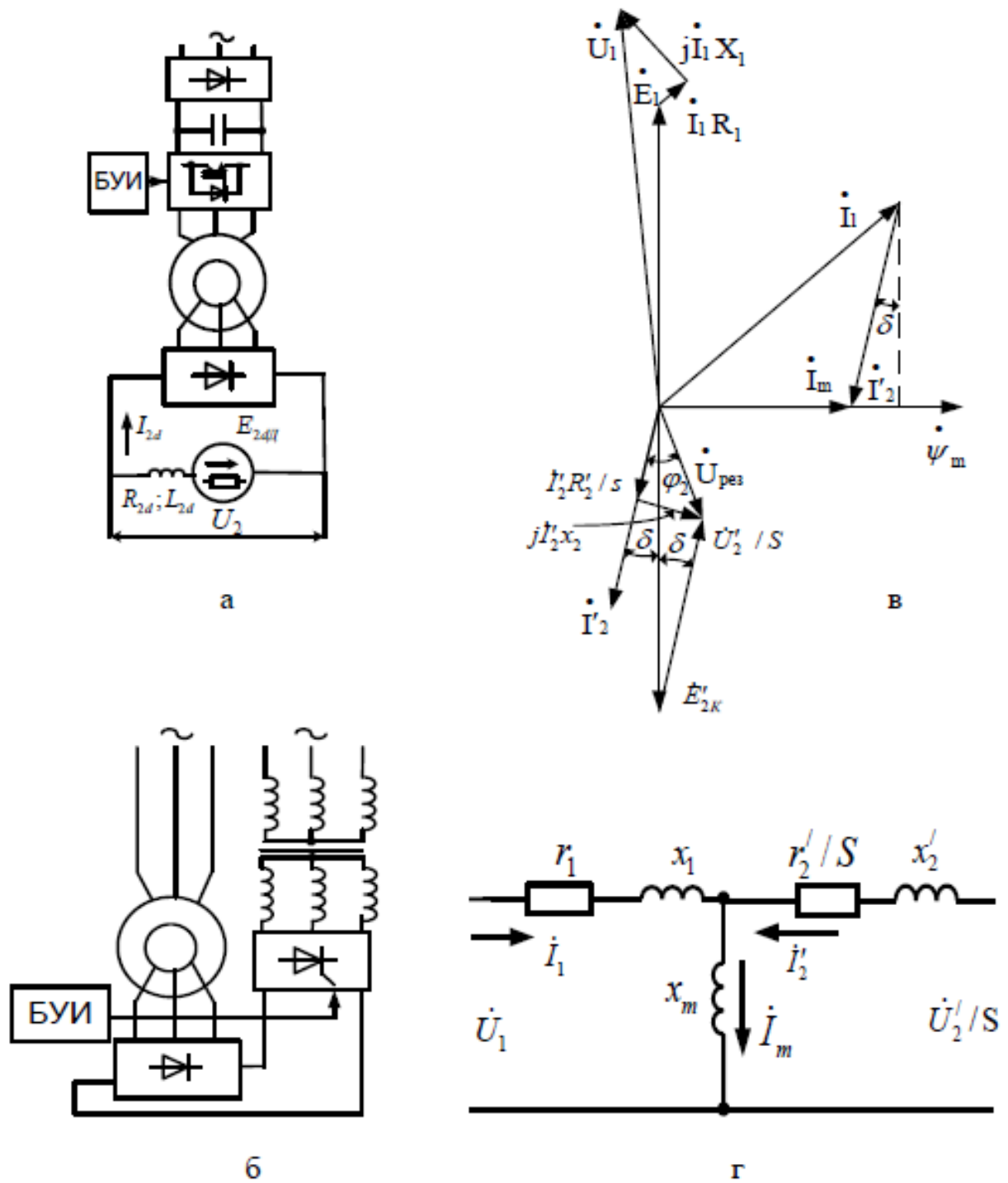


Рисунок 1.5 - введення в ланцюг ротора асинхронного двигуна додаткової ЕРС:
 а – функціональна схема електроприводу; б – схема АВК; в – векторна діаграма АВК; г – схема заміщення АВК

$$\bar{U}_2 = -\bar{i}_2 \cdot \left(\bar{E}_{ad} + L_d \cdot \frac{d\bar{i}_2}{dt} \right), \quad (1.1)$$

де, \bar{i}_{i2} - одиничний вектор струму ротора; \bar{E}_{ad} - додаткова ЕРС в ланцюзі

постійного струму; L_d - індуктивність в ланцюзі постійного струму.

Система електроприводу на базі стандартного АВК, в разі доповнення системою частотного управління, стає досить складною, на практиці не знайшла широкого застосування.

Одним з перспективних напрямків розвитку електроприводів МПК на базі АДФ є створення гібридних систем, що поєднують принципи частотного і каскадного управління, званих системами частотно-каскадного електроприводу (ЧКЕ). Можливі варіанти управління АДФР з використанням частотно-каскадного принципу побудови силової частини наведені на рисунку 1.6.

У схемі ЧКЕ реалізується можливість одночасного та незалежного управління змінними в ланцюгах обмоток статора і ротора АДФР. Обмотка статора може отримувати живлення від мережі або від перетворювача частоти з різними законами управління, наприклад $U/f = const$. У схемах ЧКІ - (малюнок 1.6, а), виконаної на базі АІТ, і (малюнок 1.6, б), виконаної на базі АІН, обмотки статора і ротора мають загальний електричний ланцюг. Енергія ковзання рекуперується з ланцюга ротора в ланку постійного струму ПЧ. Система управління ЧКЕ може бути виконана скалярною без датчика швидкості або з датчиком швидкості. Даний принцип управління АДФР доцільно застосовувати для управління дводвигунним електроприводом.

На рисунку 1.6, в приведена система ЧКІ на базі АІН з каскадним блоком, включеним зустрічно-паралельно основному силовому каналу. Дана система електроприводу перспективна для проведення досліджень можливості її застосування на МПК.

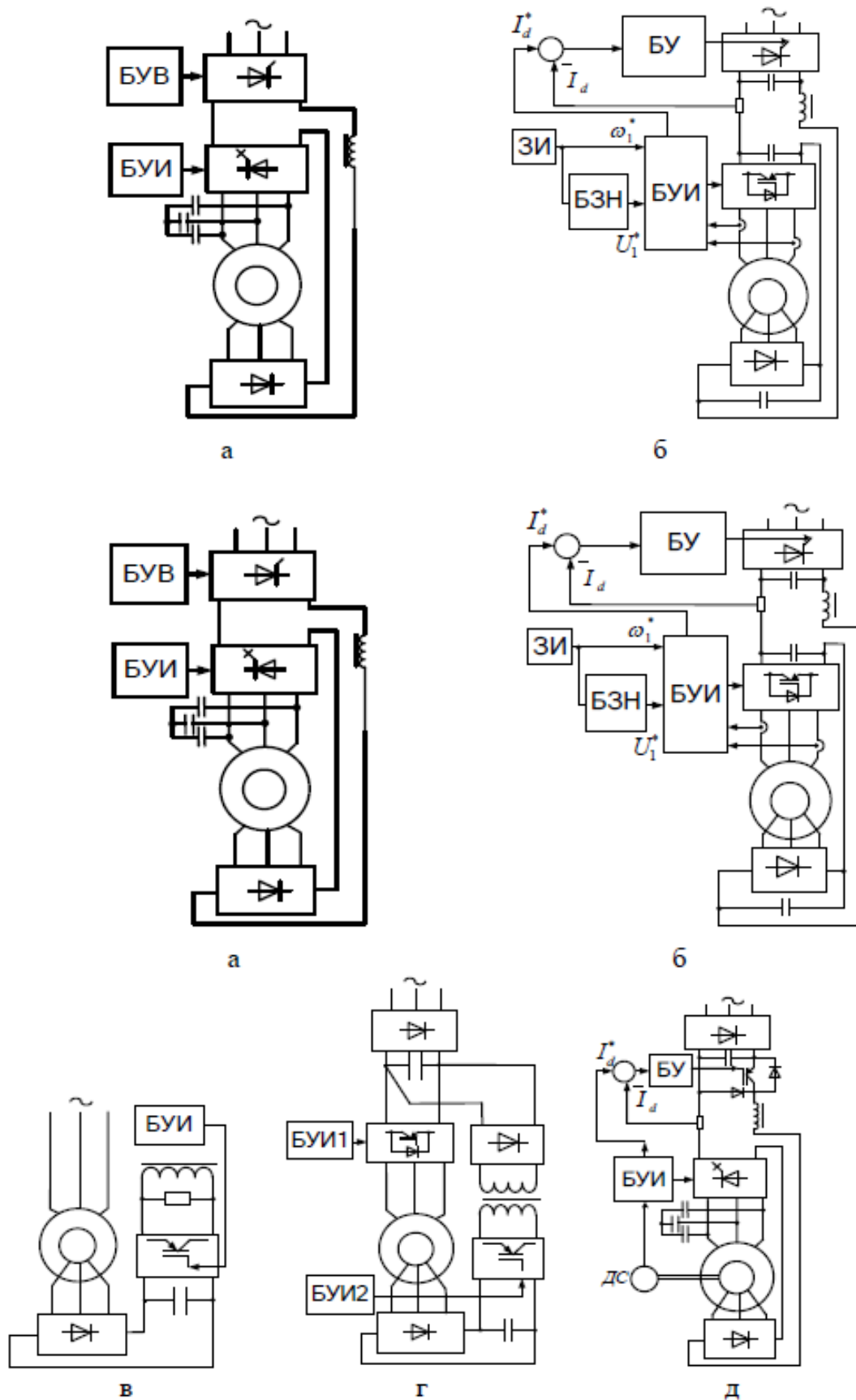


Рисунок 1.6 - функціональні схеми: а - ЧКЕ ПЗ АІТ; б - ЧКЕ ПЗ АІН;
 в - з ПЧ в ланцюзі ротора; г - ЧКЕ АІН з каскадним паралельним блоком;

д - ЧКЕ АІТ з додатковим комутатором

Схема ЧКЕ з послідовним з'єднанням через ланцюг постійного струму обмоток ротора і статора названа частотно-каскадним електроприводом з послідовним збудженням (ЧКЕ ПЗ), а системи АВК, що мають таку ж схему з'єднання статора і ротора, називаються АВК з послідовним збудженням (АВК ПЗ). Функціональна схема ЧКІ ПЗ на базі АІТ з GTO-тиристорів з нерегульованим випрямлячем та транзисторним комутатором в ланці постійного струму, приведена на рисунку 1.6, д. Послідовне з'єднання через ланцюг постійного струму обмоток ротора і статора дозволяє використовувати тільки АДФР, у яких номінальні струми ротора і статора відрізняються не більше ніж на 10%. Ця ж особливість характерна і для ЧКІ ПЗ з релейним регулятором напруги (РРН). Застосування АІТ з РРН для формування напруги на виході інвертора з мінімальним рівнем гармонік вимагає використання ключових елементів інвертора з частотою комутації більше 7,5 кГц. Такі інвертори вже випускаються, наприклад фірмою "Сіменс», але вони досить дорогі.

Тому в даній роботі розробляються та досліджуються системи управління асинхронними електроприводами, виконані на базі широко застосованих ключових елементів зі стандартною частотою комутації до 2,5 кГц.

Система ЧКЕ, що працює при постійній частоті напруги на виході інвертора, є найбільш дослідженою, вона названа асинхронним вентиляним каскадом з послідовним збудженням (АВК ПЗ). Іншим недоліком системи ЧКЕ ПЗ на базі АІТ (рисунок 1.6, а) є використання регульованого живильного випрямляча, що призводить до зниження коефіцієнта потужності електроприводу.

В системі ЧКЕ ПЗ АІН (рисунок 1.6, б), для забезпечення необхідних умов роботи інвертора напруги потрібна підвищена ємність фільтруючих конденсаторів в ланці постійного струму.

Відомий ще один варіант побудови системи електроприводу на базі АДФР

з введеною в ланцюг ротора ЕРС самоіндукції інвертора, наведений на рисунку 1.6, в. У цьому електроприводі за допомогою інвертора здійснюється обмін енергією між конденсатором в ланці постійного струму та індуктивністю реактора, підключеного до виходу інвертора. У ланцюг ротора двигуна вводиться противо-ЕРС, що визначається ЕРС самоіндукції реактора

$$E = -L \frac{dI}{dt}. \quad (1.2)$$

В ланцюг ротора двигуна вводиться додаткова ЕРС, яка регулюється шляхом зміни частоти комутації ключів інвертора. Резистор необхідний для обмеження величини напруги в ланці постійного струму і часткового гасіння енергії в коливальному контурі.

При побудові систем ЧКЕ, енергію ковзання більш раціонально передавати в ланку постійного струму, використовуючи зустрічно-паралельне включення силового каскадного блоку по відношенню до основної силової частини електроприводу. Схема ЧКЕ на базі АІН (рисунок 1.6, г) з каскадним блоком, що реалізує вентиляно-трансформаторний зв'язок ланцюгів статора і ротора, є розвитком та вдосконаленням схеми (рисунок 1.6, в). У схемі ЧКЕ (рисунок 1.6, г) за допомогою каскадного блоку, що реалізує вентиляно-трансформаторний зв'язок ланцюгів статора і ротора, енергія ковзання використовується корисно та передається в ланцюг постійного струму ПЧ, до виходу якого підключена обмотка статора двигуна. У даній схемі ЧКЕ немає обмежень на співвідношення струмів статора і ротора, тому можуть використовуватися будь-які типи АДФР.

Системи ЧКЕ при розімкнутій системі управління мають механічні характеристики близькі до “екскаваторних” сприятливі для використання на МПК, тому вони перспективні для продовження досліджень.

Виконаний аналіз проблем, що виникають при експлуатації електроприводів МПК, а також вивчення тенденцій розвитку систем асинхронного електроприводу показує, що застосування в теперішній час на

механізмах пересування кранів і транспортних візках системи контакторно-резисторного управління АДФР не задовольняють вимогам до енергоефективності, тому що перетворюють енергію ковзання в теплову енергію. Крім того, при ступінчастому контакторному управлінні недостатній для МПК діапазон регулювання швидкості. Тому роботу по вдосконаленню систем електроприводу на базі асинхронного двигуна з фазним ротором не можна вважати закінченою. Представляє практичний інтерес розробка та дослідження нових систем однодвигунного та двох рухового електроприводу на базі АДФР з частотним і частотно-каскадним управлінням.

При розробці сучасних систем асинхронного електроприводу з системами частотного управління широко використовуються методи математичного моделювання з використанням сучасних програмних продуктів.

В теперішній час при аналізі динамічних, енергетичних та інших електромагнітних і електромеханічних процесів в складних системах частотного асинхронного електроприводу розробляються імітаційні комп'ютерні моделі з використанням програмного продукту MATLAB з розширенням Simulink. Методики та приклади побудови таких комп'ютерних моделей, моделювання динамічних процесів в системах електроприводу викладені в літературних джерелах.

Таким чином, на підставі виконаного огляду сучасних технічних рішень в області частотного асинхронного електроприводу, можна зробити висновок, що актуальним є розробки простих та надійних систем асинхронного електроприводу на базі АДКЗ і АДФР із забезпеченням поліпшених енергетичних та динамічних показників за рахунок використання систем корекції, адаптованих до умов експлуатації механізмів пересування кранів та транспортних візків.

ВИСНОВКИ

1. Застосовування на МПК та транспортних візках системи однодвигунного і двох рухового асинхронного електроприводу вимагають вдосконалення в

напрямку поліпшення їх енергетичних показників і динамічних властивостей.

2. Для електромеханічних систем МПК характерним є наявність пружних зв'язків, що вимагає підвищення демпфуючої здатності систем асинхронного електроприводу.

3. Використання сучасної елементної бази силової перетворювальної техніки дозволяє розробляти системи асинхронного електроприводу з поліпшеними показниками щодо працездатності енергоефективності та динамічних властивостей.

4. Необхідно дослідити можливість підвищення демпфуючої здатності дводвигунних електроприводів за рахунок застосування коригувальних засобів, дія яких спрямована на синхронізації швидкостей двигунів.

РОЗДІЛ 2

ЗНИЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ МЕХАНІЗМІВ ПЕРЕСУВАННЯ МОСТОВИХ КРАНІВ

2.1. Дослідження динамічних властивостей двомасової пружної електромеханічної системи з однодвигунним електроприводом

На транспортних тягнучих візках, керованих однодвигунним електроприводом, використовується канатний зв'язок між двигуном і барабаном, на який намотується канат. Однодвигунна ЕМС такого механізму містить в кінематичному ланцюзі явно виражений пружний елемент з кінцевою жорсткістю. Пружними елементами можуть рахуватись довгі вали, що з'єднують двигун з редуктором або редуктор з виконавчим органом механізму. Наприклад, на деяких механізмах пересування візка крана, керованих однодвигунним електроприводом, довжина вала досягає 1 м. На підйомно-поворотних столах металургійного прокатного виробництва довжина валу, що з'єднує двигун з механізмом, перевищує 2 м. Електромеханічні системи (ЕМС) таких механізмів можуть бути представлені однодвигунною двомасовою розрахунковою схемою. На таких механізмах наявність пружних коливань призводить до підвищеного зносу редукторів та інших елементів кінематичного ланцюга. Тому доцільно розглянути можливість зниження динамічних навантажень в ЕМС за рахунок підвищення демпфуючої здатності однодвигунного електроприводу.

Аналіз динамічних процесів в ЕМС доцільно вести за допомогою розрахункової схеми, що є основою для математичної моделі, при побудові якої можна зробити наступні допущення:

- вага громіздких тіл, прийнята за абсолютно жорсткі, зосереджена в їх центрах тяжіння;
- до зосередженої ваги прикладаються сили, що діють в системі;

- в пружних елементах деформація вважається лінійною і аналіз процесів проводиться відповідно до закону Гука;

Введення даних припущень спрощує математичну модель ЕМС при збереженні базових динамічних характеристик і показників, таких як, амплітуда і частота пружних коливань, що визначаються елементами з найбільшими масами і найменшими жорсткостями.

Розглянемо динамічні процеси в пружній двомасовій ЕМС, керованій однодвигунним електроприводом, при наявності зворотного зв'язку по різниці швидкостей першої наведеної маси, жорстко пов'язаної з двигуном до другої наведеної маси.

Рівняння, що описують двомасову ЕМС з однодвигунним електроприводом з лінійними механічними характеристиками, мають наступний вигляд:

$$M_1 - M_{c1} - M_{12} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \quad (2.1)$$

$$M_2 - M_{c2} + M_{12} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}; \quad (2.2)$$

$$\frac{dM_{12}}{dt} = c_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2) + b_{12} \cdot \frac{d(\omega_1 - \omega_2)}{dt}, \quad (2.3)$$

де M_1 - момент двигуна; M_{12} - пружний момент; c_{12} - наведена жорсткість пружного елемента; b_{12} - коефіцієнт, враховуючий дію дисипативних сил внутрішнього в'язкого тертя в матеріалі пружного елемента; J_1, J_2 - моменти інерції мас, приведені до валу двигуна; ω_1, ω_2 - кутові швидкості наведених мас.

Рівняння записані в операторній формі, мають наступний вигляд:

$$M_1(p) - M_{c1}(p) - M_{12}(p) = J_1 p \omega_1(p); \quad (2.4)$$

$$M_{12}(p) - M_{c2}(p) = J_2 p \omega_2(p); \quad (2.5)$$

$$M_{12}(p) = \frac{c_{12}}{p} \cdot [\omega_1(p) - \omega_2(p)] + b_{12}. \quad (2.6)$$

Двигун можна описати передавальною функцією без інерційної ланки, коефіцієнт якої дорівнює жорсткості статичної механічної характеристики

$$W_{\delta}(p) = \frac{M_1(p)}{[\omega_{01}(p) - \omega_1(p)]} = \beta. \quad (2.7)$$

Розрахункова схема пружною двомасовою однодвигунною ЕМС представлена на рисунку 2.1.

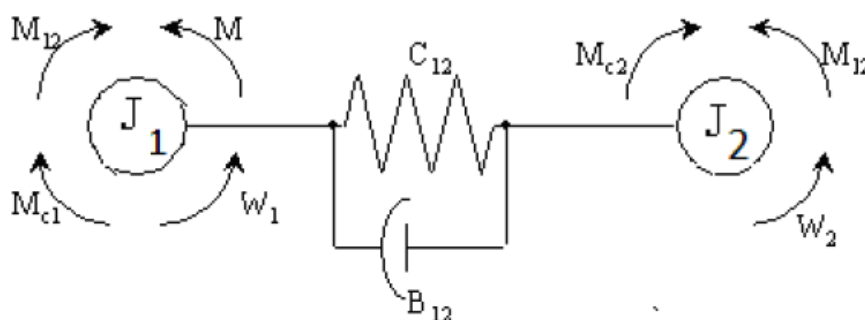


Рисунок 2.1 - Розрахункова схема однодвигунною пружною 2-х масовою системи

Структурна схема двомасовою однодвигунною системи, що побудована згідно з розрахунковою схемою та рівняннями (2.4) - (2.7), наведена на рисунку 2.2, а. З її допомогою визначимо передатну функцію між вхідною $\omega_0(p)$ та вихідною $M_{12}(p)$ змінними, використовуючи формулу Мейсона для недоторканих контурів, наведено в Додатку Б. В таблиці 1.1 наведені розраховані допоміжні вирази для блоків структурної схеми (рисунку 2.2, а).

$$W(p) = \frac{M_{12}(p)}{\omega_0(p)} = \frac{\beta \cdot p \cdot J_2}{\frac{J_1 J_2}{c_{12}} p^3 + [(\beta + b_{12}) J_2 + b_{12} J_1] \frac{1}{c_{12}} p^2 + (J_1 + J_2 + \frac{b_{12}}{c_{12}} \beta) p + \beta}. \quad (2.8)$$

Таблиця 2.1

Блоки структурної схеми (рисунку 2.2, а) за відсутності систем корекції

Блоки	Вирази
Прямий шлях	$W_{i=1}(p) = \beta \frac{1}{J_1 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12})$

Контури	$-\beta \frac{1}{J_1 p}; -\frac{1}{J_1 p} \left(\frac{c_{12}}{p} + b_{12} \right); -\frac{1}{J_2 p} \left(\frac{c_{12}}{p} + b_{12} \right)$
Добуток передач пари контурів, що не торкаються один одного	$\beta \frac{1}{J_1 p} \cdot \frac{1}{J_2 p} \left(\frac{c_{12}}{p} + b_{12} \right)$

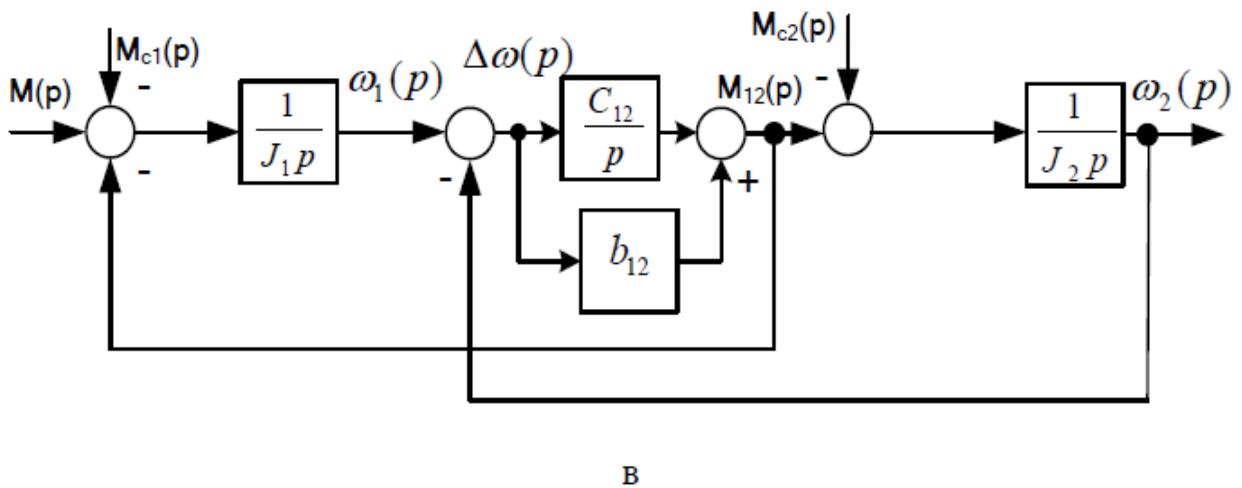
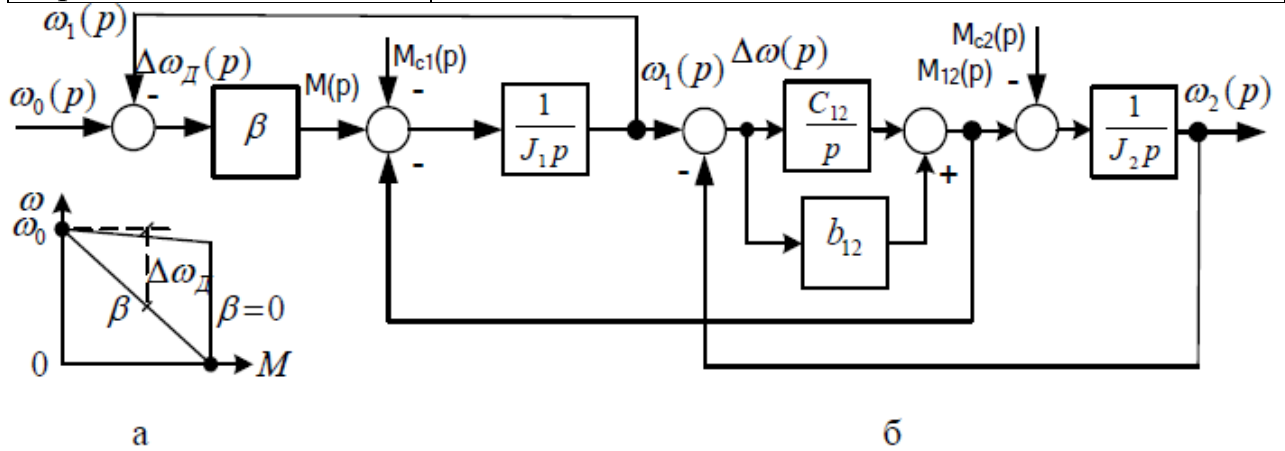


Рисунок 2.2 - Двомасова однодвигунна система: а - можливі механічні характеристики двигуна; б - структурна схема для аналізу роботи двигуна з лінійною похилою механічною статичною характеристикою ($\beta \neq 0$); в - структурна схема для аналізу роботи двигуна при постійному пусковому моменті ($\beta = 0$)

Характеристичне рівняння, яке визначається шляхом прирівнювання до нуля характеристичного многочлена виразу (2.8), має вигляд:

$$\frac{J_1 J_2}{c_{12}} p^3 + [(\beta + b_{12}) J_2 + b_{12} J_1] \frac{1}{c_{12}} p^2 + (J_1 + J_2 + \frac{b_{12}}{c_{12}} \beta) p + \beta = 0. \quad (2.9)$$

Розглянемо режим пуску однодвигунного електроприводу по абсолютно

м'яким характеристикам $\beta = 0$. В цьому випадку момент двигуна не залежить від швидкості і структурна схема ЕМС має вигляд (рисунок 2.2, б).

Приймаємо в якості вхідного сигналу - $M(p)$, а в якості вихідного - $M_{12}(p)$, при цьому передавальна функція має вигляд:

$$W(p) = \frac{M_{12}(p)}{M(p)} = \frac{J_2(1 + \frac{b_{12}}{c_{12}}p)}{\frac{J_1 J_2}{c_{12}}p^2 + (J_1 + J_2)\frac{b_{12}}{c_{12}}p + J_1 + J_2}. \quad (2.10)$$

Характеристичне рівняння системи має вигляд

$$\frac{J_1 J_2}{c_{12}(J_1 + J_2)}p^2 + b_{12}p + 1 = 0. \quad (2.11)$$

Рівняння (2.11) відповідає рівнянню коливальної ланки другого порядку з затухаючими коливаннями:

$$T^2 p^2 + 2\xi T p + 1 = 0, \quad (2.12)$$

де T - постійна часу коливальної ланки; ξ - коефіцієнт, що характеризує загасання коливань в ланці другого порядку, що має значення $0 < \xi < 1$.

Залежності, що зв'язують параметри рівнянь (2.11) і (2.12), мають вигляд:

$$T = \sqrt{\frac{J_1 \cdot J_2}{c_{12}(J_1 + J_2)}} = \frac{1}{\Omega_{12}}; \quad (2.13)$$

$$\xi = \frac{1}{2} b_{12} \sqrt{\frac{c_{12} \cdot (J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}}. \quad (2.14)$$

Коефіцієнт загасання коливань прямо пропорційний коефіцієнту b_{12} . Якщо прийняти $b_{12} = 0$ і не враховувати дію в пружній зв'язку дисипативних сил, то рівняння (2.11) буде відповідати рівнянню (2.12) коливального консервативного ланки

$$\frac{J_1 J_2}{c_{12}}p^2 + J_1 + J_2 = 0. \quad (2.15)$$

Частота коливань у двомасовій пружній ЕМС, яка з достатнім ступенем точності характеризує кранові механізми та інші механізми

загальнопромислового призначення, визначається за формулою:

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{c_{12}(J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}} \quad (2.16)$$

Розглянемо математичну модель двомасової пружної однодвигунної ЕМС та її динамічні властивості, з урахуванням введення в систему коригуючого пристрою, виконаного на основі негативного зворотного зв'язку (ЗЗ $\Delta\omega$) по різниці швидкостей наведених мас двигуна, що є першою масою та механізму, що є другою масою. Ці наведені маси двомасової системи пов'язані пружним елементом (рисунок 2.3, а). Будемо розглядати ЕМС, в якій обидві наведені маси забезпечені датчиками кутової швидкості.

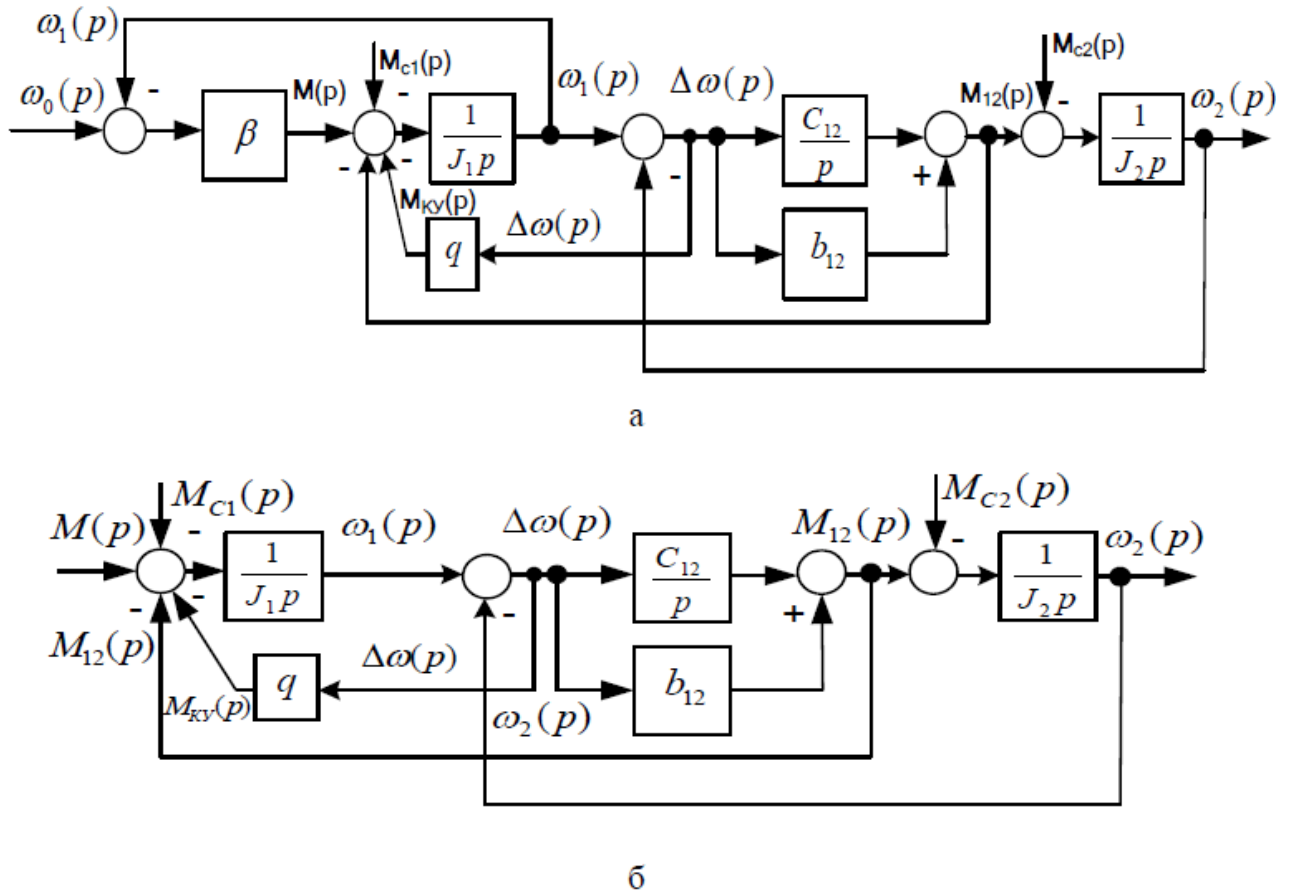


Рисунок 2.3 - Структурна схема однодвигунної пружної двомасової системи ЗЗ $\Delta\omega$: а - для аналізу роботи двигуна з лінійною похилою механічною статичною характеристикою ($\beta \neq 0$); б - для аналізу роботи двигуна при постійному пусковому моменті ($\beta = 0$)

Таблиця 2.2

Елементи структурної схеми при наявності системи корекції

Блоки	Вирази
Прямий шлях	$W_{i=1}(p) = \beta \frac{1}{J_1 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12})$
Контури	$-\beta \frac{1}{J_1 p}; -q \frac{1}{J_1 p}; -\frac{1}{J_1 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12}); -\frac{1}{J_2 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12})$
Добуток передач пари контурів, що не торкаються один одного	$\beta \frac{1}{J_1 p} \cdot \frac{1}{J_2 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12})$

Визначимо з використанням формули Мейсона (Додаток Б) передавальну функцію з управління структурної схеми (рисунок 2.3, а) при вхідному сигналі $\omega_0(p)$ та вихідному - $M_{12}(p)$.

$$W(p) = \frac{\beta p (1 + \frac{b_{12}}{c_{12}} p) J_2}{\frac{J_1 J_2}{c_{12}} p^3 + \left[(\beta + b_{12} \frac{1}{c_{12}} + q) J_2 + b_{12} J_1 \right] \frac{1}{c_{12}} p^2 + (J_1 + J_2 + \frac{b_{12}}{c_{12}} \beta) p + \beta} = \frac{M_{12}(p)}{\omega_0(p)}. \quad (2.18)$$

Прирівнявши до нуля знаменник виразу (2.18), отримаємо характеристичне рівняння:

$$\frac{J_1 J_2}{c_{12}} p^3 + \left[(\beta + b_{12} + q) J_2 + b_{12} J_1 \right] \frac{1}{c_{12}} p^2 + (J_1 + J_2 + \frac{b_{12}}{c_{12}} \beta) p + \beta = 0. \quad (2.19)$$

Отримане характеристичне рівняння третього порядку можна привести до загального вигляду:

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0. \quad (2.20)$$

Відповідно до критерію стійкості Гурвіца для забезпечення стійкості системи третього порядку, що має рівняння (2.20), повинні виконуватися умови:

$$\begin{cases} a_0 a_1, a_2, a_3 > 0 \\ a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0 \end{cases}. \quad (2.21)$$

Розглядаючи спільно рівняння (2.9) і (2.19), з урахуванням умови (2.21), можна відзначити, що в разі лінійної механічної характеристики двигуна,

введення зворотного негативного зв'язку за різницею швидкостей обох мас двомасової системи (33 $\Delta\omega$):

- 1) не змінює порядок характеристичного рівняння системи;
- 2) супроводжується збільшенням коефіцієнта тільки при p^2 характеристичного рівняння, не призводить до зміни інших коефіцієнтів та вільного члена.
- 3) відповідно до виразів (2.20) і (2.21), зміна коефіцієнта при p^2 призводить до підвищення стійкості пружної двомасової однодвигунної системи.

Розглянемо випадок пуску двигуна за абсолютно "м'якою" характеристикою $\beta = 0$ (рисунок 2.4).

Характеристичне рівняння скоригованої системи, визначене шляхом перетворення структурної схеми та використання формули Мейсона (Додаток Б), має наступний вигляд:

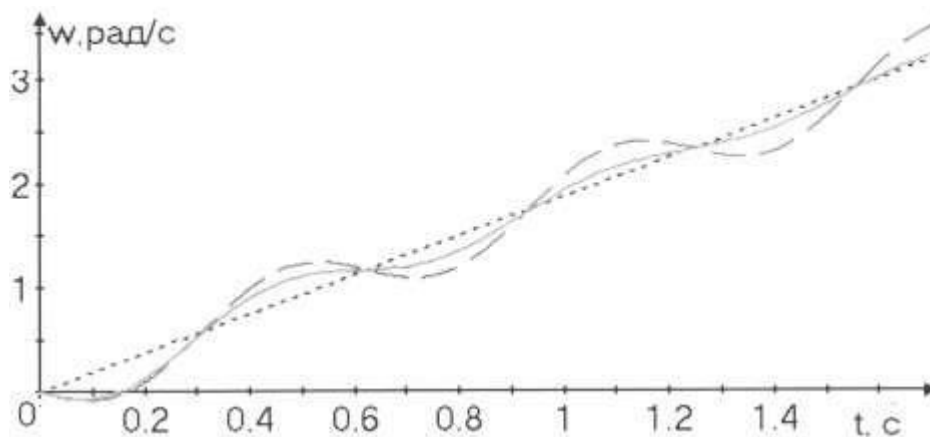
$$J_1 J_2 p^2 + \left(\frac{qJ_2}{J_2 + J_1} + b_{12} \right) (J_2 + J_1) p + c_{12} (J_1 + J_2) = 0. \quad (2.22)$$

Коефіцієнт загасання коливань, визначається:

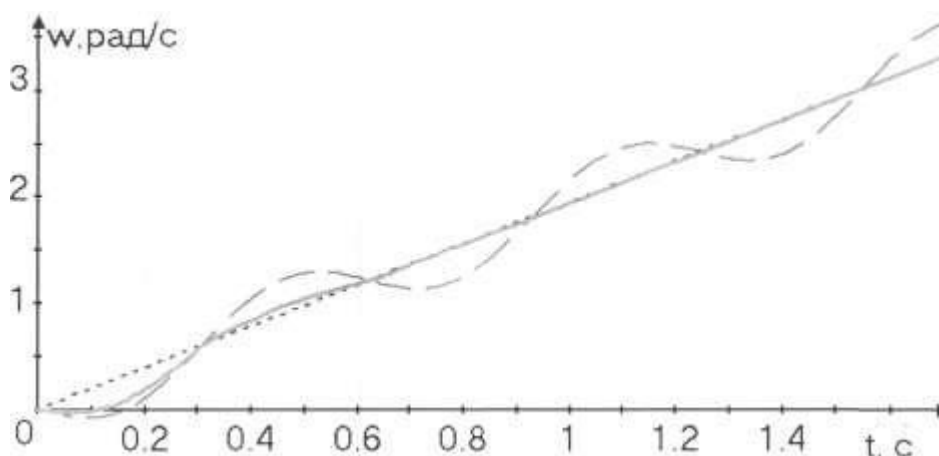
$$\xi = \frac{1}{2} \left(b_{12} + \frac{qJ_2}{J_2 + J_1} \right) \sqrt{\frac{c_{12} \cdot (J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}}. \quad (2.23)$$

Розглядаючи спільно рівняння (2.14) і (2.23) можна відзначити, що введення в однодвигунній пружній двомасовій системі негативного зворотного зв'язку по різниці кутових швидкостей наведених мас підвищує демпфуючу здатність електроприводу, коефіцієнт загасання коливань коефіцієнт зростає, що супроводжується підвищенням стійкості системи.

У Додатку В наведена комп'ютерна модель ЕМС, реалізована відповідно до структурної схеми (рисунок 2.2, б). Результати моделювання двомасової однодвигунної системи при її пуску електроприводом з абсолютно «м'якими» характеристиками наведені на рисунку 2.4.



а



б

Рисунок 2.4 - результати комп'ютерного моделювання процесів пуску двомасової однодвигунової системи при постійному пусковому моменті ($\beta = 0$): а - при відсутності $33 \Delta\omega$; б - при використанні $33 \Delta\omega$

На графіках (рисунок 2.4) пунктирною лінією показано зміну швидкості другої маси в часі при відсутності дії дисипативних сил ($b_{12} = 0$). На графіку (рисунок 2.4, а) суцільною лінією показано зміну швидкості другої маси в часі при дії дисипативних сил ($b_{12} \neq 0$). На графіку (рисунок 2.4, б) суцільною лінією показано зміну швидкості другої маси в часі при дії дисипативних сил ($b_{12} \neq 0$) та використанні $33 \Delta\omega$.

Отримані при моделюванні результати підтверджують справедливість виразу (2.23), при використанні $33 \Delta\omega$ коефіцієнтом коригуючої ланки $q=10$, коливання загасають в 2,5 рази швидше, тому що демпфуюча здатність електроприводу підвищується. У моделі в канал зворотного зв'язку, що реалізує

корекцію, введено додаткову ланку з малою зоною нечутливості, наявної у реальних датчиків швидкості при малому рівні сигналу.

Система корекції, виконана на основі визначення різниці швидкостей першої та другої мас, може бути реалізована в різних системах регульованого електроприводу при наявності датчиків швидкостей двигуна і основної інерційної маси, в тому числі і в частотному асинхронному електроприводі з векторним управлінням.

2.2 Математичний опис та основні властивості двомасової ЕМС з дводвигунним електроприводом

ЕМС механізмів пересування козлових та мостових кранів оснащуються дводвигунним, а в деяких випадках чотирьохдвигунним електроприводом. Вони являють собою нелінійні багатомасові системи з пружними зв'язками.

Якщо досліджуються процеси розгойдування вантажу, що супроводжують пересування моста крана, то при аналізі використовується 3-х масова розрахункова схема. При розгляді пружної деформації ферми моста в разі руху крана без вантажу, з вантажем малої маси, можна представляти ЕМС крана у вигляді двомасової дводвигунної розрахункової схеми, показаної на рисунку 2.5.

З урахуванням введених раніше припущень, приймаємо абсолютно жорсткі вали, що з'єднують двигуни з колесами, не враховуються зазори в редукторі.

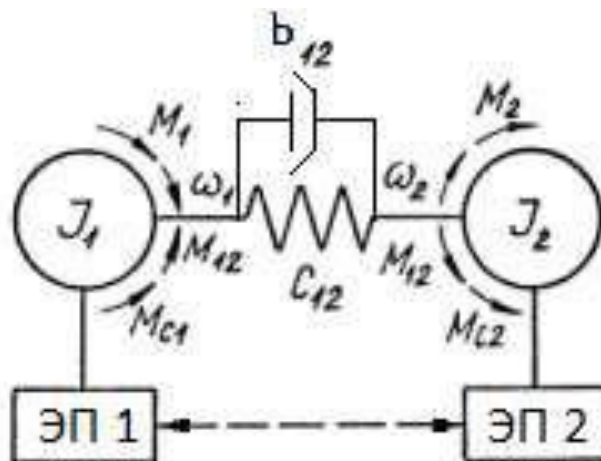


Рисунок 2.5 - Розрахункова схема двомасової дводвигунної системи

Відповідно до методики приведення поступально рухомих мас до валу двигуна, використовується коефіцієнт приведення:

$$K_R = \frac{R}{j}, \quad (2.24)$$

де R - радіус колеса; j - наведений коефіцієнт передачі всіх елементів кінематичного ланцюга.

При наявності в ЕМС поступально рухомих та обертових елементів формули приведення мають вигляд:

$$J_{\text{ПП}} = m \cdot K_R^2; \quad (2.25)$$

$$M = F \cdot K_R, \quad (2.26)$$

де m - маса елемента рухомого поступально; $J_{\text{ПП}}$ - приведений момент інерції еквівалентної обертання маси; M - наведений момент двигуна; F - сила, що діє на тіло, яка рухається поступально.

Для наведеної двомасової дводвигунної ЕМС (рисунок 2.5), рівняння, що описують її рух, мають вигляд:

$$M_1 - M_{c1} - M_{12} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \quad (2.27)$$

$$M_2 - M_{c2} + M_{12} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}; \quad (2.28)$$

$$\frac{dM_{12}}{dt} = c_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2) + b_{12} \cdot \frac{d(\omega_1 - \omega_2)}{dt}; \quad (2.29)$$

$$M_1 = f(\omega_1); \quad (2.30)$$

$$M_2 = f(\omega_2), \quad (2.31)$$

де M_1, M_2 - моменти двигунів; M_{12} - момент пружних зв'язків; c_{12} - жорсткість пружного зв'язку; b_{12} - коефіцієнт, що враховує дію дисипативних сил; J_1, J_2 - моменти інерції наведених обертових мас; ω_1, ω_2 - кутові швидкості.

Уявімо рівняння (2.27) - (2.29) в операторній формі

$$M_1(p) - M_{c1}(p) - M_{12}(p) = J_1 p \omega_1(p); \quad (2.32)$$

$$M_2(p) - M_{c2}(p) + M_{12}(p) = J_2 p \omega_2(p); \quad (2.33)$$

$$M_{12}(p) = \frac{c_{12}}{p} \cdot [\omega_1(p) - \omega_2(p)] + b_{12}. \quad (2.34)$$

Двигуни можна описати передавальними функціями, які в разі нехтування швидко протікаючими електромагнітними перехідними процесами в порівнянні з електромеханічними перехідними процесами в електроприводі, рівні жорсткості статичних механічних характеристик.

$$W_{\partial 1}(p) = \frac{M_1(p)}{[\omega_{01}(p) - \omega_1(p)]} = \beta_1; \quad (2.35)$$

$$W_{\partial 2}(p) = \frac{M_2(p)}{[\omega_{02}(p) - \omega_2(p)]} = \beta_2. \quad (2.36)$$

Прийmemo умову сталості жорсткості механічних характеристик ($\beta_1 = const; \beta_2 = const$), а також рівності швидкостей ідеального холостого ходу двигунів

$$\omega_0(p) = \omega_{01}(p) = \omega_{02}(p). \quad (2.37)$$

За умови (2.37) рівняння (2.30) і (2.31) приймають вигляд:

$$M_1(p) = [\omega_0(p) - \omega_1(p)] \cdot W_{\partial 1}(p) = [\omega_0(p) - \omega_1(p)] \cdot \beta_1; \quad (2.38)$$

$$M_2(p) = [\omega_0(p) - \omega_2(p)] \cdot W_{\partial 2}(p) = [\omega_0(p) - \omega_2(p)] \cdot \beta_2, \quad (2.39)$$

де $\omega_0(p)$ - операторне уявлення швидкості ідеального холостого ходу приводних двигунів.

Структурна схема пружної двомасової дводвигунної системи, побудована при прийнятих допущеннях, наведена на рисунку 2.6.

Для знаходження шуканих передавальних функцій в перетвореній системі зручно користуватися формулою Мейсона (Додаток Б), що застосовується для

складних багатоконтурних систем.

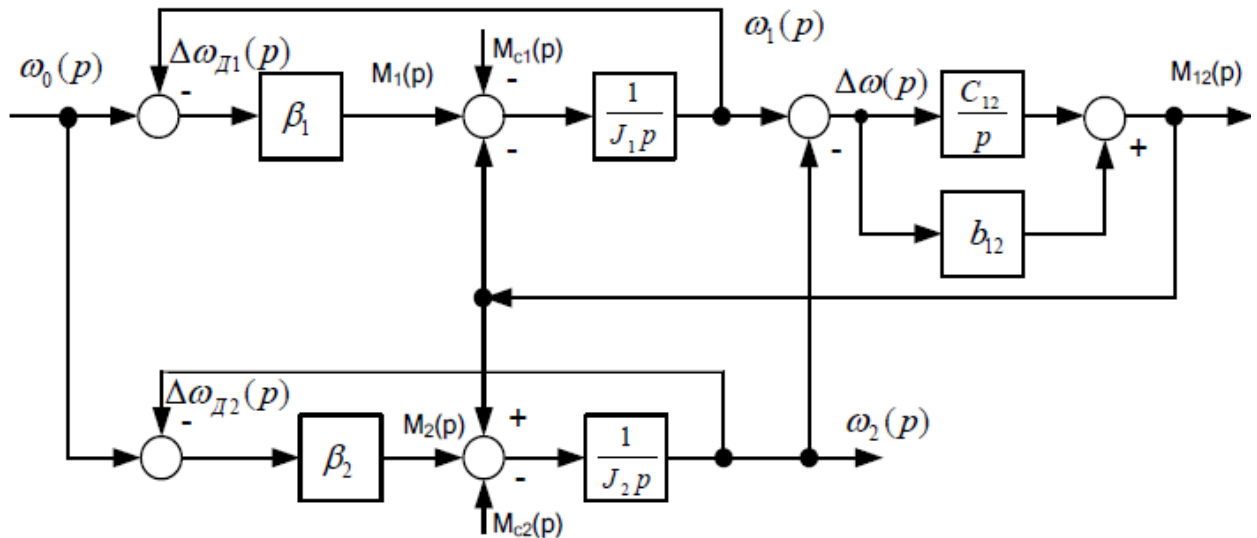


Рисунок 2.6 - Структурна схема двомасової дводвигунної системи

Якщо розглядати в якості вхідного сигналу $\omega_0(p)$, то використовуючи формулу Мейсона (Додаток Б), можна визначити блоки структурної схеми, наведені в таблиці 1.1 та вихідний сигнал $\omega_{12}(p)$.

Таблиця 2.3

Блоки структурної схеми (рисунок 2.6) при відсутності систем корекції

Блоки	Вирази
Прямий шлях	$W_{i=1}(p) = \beta_1 \frac{1}{J_1 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12}); W_{i=2}(p) = \beta_2 \frac{1}{J_2 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12})$
Контури	$-\beta_1 \frac{1}{J_1 p}; -\beta_2 \frac{1}{J_2 p}; -\frac{1}{J_1 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12}); -\frac{1}{J_2 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12})$
Пари контурів, що не торкаються один одного	$\beta_1 \frac{1}{J_1 p} \beta_2 \frac{1}{J_2 p}; \beta_1 \frac{1}{J_1 p} \frac{1}{J_2 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12}); \beta_2 \frac{1}{J_1 p} \frac{1}{J_2 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12})$
Контур, що не торкається прямого шляху $W_1(p)$	$-\beta_2 \frac{1}{J_2 p}$
Контур, що не торкається прямого шляху $W_2(p)$	$-\beta_1 \frac{1}{J_1 p}$

$$M_{12}(p) = \frac{\omega_0(p) \cdot [p \cdot (1 + p \cdot b_{12} / c_{12}) (\beta_1 J_2 - \beta_2 J_1)]}{\frac{J_1 J_2}{c_{12}} p^3 + \frac{J_1 \beta_2 + J_2 \beta_1 + b_{12} (J_1 + J_2)}{c_{12}} p^2 + (J_1 + J_2 + \frac{b_{12} (\beta_1 + \beta_2) + \beta_1 \beta_2}{c_{12}}) p + \beta_1 + \beta_2} \quad (2.40)$$

Характеристичне рівняння системи має третій порядок:

$$J_1 J_2 \frac{1}{c_{12}} p^3 + \frac{1}{c_{12}} [\beta_1 J_2 + \beta_2 J_1 + b_{12} (J_1 + J_2)] p^2 + \left\{ J_1 + J_2 + \frac{1}{c_{12}} [(\beta_1 + \beta_2) b_{12} + \beta_1 \beta_2] \right\} \cdot p + \beta_1 + \beta_2 = 0 \quad (2.41)$$

З виду характеристичного рівняння випливає, що двомасова ЕМС, керована двигунним електроприводом, є коливальною системою.

2.3. Корекція динамічних характеристик двомасової ЕМС з

дводвигунним електроприводом

Демпфуюча здатність замкнених систем регульованого електроприводу визначається "жорсткістю" статичної механічної характеристики та наявністю коригуючих зворотних зв'язків. Якщо в дводвигунному електроприводі можна встановити датчики швидкостей на валах обох двигунів, то можна ввести корекцію моменту двигунів, що забезпечує вироблення синхронізуючого моменту, що розганяє відстаючий двигун і гальмує випереджаючий двигун.

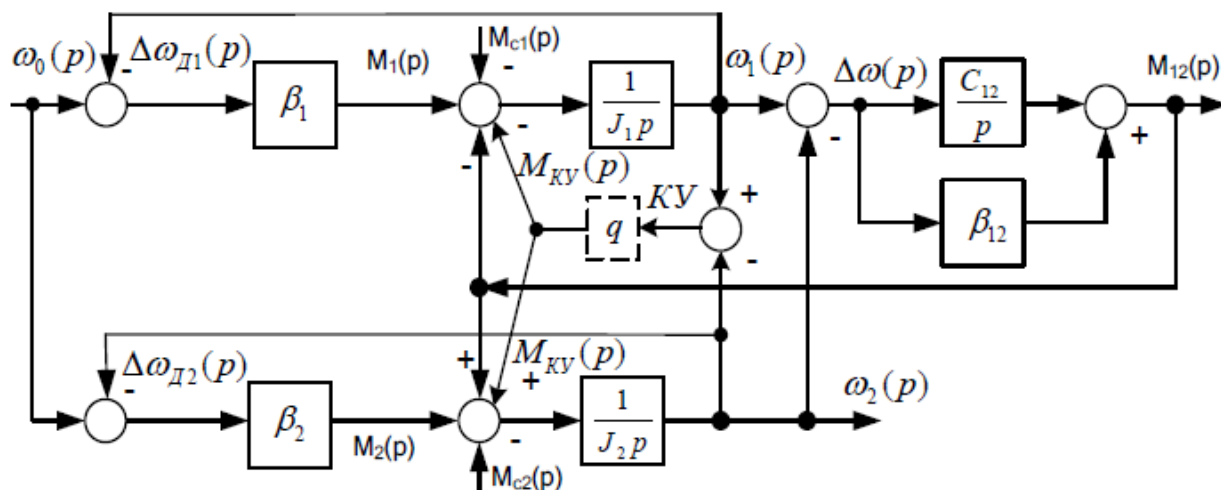
Розглянемо дію коригуючого пристрою, що виробляє синхронізуючий момент, який будемо вважати прямо пропорційним різниці кутових швидкостей двигунів

$$M_{KY}(p) = q(\omega_1(p) - \omega_2(p)), \quad (2.42)$$

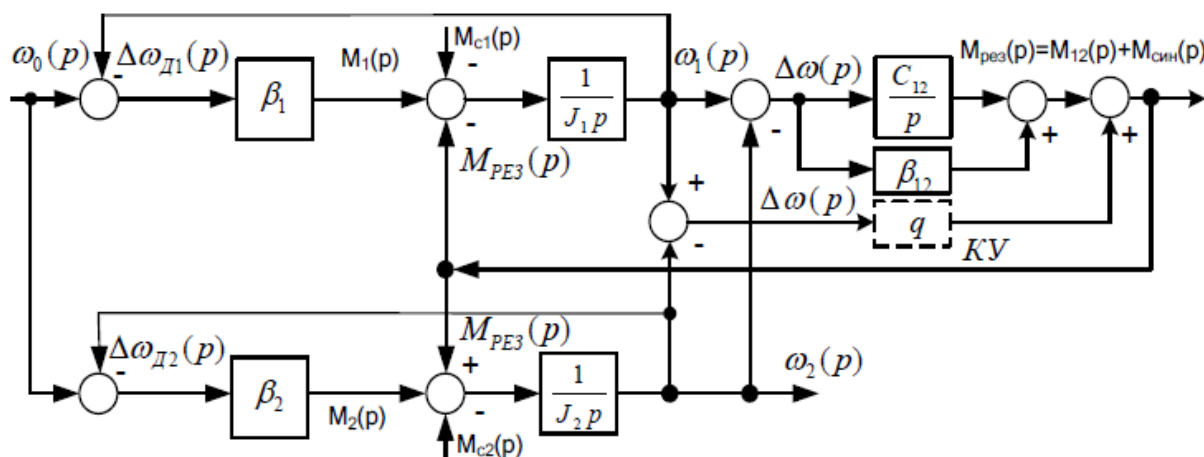
де q - коефіцієнт передачі пропорційно коригуючої ланки.

На рисунку 2.7 а, приведена структурна схема пружною двомасової дводвигунної системи зі зворотним негативним зв'язком (НЗ $\Delta\omega$) по різниці швидкостей двох двигунів, показаної у вигляді коригуючого пристрою КП. Знаки в каналі корекції на структурній схемі показані, виходячи з припущення, що двигун 2 обганяє двигун 1. Використовуючи правила структурних перетворень, наведемо вихідну схему спочатку до виду (рисунок 2.7, б), а потім до виду (рисунок 2.7, в). З виду отриманої структурної схеми (рисунок 2.7, в) випливає, що ланка q після перетворень виявляється включеним паралельно ланці b_{12} , тому є введення корекції на основі НЗ $\Delta\omega$, що

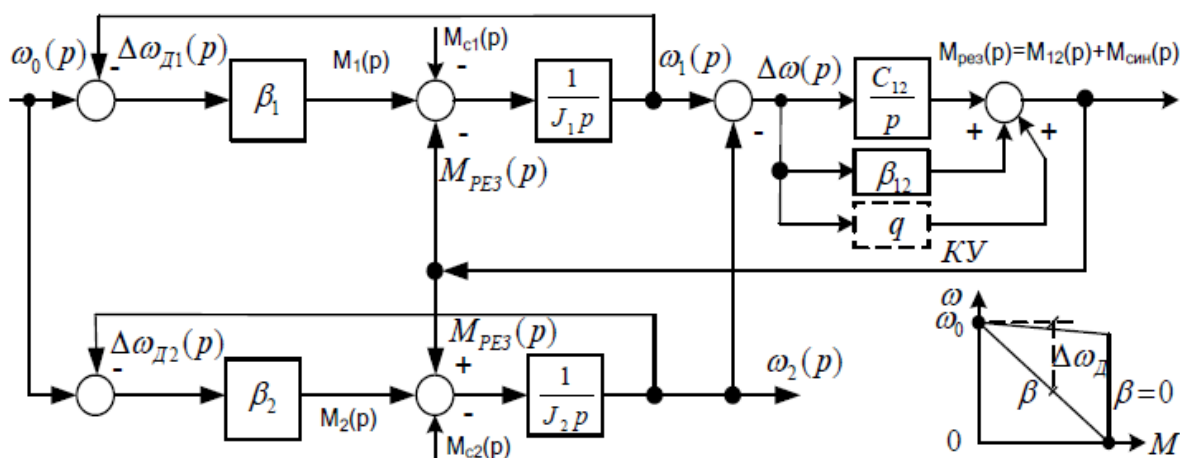
створює момент синхронізації, підсилює демпфуючий вплив на коливальний процес.



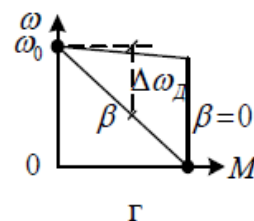
а



б



в



г

Рисунок 2.7 - ЕМС двомасова дводвигунна: а - структурна схема з НЗ $\Delta\omega$; б - структурна схема на стадії проміжних перетворень;

в - перетворена структурна схема; г - механічні характеристики двигунів

Це синхронізуючий вплив, аналогічно дії дисипативних сил в'язкого тертя в матеріалі пружного зв'язку.

Такий же результат був отриманий в результаті перетворення вихідної структурної схеми (рисунок 2.7, а) з використанням формули Мейсона (Додаток Б). Для шляхів та контурів вихідної схеми (рисунок 2.7, а) отримані формули, наведені в таблиці 2.4, використані для структурних перетворень.

Таблиця 2.4

Блоки структурної схеми (рисунок 2.7, а) при наявності систем корекції НЗ $\Delta\omega$

Блоки	Вирази
Прямий шлях	$W_{i=1}(p) = \beta_1 \frac{1}{J_1 p} \left(\frac{c_{12}}{p} + b_{12} \right); W_{i=2}(p) = \beta_2 \frac{1}{J_2 p} \left(\frac{c_{12}}{p} + b_{12} \right)$
Контури	$-(\beta_1 + q) \frac{1}{J_1 p}; -(\beta_2 + q) \frac{1}{J_2 p}; -\frac{1}{J_1 p} \left(\frac{c_{12}}{p} + b_{12} \right); -\frac{1}{J_2 p} \left(\frac{c_{12}}{p} + b_{12} \right)$
Передачі пар контурів, що не торкаються один одного	$+(\beta_1 + q) \frac{1}{J_1 p} \beta_2 \frac{1}{J_2 p}; +\beta_1 \frac{1}{J_1 p} (\beta_2 + q) \frac{1}{J_2 p};$ $(\beta_1 + q) \frac{1}{J_1 p} \frac{1}{J_2 p} \left(\frac{c_{12}}{p} + b_{12} \right); +(\beta_2 + q) \frac{1}{J_2 p} \frac{1}{J_1 p} \left(\frac{c_{12}}{p} + b_{12} \right)$
Контури, що не торкаються прямого шляху $W_{i=1}(p)$	$-\beta_1 \frac{1}{J_1 p}; -q \frac{1}{J_1 p}$
Контур, що не торкається прямого шляху $W_{i=2}(p)$	$-\beta_2 \frac{1}{J_2 p}; -q \frac{1}{J_2 p}$

В результаті виконаних досліджень визначено характеристичне рівняння системи в наступному вигляді:

$$\Delta(p) = J_1 J_2 \frac{1}{c_{12}} p^3 + \frac{1}{c_{12}} [\beta_1 J_2 + \beta_2 J_1 + (b_{12} + q)(J_1 + J_2)] p^2 +$$

$$+ \left\{ J_1 + J_2 + \frac{1}{c_{12}} [(\beta_1 + \beta_2)(b_{12} + q) + \beta_1 \beta_2] \right\} \cdot p + \beta_1 + \beta_2 = 0. \quad (2.43)$$

В рівнянні (2.43) параметри b_{12} та q підсумовуються, такий же результат впливає і зі схеми (рисунок 2.7, в). Вид рівняння (2.43) при допущенні $q = 0$ відповідає виду рівняння (2.41).

В системі дводвигунного електроприводу на базі АДФР напруга на виходах обмоток роторів визначаються величинами ЕРС роторів двигунів, пропорційних відхиленню кутових швидкостей обертання роторів від кутових швидкостей обертання полів статорів. Якщо частота напруги статорів двигунів однакова, то однакові швидкості обертання поля статора, рівні швидкостям ідеального холостого ходу. Тому в дводвигунному електроприводі на базі АДФР можна застосовувати більш простий реалізований негативний зворотний зв'язок по різниці відхилень швидкостей двигунів від швидкості ідеального холостого ходу (НЗ $\Delta\omega_\gamma$).

Введемо в структурну схему пружної двомасової системи з дводвигунним електроприводом додатково коригуючу Ланку, маючи передавальну функцію $W(p) = \gamma$ (рисунок 2.8, а), що реалізує НЗ $\Delta\omega_\gamma$ та дослідимо демпфуючу здатність скоригованого електроприводу. Знаки в каналі корекції на суматорах структурної схеми (рисунок 2.8, а) показані, виходячи з припущення, що перший двигун обганяє другий. Коригуючий момент визначається

$$\begin{aligned} M_{кв}(p) &= \gamma[\Delta\omega_{д1}(p) - \Delta\omega_{д2}(p)] = \gamma[(\omega_{01}(p) - \omega_1(p)) - (\omega_{02}(p) - \omega_2(p))] = \\ &= \gamma[\omega_2(p) - \omega_1(p)] = M_{син}(p) \end{aligned} \quad , \quad (2.44)$$

де γ - коефіцієнт передачі пропорційної коригуючої ланки. Використовуючи правила структурних перетворень, стосовно випадку перенесення вузлів через суматори, наведемо вихідну схему спочатку до виду (рисунок 2.8, б), а потім до виду (рисунок 2.8, в). В результаті дії НЗ $\Delta\omega_\gamma$ моменти обох двигунів змінюються, тому дія коригуючого пристрою еквівалентно появі синхронізуючого моменту, що збільшує момент відстаючи від другого двигуна та зменшує момент обганяючи перший двигун.

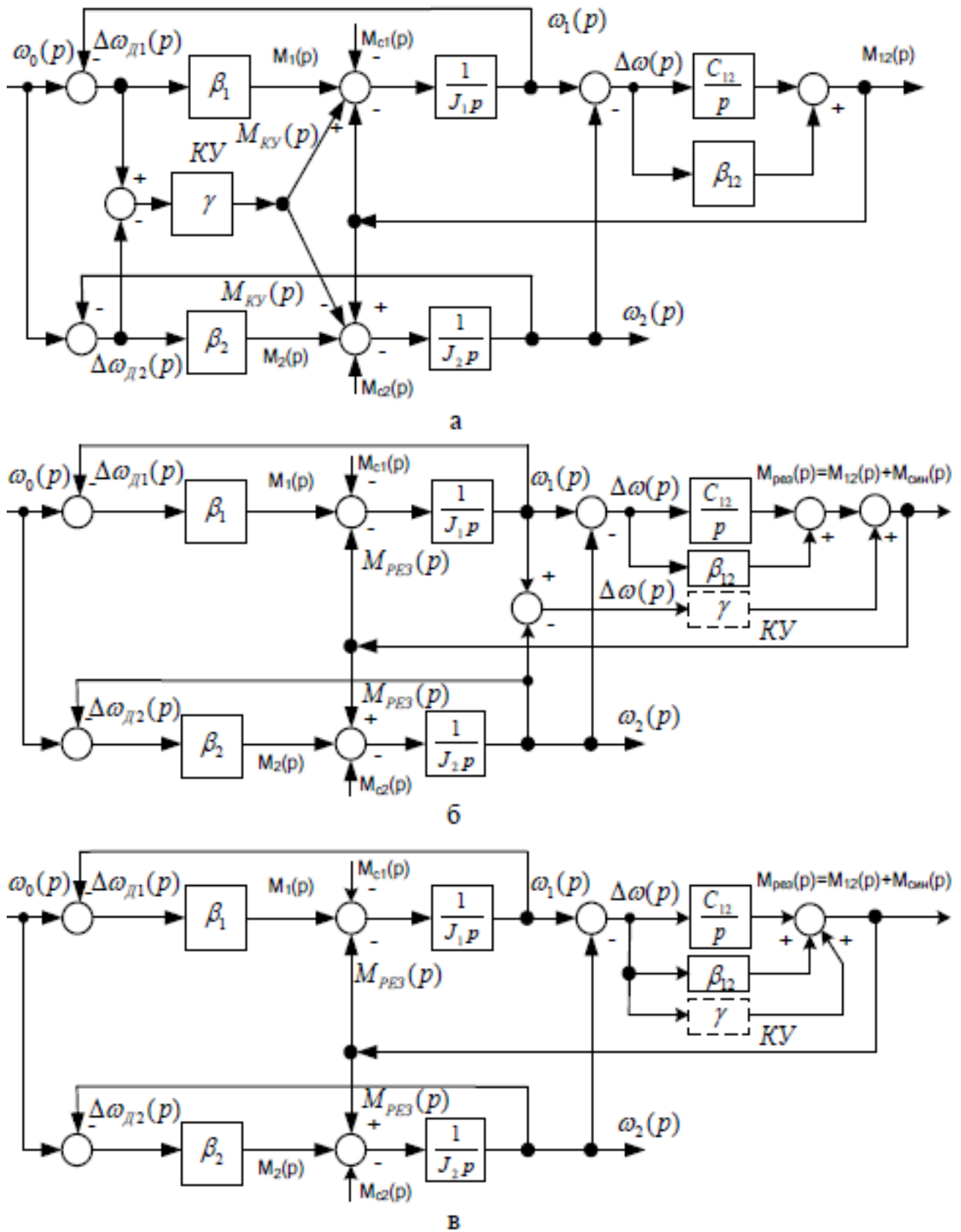


Рисунок 2.8 - ЕМС двомасова дводвигунна: а - структурна схема з НЗ $\Delta\omega_{\Omega}$;

б - структурна схема на стадії проміжних перетворень;

в - перетворена структурна схема

Передавальна функція між вихідною змінною структурної схеми $M_{12}(p)$ та вхідної змінної $\omega_0(p)$ (рисунок 2.8, а) за умови $M_{c1}(p) = 0$; $M_{c2}(p) = 0$, характеристичний многочлен та характеристичне рівняння системи визначаються з використанням теореми Мейсона (Додаток Б). Для шляхів та контурів вихідної схеми (рисунок 2.8, а) отримані формули, наведені в таблиці 2.5, використані для структурних перетворень.

Таблиця 2.5

Блоки структурної схеми (рисунок 2.8, а) при наявності систем корекції НЗ $\Delta\omega_y$

Блоки	Вирази
Прямий шлях	$W_{i=1}(p) = \beta_1 \frac{1}{J_1 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12}); W_{i=2}(p) = \beta_2 \frac{1}{J_2 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12});$ $W_{i=3}(p) = \gamma \frac{1}{J_1 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12}); W_{i=4}(p) = \gamma \frac{1}{J_2 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12})$
Контури	$-\beta_1 \frac{1}{J_1 p}; -\beta_2 \frac{1}{J_2 p}; -\gamma \frac{1}{J_1 p}; -\gamma \frac{1}{J_2 p}; -\frac{1}{J_1 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12});$ $-\frac{1}{J_2 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12}); \gamma \frac{1}{J_1 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12}); \gamma \frac{1}{J_2 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12}).$
Пари контурів, що не торкаються один одного	$+\beta_1 \frac{1}{J_1 p} (\beta_2 + \gamma) \frac{1}{J_2 p}; +(\beta_1 + \gamma) \frac{1}{J_1 p} \beta_2 \frac{1}{J_2 p};$ $+(\beta_1 + \gamma) \frac{1}{J_1 p} \frac{1}{J_2 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12}); +(\beta_2 + \gamma) \frac{1}{J_2 p} \frac{1}{J_1 p} (\frac{c_{12}}{p} + b_{12}).$
Контури, що не торкаються прямого шляху $W_1(p)$	$-\beta_1 \frac{1}{J_1 p}; -\gamma \frac{1}{J_1 p}.$
Контур, що не торкаються прямого шляху $W_2(p)$	$-\beta_2 \frac{1}{J_2 p}; -\gamma \frac{1}{J_2 p}.$

$$\left. \begin{aligned}
 M_{12}(p) &= \frac{p \cdot (1 + p \cdot b_{12} / c_{12}) (\beta_1 J_2 - \beta_2 J_1)}{\Delta(p)} \omega_0(p) \\
 \Delta(p) &= J_1 J_2 \frac{1}{c_{12}} p^3 + \frac{1}{c_{12}} [\beta_1 J_2 + \beta_2 J_1 + (b_{12} + \gamma)(J_1 + J_2)] p^2 + \\
 &+ \left\{ J_1 + J_2 + \frac{1}{c_{12}} [(\beta_1 + \beta_2)(b_{12} + \gamma) + \beta_1 \beta_2] \right\} \cdot p + \beta_1 + \beta_2
 \end{aligned} \right\} . \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned}
& J_1 J_2 \frac{1}{c_{12}} p^3 + \frac{1}{c_{12}} [\beta_1 J_2 + \beta_2 J_1 + (b_{12} + \gamma)(J_1 + J_2)] p^2 + \\
& + \left\{ J_1 + J_2 + \frac{1}{c_{12}} [(\beta_1 + \beta_2)(b_{12} + \gamma) + \beta_1 \beta_2] \right\} \cdot p + \beta_1 + \beta_2 = 0
\end{aligned}
\tag{2.46}$$

Розглядаючи спільно рівняння (2.40), (2.41), (2.43) та (2.45), (2.46) можна відзначити, що введення НЗ $\Delta\omega$ та НЗ $\Delta\omega_\gamma$:

- 1) не змінює порядок характеристичного рівняння системи;
- 2) супроводжується збільшенням коефіцієнтів при p^2 та p характеристичного рівняння, не призводить до зміни коефіцієнта при p^3 та вільного члена.
- 3) в характеристичних рівняннях систем з НЗ $\Delta\omega$ та НЗ $\Delta\omega_\gamma$ збільшення коефіцієнтів при p^2 та p призводить до підвищення стійкості пружної двомасової однодвигунної системи.
- 4) дія НЗ $\Delta\omega$ та НЗ $\Delta\omega_\gamma$ призводить до однакового результату - демпфуюча здатність дводвигунного електроприводу підвищується.

Якщо розглядати пуск двомасової системи за абсолютно м'яким характеристикам $\beta_1 = \beta_2 = 0$, то необхідно змінити структурну схему електроприводу та представити її у вигляді, показаної на рисунку 2.9.

Вхідним є сигнал $\omega_0(p)$, вихідним - сигнал $M_{12}(p)$. Отримаємо передавальну функцію з управління в наступному вигляді

$$W(p) = \frac{M_{12}(p)}{M(p)} = \frac{J_2 c_{12} (1 + \frac{b_{12}}{c_{12}} p)}{J_1 J_2 p^2 + b_{12} \cdot (J_1 + J_2) p + c_{12} (J_1 + J_2)}.
\tag{2.47}$$

Характеристичне рівняння системи має вигляд:

$$J_1 J_2 p^2 + b_{12} \cdot (J_1 + J_2) p + c_{12} (J_1 + J_2) = 0.
\tag{2.48}$$

Комплексні корені даного характеристичного рівняння мають негативну дійсну частину

$$p_{12} = \frac{-b_{12}(J_1 + J_2)}{2 \cdot J_1 \cdot J_2} \pm j \frac{\sqrt{[b_{12}(J_1 + J_2)]^2 - 4 \cdot J_1 \cdot J_2 \cdot (J_1 + J_2)c_{12}}}{2 \cdot J_1 \cdot J_2}. \quad (2.49)$$

З результатів досліджень динаміки мостових і козлових кранів відомо, що частота коливань прогону балки моста рухомого крана без вантажу становить $\Omega_{12} = 5 \dots 10 \text{ c}^{-1}$

З виразу (2.49) випливає, що пружні коливання в розглянутій двомасовій системі будуть загасаючими в результаті дії дисипативних сил внутрішнього в'язкого тертя в матеріалі пружного зв'язку.

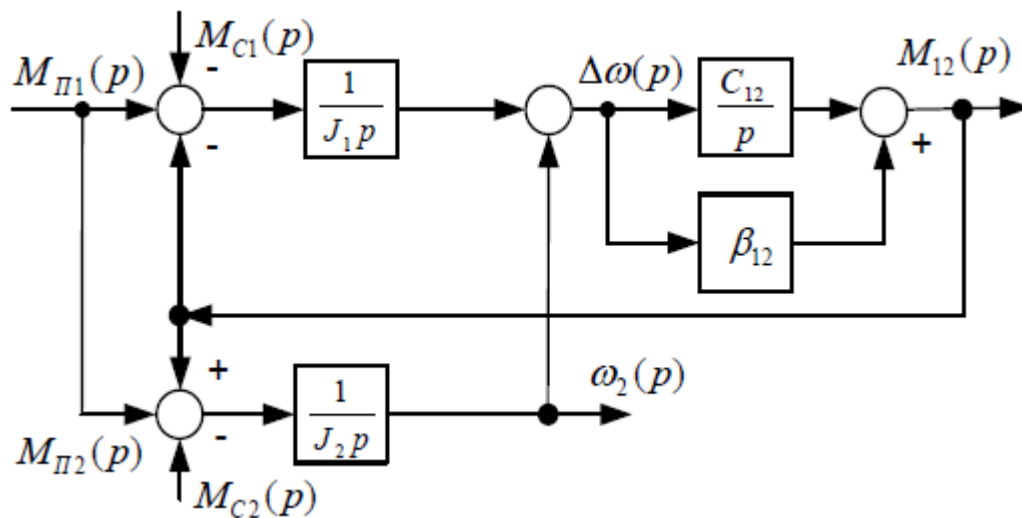


Рисунок 2.9 - Структурна схема двомасової дводвигунної ЕМС при пуску по абсолютно м'яким характеристикам без системи корекції

Щоб більш явно встановити вплив НЗ $\Delta\omega_\gamma$ на демпфуючу здатність електроприводу, розглянемо режим пуску двомасової дводвигунної ЕМС за абсолютно "м'якими" характеристиками $\beta_1 = \beta_2 = 0$, при цьому будемо враховувати наявність дисипативних сил та дію системи корекції. Структурна схема даної системи показана на рисунку 2.10. Якщо прийняти, що $\beta_1 = \beta_2 = 0$, то при наявності НЗ $\Delta\omega$ передавальна функція системи матиме вигляд:

$$W(p) = \frac{M_{12}(p)}{M(p)} = \frac{J_2 c_{12} (1 + \frac{b_{12}}{c_{12}} p)}{J_1 J_2 p^2 + (b_{12} + \gamma) \cdot (J_1 + J_2) p + c_{12} (J_1 + J_2)}. \quad (2.50)$$

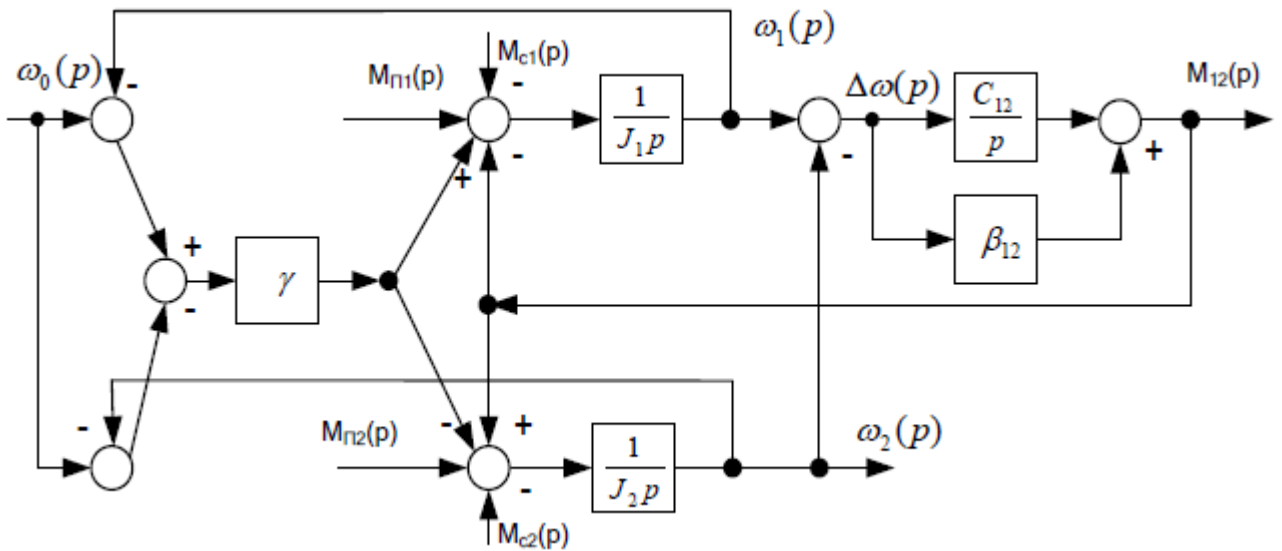


Рисунок 2.10 - Структурна схема двомасової дводвигунної системи з НЗ $\Delta\omega_\gamma$ при пуску по абсолютно "м'яким" механічним характеристикам

Характеристичне рівняння має вигляд

$$J_1 J_2 p^2 + (b_{12} + \gamma) \cdot (J_1 + J_2) p + c_{12} (J_1 + J_2) = 0. \quad (2.51)$$

Його можна представити у вигляді

$$\frac{J_1 J_2}{c_{12} (J_1 + J_2)} p^2 + \frac{b_{12} + \gamma}{c_{12}} p + 1 = 0. \quad (2.52)$$

Рівняння (2.52) можна розглядати як рівняння типової коливальної ланки другого порядку (2.20), в якому постійна часу T та коефіцієнт загасання визначаються виразами

$$T = \sqrt{\frac{J_1 \cdot J_2}{c_{12} (J_1 + J_2)}} = \frac{1}{\Omega_{12}}; \quad (2.53)$$

$$\xi = \frac{1}{2} (b_{12} + \gamma) \sqrt{\frac{J_1 + J_2}{c_{12} \cdot J_1 \cdot J_2}}. \quad (2.54)$$

З рівняння (2.54) випливає, що при прийнятих допущеннях коефіцієнт загасання ζ лінійно залежить від суми коефіцієнтів b_{12} та γ . При введенні ОС підвищується НЗ $\Delta\omega_\gamma$ коефіцієнт загасання коливань ζ підвищується.

Проведені дослідження показують, що використання коригувальних пристроїв, що реалізують НЗ $\Delta\omega$ та НЗ $\Delta\omega_\gamma$, забезпечує підвищену демпфуючу

здатність дводвигунного електроприводу, стійкість ЕМС підвищується. Залежно від особливостей електроприводу можливе застосування НЗ $\Delta\omega$ або НЗ $\Delta\omega_\gamma$, тому що такі системи корекції чинять дію, еквівалентну дії внутрішніх дисипативних сил у матеріалі пружного зв'язку.

На мостових та козлових кранах при тривалій експлуатації коліс можлива поява невеликих відхилень в їх діаметрах, що може позначатися на роботі крана в разі переміщення моста на відстані декількох десятків метрів. При обліку нерівності діаметрів провідних коліс в структурну схему входить ланка, що характеризує співвідношення їх діаметрів D_1 та D_2

$$i = D_1/D_2 . \quad (2.55)$$

У роботі показано, що незначні, менші 1%, відхилення в діаметрах ведучих коліс не позначаються на динамічних процесах в двомасових дводвигунних ЕМС, в тому числі і при наявності коригувальних зворотних зв'язків. Лінійне переміщення сторін моста крану $S_1(t)$ та $S_2(t)$ можна визначити за формулами

$$S_1(t) = \int_0^t \kappa \omega_1(t) dt ; \quad (2.56)$$

$$S_2(t) = \int_0^t \kappa \omega_2(t) dt = \int_0^t \kappa \cdot i \cdot \omega_1(t) dt , \quad (2.57)$$

де κ - радіус приведення лінійного переміщення крана до обертального руху вала двигуна.

З виразів(2.56) - (2.57) випливає, якщо мостовий кран має похибку в діаметрах ведучих коліс та переміщається на велику відстань, то синхронізація швидкостей двигунів призведе до збільшення перекосу моста. Тому при великих переміщеннях крана при наявності похибок в діаметрах ведучих коліс після закінчення процесу пуску систему корекції, дія якої спрямована на синхронізацію швидкостей двигунів, слід відключати.

2.4 Аналіз збурюючих впливів на двохмасову ЕМС з двохдвигунним електроприводом механізму пересування моста крана

Будемо розглядати одночасну дію сигналу управління - швидкості ідеального холостого ходу $\omega_0(p)$ та сигналів обурення - $M_{c1}(p)$ та $M_{c2}(p)$ на двохмасову двохдвигунну систему (рисунок 2.6) при умовах $\omega_0(p) = \omega_{01}(p) = \omega_{02}(p)$, $\beta_1 \neq \beta_2$. Вихідний сигнал - пружний момент $M_{12}(p)$ можна представити як суму реакцій системи на сигнали управління та збурення відповідно за виразом

$$M_{12}(p) = \omega_0(p) \cdot W_{\text{звб1}}(p) - M_{c1}(p) \cdot W_{\text{звб2}}(p) + M_{c2}(p) \cdot W_{\text{звб3}}(p). \quad (2.58)$$

Використовуючи формулу Мейсона для перетворення структурних схем (Додаток Б), визначимо для схеми двохмасової двохдвигунної системи (рисунок 2.6) рівняння зв'язку між сигналами: вихідним - пружним моментом двохмасової системи; вхідним керуючим $\omega_0(p)$ та збурюючими сигналами - статичними моментами. Якщо прийняти допущення $b_{12} = 0$, то вхідні у вираз (2.58) елементи, визначені з використанням структурної схеми (рисунок 2.6) та формули Мейсона (Додаток Б), мають такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} W_{\text{звб1}}(p) &= \frac{M_{12}(p)}{\omega_0(p)} = \frac{p(\beta_1 J_2 - \beta_2 J_1)}{\Delta(p)}; \\ W_{\text{звб2}}(p) &= \frac{M_{12}(p)}{M_{c1}(p)} = -\frac{\beta_2 + J_2 p}{\Delta(p)}; \\ W_{\text{звб3}}(p) &= \frac{M_{12}(p)}{M_{c2}(p)} = \frac{\beta_1 + J_1 p}{\Delta(p)}; \end{aligned} \right\} \quad (2.59)$$

$$\Delta(p) = \frac{J_1 J_2}{c_{12}} p^3 + \frac{J_1 \beta_2 + J_2 \beta_1}{c_{12}} p^2 + (J_1 + J_2 + \frac{1}{c_{12}} \beta_1 \beta_2) p + \beta_1 + \beta_2. \quad (2.60)$$

При умові $b_{12} = 0$, вираз (2.58) приймає вигляд:

$$M_{12}(p) = \frac{\omega_0(p) \cdot p \cdot (\beta_1 J_2 - \beta_2 J_1) - M_{c1}(p)(\beta_2 + J_2 p) + M_{c2}(p)(\beta_1 + J_1 p)}{\frac{J_1 J_2}{c_{12}} p^3 + \frac{J_1 \beta_2 + J_2 \beta_1}{c_{12}} p^2 + (J_1 + J_2 + \frac{1}{c_{12}} \beta_1 \beta_2) p + \beta_1 + \beta_2}. \quad (2.61)$$

При аналізі усталеного руху двохмасової двохдвигунної ЕМС в рівнянні (2.61) приймаємо ($p \rightarrow 0$), при цьому отримаємо

$$M_{12}^{уст} = \frac{-M_{c1} \beta_2 + M_{c2} \beta_1}{\beta_1 + \beta_2} = \frac{-M_{c1} (\beta_2 / \beta_1) + M_{c2}}{1 + \beta_2 / \beta_1}. \quad (2.62)$$

Отже, сталі значення пружного моменту визначається не тільки різницею наведених статичних моментів, але і залежить від жорсткості механічних характеристик двигунів.

На рисунку 2.11 представлені статичні механічні характеристики, що пояснюють роботу дводвигунного електроприводу в сталому режимі при різних співвідношеннях жорсткостей механічних характеристик і навантажень на валу двигунів.

Прийняті умови - однакових швидкостей ідеального холостого ходу $\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_1$, різних співвідношень жорсткостей механічних характеристик, а також нерівності статичних навантажень двигунів ($M_{c1} > M_{c2}$). Точками без штрихів А і В відзначені координати двигунів у разі їх незалежної роботи без пружного зв'язку. Точками зі штрихами А' і В' відзначені координати двигунів в разі їх роботи з пружним зв'язком. За рахунок дії пружного моменту в сталому режимі двигуни мають рівні кутові швидкості.

Розглянемо скориговану систему з використанням НЗ $\Delta\omega_\gamma$, зазнає керуючих та збурюючих впливів.

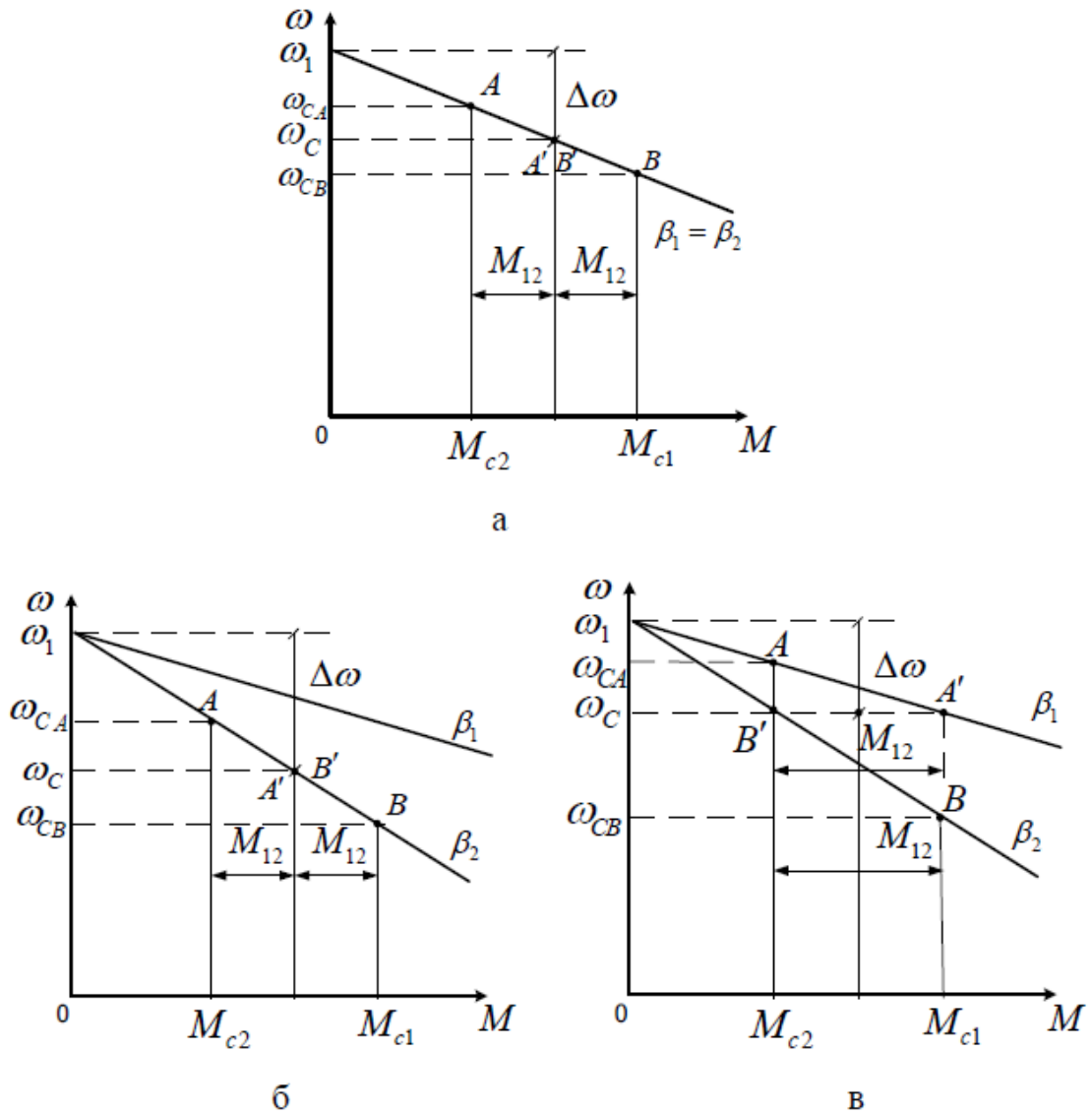


Рисунок 2.11- статичні механічні характеристики дводвигунного електроприводу: а - з однакою жорсткістю та різними навантаженнями; б - велике навантаження у двигуна з більш "жорсткою" механічною характеристикою; в - велике навантаження у двигуна з більш "м'якою" механічною характеристикою

За аналогією з рівняннями (2.52) при допущенні $b_{12} = 0$, для скоригованої системи входять у вираз (2.58) елементи, визначені для структурної схеми (рисунок 2.8, а) з використанням формули Мейсона (Додаток Б), мають наступний вигляд:

$$W_{\text{екв}}(p) = \frac{M_{12}(p)}{\omega_0(p)} = \frac{p(\beta_1 J_2 - \beta_2 J_1)}{\Delta(p)}; \quad (2.63)$$

$$W_{\text{звз2}}(p) = \frac{M_{12}(p)}{M_{c1}(p)} = -\frac{\beta_2 + J_2 p}{\Delta(p)}; \quad (2.64)$$

$$W_{\text{звз3}}(p) = \frac{M_{12}(p)}{M_{c2}(p)} = \frac{\beta_1 + J_1 p}{\Delta(p)}. \quad (2.65)$$

$$\Delta(p) = \frac{J_1 J_2}{c_{12}} p^3 + \frac{J_1(\beta_2 + \gamma) + J_2(\beta_1 + \gamma)}{c_{12}} p^2 + [J_1 + J_2 + \frac{1}{c_{12}}(\beta_1 \gamma + \beta_2 \gamma + \beta_1 \beta_2)] p + \beta_1 + \beta_2. \quad (2.66)$$

При розгляді скоригованої системи з НЗ $\Delta\omega_\gamma$, при умови $b_{12} = 0$, вираз для пружного моменту приймає наступний вид:

$$M_{12}(p) = \frac{\omega_0(p) \cdot p \cdot (\beta_1 J_2 - \beta_2 J_1) - M_{c1}(p)(J_2 p + \beta_2) + M_{c2}(p)(J_1 p + \beta_1)}{\frac{J_1 J_2}{c_{12}} p^3 + \frac{J_1(\beta_2 + \gamma) + J_2(\beta_1 + \gamma)}{c_{12}} p^2 + [J_1 + J_2 + \frac{1}{c_{12}}(\beta_1 \gamma + \beta_2 \gamma + \beta_1 \beta_2)] p + \beta_1 + \beta_2}. \quad (2.67)$$

У сталому режимі рівняння (2.67) приймає вигляд:

$$M_{12}^{\text{уст}} = \frac{-M_{c1}\beta_2 + M_{c2}\beta_1}{\beta_1 + \beta_2}. \quad (2.68)$$

Слід зазначити, що в сталому режимі швидкості двигуни стають рівними між собою за рахунок дії пружного моменту і додатковий синхронізуючий момент не виникає. Синхронізуючий момент допомагає швидше вирівнювати швидкості двигунів в перехідному режимі та дозволяє знизити максимальну амплітуду пружних коливань в перехідних режимах.

На мостових та козлових кранах при тривалій експлуатації коліс можлива поява невеликих відхилень в їх діаметрах, що може позначатися на роботі крана в разі переміщення моста на відстані кількох десятків метрів. При обліку нерівності діаметрів провідних коліс, що описується співвідношенням (2.55) в структурну схему входить Ланка, що характеризує співвідношення діаметрів D_1 та D_2 .

Вплив коригувальних пристроїв на рух крана при відхилення в діаметрах ведучих коліс вимагає дослідження.

Розглянемо структурну схему двохдвигунної двохмасової системи, що враховує відхилення в діаметрах ведучих коліс (рисунок 2.12). Будемо вважати,

що на систему, описану структурною схемою, наведеної на рисунку 2.12, одночасно діють сигнал управління $\omega_0(p)$ та сигнали збурень $M_{c1}(p)$ та $M_{c2}(p)$.

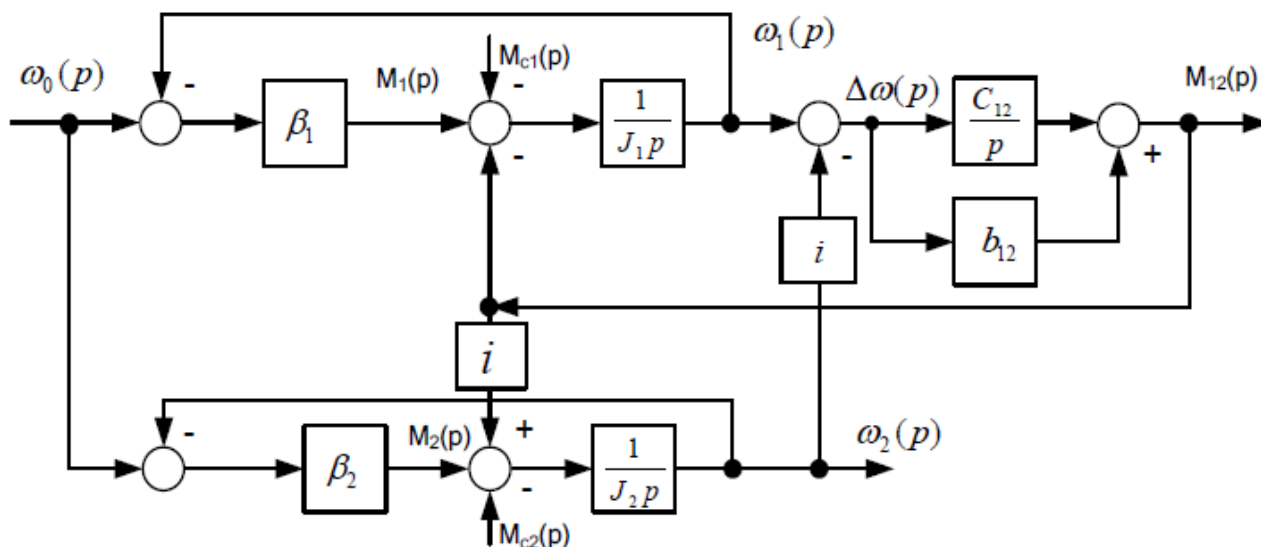


Рисунок 2.12. Структурна схема двохдвигунної двохмасової системи механізму пересування мостового крана при нерівності діаметрів ведучих коліс

Пружний момент можна уявити як результат реакції системи на сигнали управління та обурення. Відповідно до виразу (2.58)

$$M_{12}(p) = \frac{\omega_0(p) \cdot p \cdot (\beta_1 J_2 - i \beta_2 J_1 + \beta_1 \beta_2 (i - 1)) - M_{c1}(p) (\beta_2 + J_2 p) + M_{c2}(p) \cdot i \cdot (\beta_1 + J_1 p)}{\frac{J_1 J_2}{c_{12}} p^3 + \frac{J_1 \beta_2 + J_2 \beta_1}{c_{12}} p^2 + (i^2 J_1 + J_2 + \frac{1}{c_{12}} \beta_1 \beta_2) p + \beta_1 i^2 + \beta_2} \quad (2.69)$$

Аналіз рівняння (2.69) показує, що оскільки коефіцієнт i близький до одиниці, то його вплив на стійкість ЕМС незначний.

У сталому режимі ($p = 0$) вираз (2.69) матиме вигляд:

$$M_{12}^{уст} = \frac{-M_{c1} \beta_2 + M_{c2} \cdot i \cdot \beta_1}{\beta_1 i^2 + \beta_2} \quad (2.70)$$

З рівняння (2.70) випливає, що в сталому режимі, в разі не ідентичності статичних навантажень електроприводів і розбіжності жорсткостей їх механічних характеристик, нерівність діаметрів коліс при несприятливих співвідношеннях, коли електропривод з меншою жорсткістю механічної

характеристики, навантажений великим статичним моментом та обертає колесо меншого діаметру, призводить до збільшення усталеного значення пружного моменту.

Розглянемо, як впливає нерівність діаметрів коліс на величину пружного моменту при наявності зворотних зв'язків. Схеми ЕМС з коригуючими пристроями та блоками, що моделюють нерівність діаметрів коліс, наведені на рисунках 2.13 і 2.14.

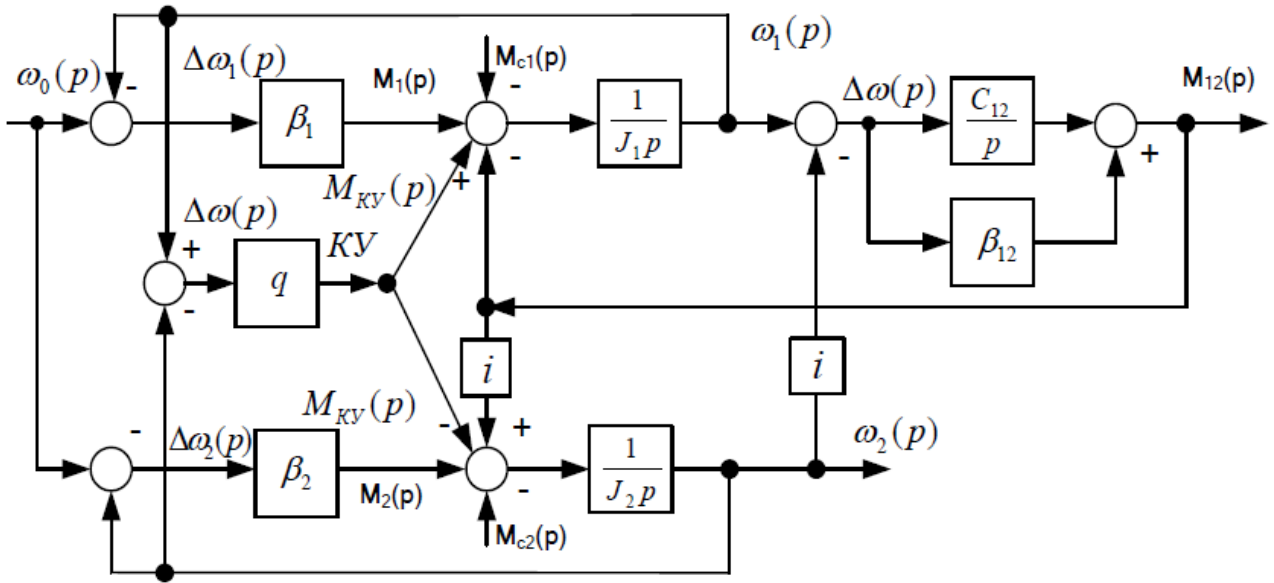


Рисунок 2.13. Структурна схема ЕМС з НЗ $\Delta\omega$

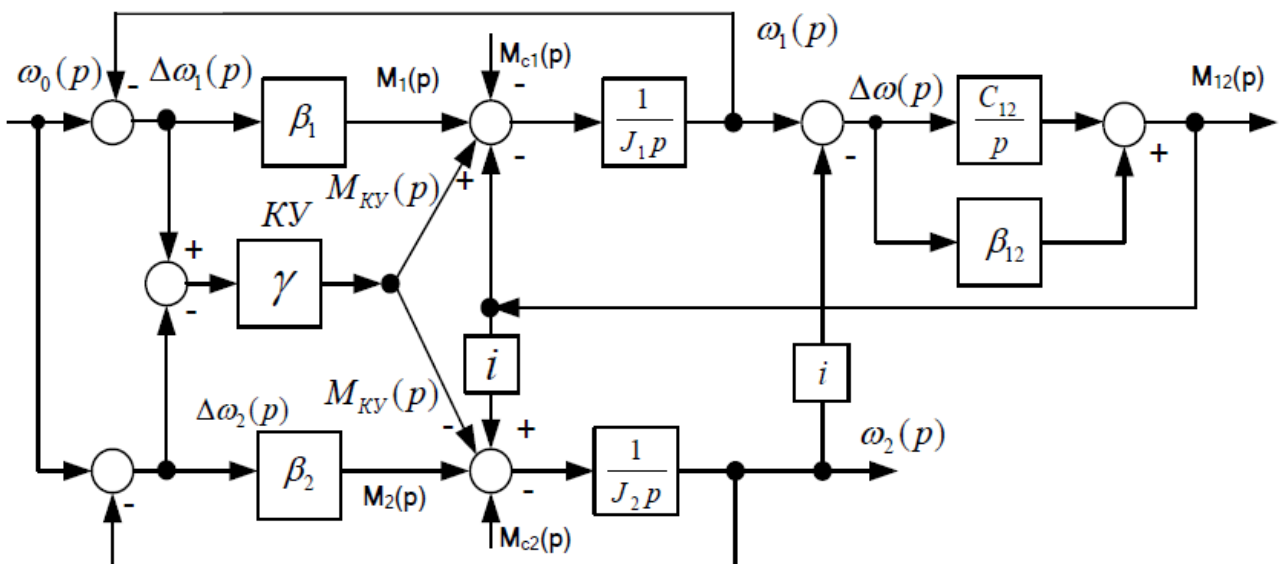


Рисунок 2.14. Структурна схема ЕМС з НЗ $\Delta\omega_\gamma$

Аналіз представлений для схеми (рисунок 2.14), тому що аналогічні

результати були отримані і для схеми (рисунок 2.13).

Вирази для вихідної змінної $M_{12}(p)$ та характеристичного многочлена мають наступний вигляд:

$$M_{12}(p) = \frac{\omega_0(p) \cdot p \cdot (\beta_1 J_2 - i\beta_2 J_1 + \beta_1 \beta_2 + \gamma(\beta_1 + \beta_2)(i-1))}{\Delta(p)} + \frac{-M_{c1}(p)(\beta_2 + (1-i)\gamma + J_2 p) + M_{c2}(p) \cdot (i \cdot \beta_1 + (1-i)\gamma + J_1 p)}{\Delta(p)}; \quad (2.71)$$

$$\Delta(p) = \frac{J_1 J_2}{c_{12}} p^3 + \frac{J_1(\beta_2 + \gamma) + J_2(\beta_1 + \gamma)}{c_{12}} p^2 + [J_1 i^2 + J_2 + \frac{1}{c_{12}}(\beta_1 \gamma + \beta_2 \gamma + \beta_1 \beta_2)] p + \beta_1 i^2 + \beta_2 + \gamma(i-1)^2. \quad (2.72)$$

Стале значення моменту сили перекоосу визначається:

$$M_{12}^{уст} = \frac{-M_{c1}(\beta_2 + (1-i)\gamma) + M_{c2} \cdot (i \cdot \beta_1 + (1-i)\gamma)}{\beta_1 i^2 + \beta_2 + \gamma(i-1)^2}. \quad (2.73)$$

Аналіз виразу (2.73) показує, що оскільки значення коефіцієнта i може бути як більше, так і менше одиниці, то при несприятливому розташуванні візка з вантажем поблизу поперечної балки, де провідне колесо має менший діаметр, в сталому режимі при синхронізації кутових швидкостей двигунів пружний момент зростає

Тому в сталому режимі руху моста крана систему корекції, дія якої спрямована на синхронізацію кутових швидкостей двигунів, необхідно відключати.

ВИСНОВКИ

1. Керуючі та збурюючі впливи на електромеханічну систему з боку електроприводів, що мають в ряді випадків неоднакову жорсткість статичних механічних характеристик, призводять до виникнення пружних коливань в електромеханічних системах кранових механізмів.
2. Включення в ЕМС з дводвигунним електроприводом коригуючих пристроїв, дія яких спрямована на вирівнювання швидкостей двигунів, підвищує демпфуючу здатність електроприводів.
3. Використання коригувальних пристроїв, що реалізують $\text{НЗ } \Delta\omega$,

підвищує демпфуючу здатність однодвигунних та дводвигунних електроприводів, а НЗ $\Delta\omega_\gamma$ - забезпечує підвищену демпфуючу здатність дводвигунного електроприводу.

4. Величина пружного моменту в двомасовій системі в сталому режимі визначається різницею статичних моментів, прикладених до обох наведених мас, а також залежить від жорсткості механічних характеристик двигунів, особливо в разі їх не ідентичності.

випрямленому ланцюзі. Комутація другого вентиляного ключа 18 дозволяє підвищувати напругу на вході АТ за рахунок періодичного накопичення енергії в реакторі 4 з подальшою передачею в випрямлений ланцюг згідно з випрямленою напругою мережі живлення. Сигнали завдання ключам 16 та 18 формує логічний блок перемикачів, що входить до складу системи управління.

Системи ЧКЕ мають в своїй конструкції крім перетворювача частоти додаткові елементи, включені в ланцюг обмотки ротора, і забезпечують каскадний принцип передачі енергії ковзання АД в ланцюг постійного струму. Система частотно-каскадного електроприводу зі скалярним управлінням, наведена в додатку Г (рисунок Г2).

Функціональна схема ЧКЕ на базі АІН зі скалярним управлінням, наведена на рисунку 3.2, базується на стандартних системах управління, вона містить додатковий контур імпульсного регулювання випрямленого струму.

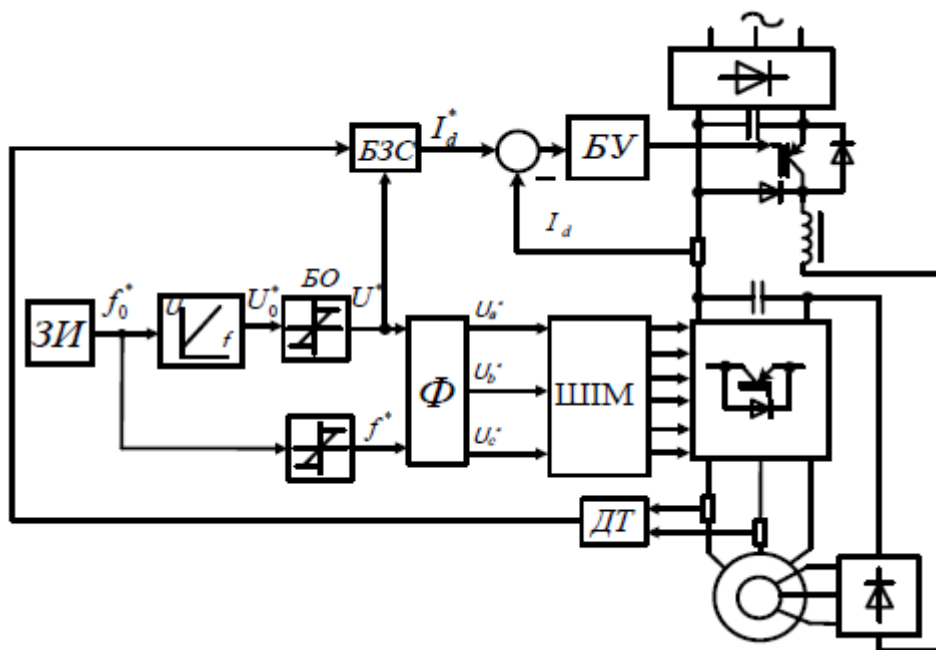


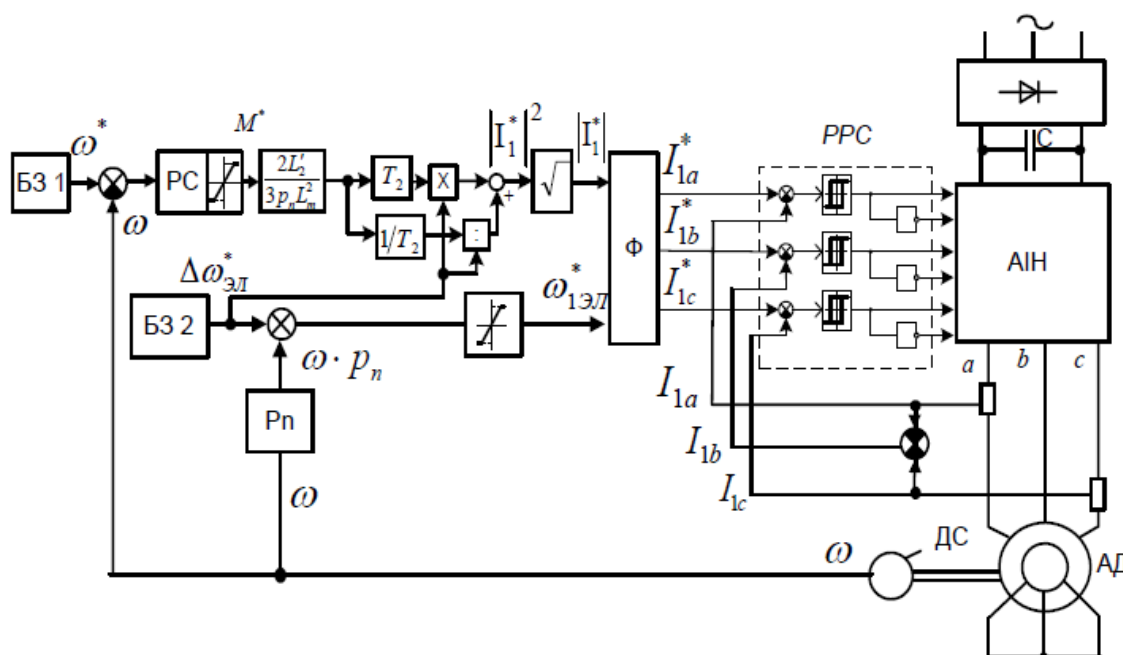
Рисунок 3.2 - Функціональна схема ЧКЕ на базі АІН
зі скалярним управлінням

Блок завдання струму БЗС при пуску двигуна видає завдання на підтримку постійного струму в випрямленій ланцюга, а після розгону АТ, використовуючи виміряні значення струму статора, видає завдання на випрямлений струм, в залежності від навантаження на валу двигуна. Результати

комп'ютерного моделювання даної системи ЧКЕ наведені в додатку Г. Система скалярного частотного управління за динамічними показниками значно поступаються системам векторного управління

У системах ЧКЕ тривалість включення через послідовне з'єднання обмоток статора і ротора можуть застосовуватися тільки АДФР, у яких номінальні струми статора і ротора відрізняються не більше ніж на 10%. Тому для подальшого дослідження були обрані системи ЧКЕ, побудовані на базі системи частотно-струмового управління АД, що займають за складністю проміжне положення між системами скалярного та векторного управління.

У системах скалярного частотно-струмового управління регулятора фазних струмів можуть бути виконані релейними (РРС) (рисунок 3.3), або можуть використовуватися більш поширені стандартні ШІМ - регулятори. У ЧКЕ будемо використовувати систему частотно-струмового управління, виконану з датчиком швидкості. Особливості частотно-струмового управління системою ЧКЕ, запропоновано для такої системи електроприводу використовувати стандартний ПЧ на базі АІН з двоконтурною системою управління, з внутрішнім контуром регулювання фазних струмів та зовнішнім контуром регулювання швидкості, що містить датчик швидкості.



а

На підставі (3.1) визначимо сигнал завдання квадрата струму статора:

$$|\dot{i}_1|^{2*} = \frac{2}{3} \frac{L'_2}{p_n L_m^2} (T_2 \Delta \omega_{эл}^* + \frac{1}{T_2 \Delta \omega_{эл}^*}) M^* = K_1 (T_2 \Delta \omega_{эл}^* + \frac{1}{T_2 \Delta \omega_{эл}^*}) M^* = F_{M-I} \cdot M^* \quad (3.3)$$

Сигнал $|I_1^*|$ визначиться шляхом вилучення квадратного кореня з значення сигналу, отриманого за допомогою виразу (3.3).

Якщо в системі частотно-струмового управління АД сигнал $\Delta \omega_{эл}^*$ регулюється, то в прямому каналі регулювання швидкості (рисунок 3.3) знаходиться нелінійна ланка F_{M-I} з блоками множення та ділення, описується виразом (3.2). Однак, якщо в системі ЧКЕ підтримувати величину $\Delta \omega_{эл}^* = const$ на постійному рівні, то можна спростити систему регулювання і використовувати лінеаризовану ланку F_{M-I} , тоді в його складі блоки множення та ділення не потрібні (рисунок 3.3в).

Замкнутий контур релейного регулювання фазних струмів статора в системі з АІН в першому наближенні будемо вважати інерційними ланкою першого порядку:

$$W_{зам I}(p) = \frac{1}{T_\mu p + 1}, \quad (3.4)$$

де T_μ - постійна часу контуру струму з РРС.

При релейному регулюванні струму статора час запізнювання першої гармоніки кривої струму від заданої синусоїдальної кривої в основному визначається зоною нечутливості (гістерезису) РРС і зазвичай становить не більше $t_z = T_\mu = 0,001c$. Регулятор швидкості може бути обраний ІІІ-типу, тоді у відповідність з відомою методикою налаштування замкнутих контурів [91] його передавальна функція має вигляд:

$$W_{РС}^{III}(p) = \frac{(4T_\mu p + 1) \cdot J}{8T_\mu^2 \cdot p \cdot k_c}, \quad (3.5)$$

де k_c - коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості.

Другий канал системи частотно-струмового управління здійснює регулювання частоти струму статора. Сигнал завдання частоти струму статора

в системі ЧКЕ визначається:

$$\omega_{1\text{эл}}^* = \Delta\omega_{\text{элк}}^* + \Delta\omega_{\text{кв}} + \omega \cdot p_n, \quad (3.6)$$

де $\Delta\omega_{\text{элк}}^*$ - завдання відхилення наведеної швидкості ротора від кругової частоти поля статора в системі ЧКЕ; $\Delta\omega_{\text{кв}}$ - сигнал корекції.

Блок формувача Φ (рисунок 3.3) формує сигнали завдання миттєвих значень струму статора:

$$\begin{cases} I_{1a}^* = |I_1^*| \cdot \sin(\omega_{1\text{эл}}^* \cdot t); \\ I_{1b}^* = |I_1^*| \cdot \sin(\omega_{1\text{эл}}^* \cdot t - 2\pi/3); \\ I_{1c}^* = |I_1^*| \cdot \sin(\omega_{1\text{эл}}^* \cdot t + 2\pi/3). \end{cases} \quad (3.7)$$

Ці сигнали подаються на позитивний вхід РРТ, на негативний вхід якого надходять сигнали з датчиків струму статора.

Силова частина системи ЧКЕ (рисунок 3.3б) містить каскадний блок - «випрямляч - інвертор - трансформатор - випрямляч», що зв'язує обмотку ротора з ланкою постійного струму ПЧ, включений зустрічно-паралельно основному енергетичному каналу. Така система управління ЧКЕ являє собою гібридну систему, що використовує поєднання принципів частотно-струмового та каскадного управління. Каскадний блок виконує рекуперацію енергії ковзання з ланцюга обмотки ротора в ланцюг постійного струму ПЧ. Крім того, введення в ланцюг ротора асинхронного двигуна додаткової напруги, що є векторною величиною, спрямованої згідно з рівнянням (1.1) назустріч вектору струму ротора, надає стабілізуючий вплив на систему електроприводу зі скалярним управлінням.

Включення каскадного блоку зустрічно-паралельно основному енергетичному каналу електроприводу (рисунок 3.3 б) дозволяє в даній системі ЧКЕ використовувати АДФР з будь-яким коефіцієнтом трансформації. При такому схемному рішенні ланцюга статора і ротора мають гальванічну розв'язку у вигляді узгоджувального трансформатора. Конденсатор в каскадному блоці служить для згладжування випрямленої вихідної напруги

ротора. Схема заміщення АДФР, керованого за схемою ЧКЕ, в якій всі змінні наведені до обмотці статора, показана на рисунку 3.4.

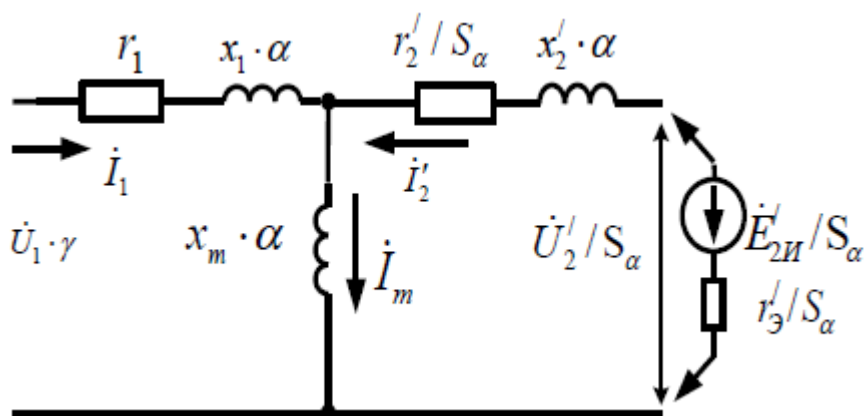


Рисунок 3.4 - Схема заміщення АДФР з каскадним блоком в ланцюзі ротора

При регулюванні частоти та напруги живлення статора АДФР ЕРС нерухомого ротора є функцією параметрів γ і α :

$$E_{2\kappa\alpha} = E_{2\kappa} \cdot \gamma \cdot \alpha, \quad (3.8)$$

де $E_{2\kappa}$ - ЕРС нерухомого ротора при номінальній частоті $f_{1н}$.

Якщо ротор обертається, то ЕРС в його ланцюзі $E_{2\alpha}$ змінюється у функції параметрів γ , α , а також S_α .

$$E_{2\alpha} = E_{2\kappa\alpha} \cdot S_\alpha = E_{2\kappa\alpha} \cdot \frac{\Delta\omega_{\text{ЭЛ}}}{\omega_{1\text{ЭЛ}}} = E_{2\kappa} \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot S_\alpha = E_{2\kappa} \cdot \gamma \cdot \frac{\Delta\omega_{\text{ЭЛ}}}{\omega_{0\text{ЭЛ}}}. \quad (3.9)$$

Індуктивний опір обмотки ротора, що обертається $x_{2\alpha}$ та контуру намагнічування $x_{m\alpha}$ визначаються за виразами

$$x_{2\alpha} = x_2 \cdot \alpha \cdot S_\alpha. \quad (3.10)$$

$$x_{m\alpha} = x_m \cdot \alpha \quad (3.11)$$

Модуль вектора додаткової напруги \dot{U}_2 в системі ЧКЕ, відповідно до рівняння (1.1), завжди знаходиться в протифазі з вектором струму ротора \dot{I}_2 .

Випрямлені ЕРС та струм ротора можна визначити за виразами

$$\begin{cases} E_{2d\alpha} = E_{2\alpha} \cdot K_U; \\ I_{2d} = \frac{E_{2d\alpha} - E_{Иd}}{R_{d\Sigma}}, \end{cases} \quad (3.12)$$

де $E_{2d\alpha}$ - ЕРС ротора випрямлена; $E_{Иd}$ - ЕРС інвертора випрямлена; $R_{d\Sigma}$ - приведенне до ланки постійного струму сумарний опір в ланцюзі ротора.

$$R_{d\Sigma} = 2R_2 + \frac{3x_2 \cdot s_\alpha}{\pi} + R_{TP} + \frac{3x_{TP}}{\pi} + R_{B\Sigma}, \quad (3.13)$$

де R_{TP} - активний приведенний опір обмоток трансформатора; x_{TP} - індуктивний приведенний опір обмоток трансформатора; $R_{B\Sigma}$ - сумарний опір, що визначається падінням напруги на вентилях схеми; $k_U = \frac{\sqrt{6}}{3 \cdot \pi}$ - коефіцієнт пропорційності між напругою в ланцюзі змінного струму та вихідною напругою випрямляча.

Випрямлений струм ротора інвертується і протікає по обмотці низької напруги узгоджувального трансформатора, що має коефіцієнт трансформації K_{TP} , в результаті чого в обмотках трансформатора наводиться ЕРС. Напруга обмотки високої напруги трансформатора випрямляється. Для забезпечення умов протікання струму по обмотці високої напруги трансформатора середня напруга на виході випрямляча каскадного блоку має трохи перевищувати середню напругу на конденсаторі ПЧ. Оскільки напруга на конденсаторі ПЧ має приблизно постійне значення, то в ланцюг ротора АДФР вводиться приблизно постійна величина проти-ЕРС інвертора $E_{Иd} \approx const$. ЕРС ротора АД повинна відповідати проти-ЕРС інвертора, згідно (3.12) - (3.13) становитиме

$$E_{2\alpha} = (E_{Иd} + I_{2d} \cdot R_{d\Sigma}) / K_U. \quad (3.14)$$

При спільному вирішенні рівнянь (3.9) та (3.14) можна визначити величину $\Delta\omega_{\text{элк}}$ у каскадній схемі, з якою буде працювати АДФР за умови $E_{Иd} \approx const$.

$$\Delta\omega_{\text{эл к}} = \frac{(E_{Ид} + I_{2d} \cdot R_{d\Sigma})\omega_{0\text{эл}}}{K_U \cdot E_{2к} \cdot \gamma}. \quad (3.15)$$

У режимі ідеального холостого ходу струм ротора дорівнює нулю, тоді

$$E_{2d\alpha} = E_{Ид} = U_{Cd} / K_{TP}. \quad (3.16)$$

$$\Delta\omega_{\text{эл0 к}} = \frac{(E_{Ид})\omega_{0\text{эл}}}{K_U \cdot E_{2к} \cdot \gamma} = \frac{(U_{Cd} / K_{TP})\omega_{0\text{эл}}}{K_U \cdot E_{2к} \cdot \gamma}. \quad (3.17)$$

Необхідну величину K_{TP} можна визначити за формулою

$$K_{TP} = \frac{U_{Cd} \cdot \omega_{0\text{эл}}}{\Delta\omega_{\text{эл0 к}} \cdot K_U \cdot E_{2к} \cdot \gamma}. \quad (3.18)$$

Робота каскадного блоку дає додаткове збільшення $\delta\omega_{\text{элк}}$ по відношенню до роботи електроприводу при замкнутому накоротко роторі

$$\delta\Delta\omega_{\text{эл к}} = \frac{E_{Ид}\omega_{0\text{эл}}}{K_U \cdot E_{2к} \cdot \gamma}. \quad (3.19)$$

При налаштуванні системи частотно-струмового управління значення $\Delta\omega_{\text{эл0к}}$, визначене за виразом (3.17), встановлюється блоком завдання частоти струму ротора (БЗ2). З виразів (3.16) - (3.18) випливає, що при зміні сигналу завдання $\Delta\omega_{\text{эл0к}}$, неминуче ропорційно змінювати коефіцієнт трансформації трансформатора K_{TP} . Для цього в схемі ЧКЕ (рисунок 3.3) обмотка високої напруги трансформатора виконана з відпайками.

В ЧКЕ при регулюванні частоти та напруги статора для розрахунку механічних характеристик двигуна можна користуватися формулою [33]:

$$M = \left(E_{2\alpha} \sqrt{3} \cdot I_d - \frac{x_2 \cdot \alpha}{\sqrt{2}} I_d^2 \right) \frac{1,35}{\omega_1}. \quad (3.20)$$

ЕРС ротора $E_{2\alpha}$, відповідно з виразом (3.4), залежить від частоти та амплітуди напруги статора, а також від відносного ковзання.

Формула, отримана для визначення моменту АДКЗ, буде справедлива і для ЧКЕ за умови сталості $\Delta\omega_{\text{эл}}$. Відмінність системи ЧКЕ полягає в тому, що

входить у формулу моменту величина $\Delta\omega_{\text{эл}}$ повинна визначатися за виразом (3.18), вона залежить від величини додаткової ЕРС інвертора, введеної в ланцюг обмотки ротора.

Каскадний блок, призначений для рекуперації енергії ковзання в ланку постійного струму перетворювача частоти, залежно від потужності електроприводу може бути виконаний в однофазному виконанні (рисунок 3.3б) або в трифазному виконанні. Для електроприводів потужністю 30 кВт і менше можливе застосування однофазного каскадного блоку, для електроприводів більшої потужності доцільно використовувати трифазний каскадний блок.

Функціональна схема силової частини ЧКЕ з трифазним каскадним блоком, виконаним за схемою АІН, приведена на рисунку 3.5.

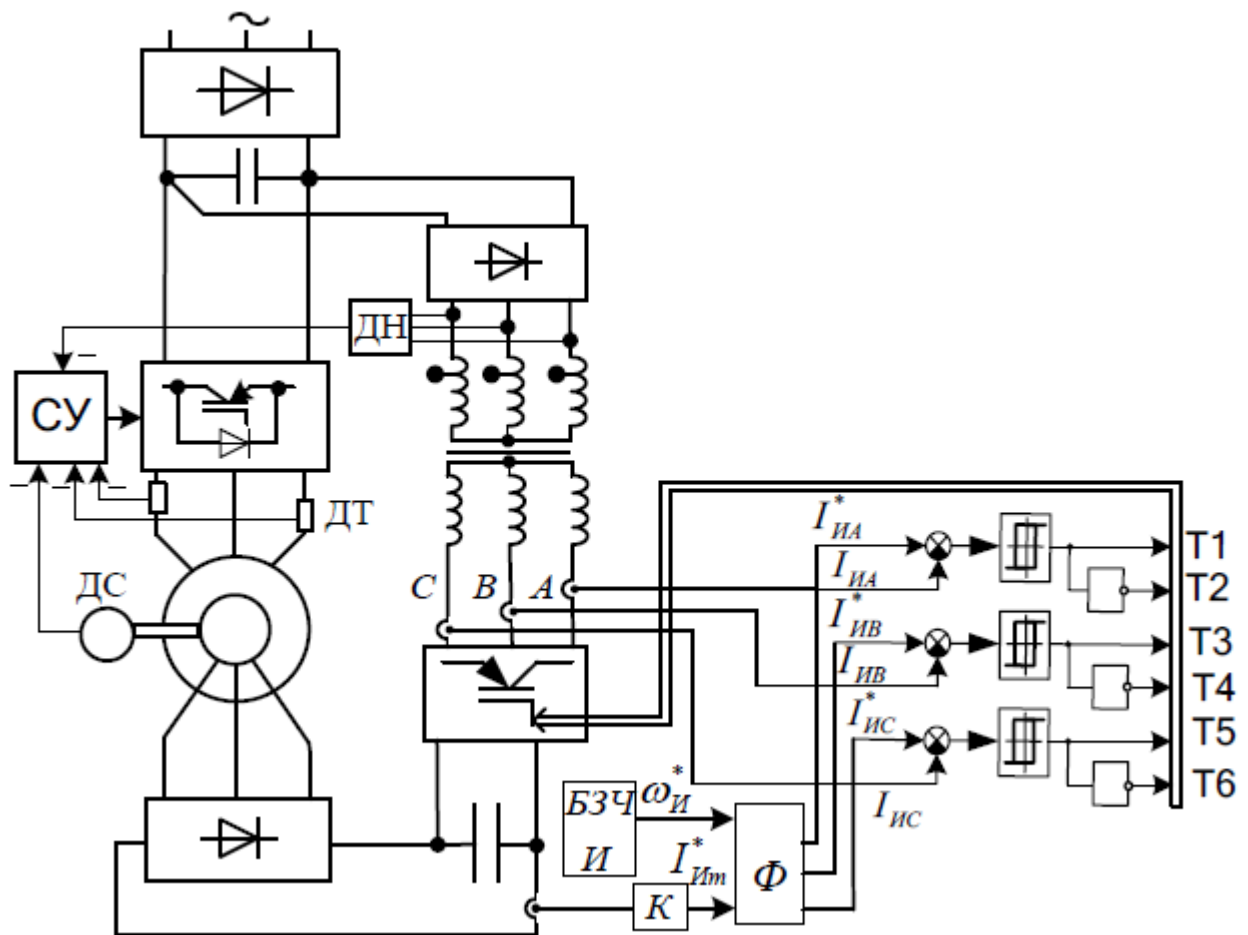


Рисунок 3.5 - Схема силової частини ЧКЕ на базі АІН з трифазним каскадним релейним блоком

Інвертор каскадного блоку може працювати з різною вихідною частотою.

При збільшенні вихідної частоти інвертора більше 50 Гц знижуються габарити узгоджувального трансформатора, але для нього потрібно не стандартний магнітопровід.

При побудові трифазного каскадного блоку можна використовувати АІН з системою управління на базі релейних регуляторів струму (РРС). В цьому випадку трансформатор буде перетворювати напругу стандартної частоти 50 Гц, яку здатний забезпечити АІН, що працює при стандартній частоті комутації транзисторних ключів до 2,5 кГц. При цьому робота інвертора повинна забезпечувати безперервність струму, що протікає через обмотки ротора АДФР.

В системі ЧКЕ (рисунок 3.3) Вибір величини сигналу завдання на кругову частоту ЕРС ротора $\Delta\omega_{\text{элк}}^* = \omega_2^*$ визначається величиною ЕРС ротора $E_{2\alpha}$, при підтримці сталості якої буде пускатися АД. У режимі пуску струм ротора буде максимальним $I_{2\text{max}}$. Для виконання умови передачі енергії з ланцюга ротора в ланцюг статора величина ЕРС ротора при регулюванні частоти завжди повинна бути більше, ніж падіння напруги на внутрішньому комплексному Z_2 опорі обмотки ротора. Мінімальна напруга на виході інвертора наближено визначиться:

$$U_{H\text{min}} = \left| \dot{E}_{2\alpha} - \dot{I}_{2\text{max}} \cdot \dot{Z}_2 \right| \approx \frac{E_{2\alpha}}{K_{\Pi}}, \quad (3.21)$$

де K_{Π} - коефіцієнт, наближено враховує падіння напруги в обмотці ротора і на вентилях схеми, для обраного значення струму.

Випрямлена вихідна напруга трансформатора має бути не менше випрямленої напруги мережі живлення

$$U_{дТР} = U_{H} \cdot \kappa_{ТР} \cdot K_{\alpha} \geq U_{дС} \quad (3.22)$$

де $K_{ТР}$ - коефіцієнт трансформації узгоджувального трифазного трансформатора в каскадному блоці; K - коефіцієнт приведення змінної напруги на виході інвертора до випрямленого ланцюга, залежить від кількості фаз каскадного блоку; U_c - напруга мережі.

Для більш точного узгодження величини випрямленої напруги

трансформатора та сигналу завдання частоти струму ротора $\Delta\omega_{\text{элк}}^* = \omega_2^*$ в системах ЧКЕ, наведених на рисунку 3.3, б та рисунку 3.5, використана система корекції завдання $\Delta\omega_{\text{элк}}^*$ на основі визначення відхилення випрямленої напруги трансформатора від заданого значення за допомогою використання негативного зворотного зв'язку по U_{d2TP} (ДН), в склад якої входять датчики напруги і розрахунковий блок.

Коригуючий сигнал визначається, з урахуванням (3.17), за виразом

$$\Delta\omega_{\text{кв}} = (U_{\text{дс}}^* - U_{\text{дтп}}) \cdot K_{\text{кв}}, \quad (3.23)$$

де $K_{\text{кв}}$ - коефіцієнт передачі коригуючої ланки ($K_{\text{кв}} = \omega_0 / (K_U \cdot E_{2к} \cdot \gamma)$), уточнюється при налагодженні.

Використання розробленої системи корекції виключає роботу каскадного блоку з недостатньою вихідною напругою, коли струм протікає тільки по обмотці низької напруги узгоджувального трансформатора.

В системі ЧКЕ, наведеної на рисунку 3.5, використаний каскадний блок з релейним управлінням. Математичний опис РРС в системі управління інвертором наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Математичний опис РРС каскадного блоку

Сигнали	Формули	Номер формули
Сигнали на виході вузлів порівняння	$\begin{cases} \Delta I_{\text{Иa}} = I_{\text{Иa}}^* - I_{\text{Иa}}; \\ \Delta I_{\text{Иb}} = I_{\text{Иb}}^* - I_{\text{Иb}}; \\ \Delta I_{\text{Иc}} = I_{\text{Иc}}^* - I_{\text{Иc}}. \end{cases}$	(3.24)
Стан сигналів на виході РРС	$\begin{cases} \text{Якщо } \Delta I_{\text{и}} \leq -\frac{\tau}{2}, \text{ на виході стан (0);} \\ \text{Якщо } \Delta I_{\text{и}} \geq \frac{\tau}{2}, \text{ на виході стан (1).} \end{cases}$	(3.25)
Величина гістерезису	$\tau = \frac{ \dot{I}_{\text{Иm}}^* _{\text{max}}}{100}.$	(3.26)

Значення сигналу завдання амплітуди фазного струму інвертора пов'язано

Слід зазначити, що система векторного управління ЧКЕ складніша системи частотно-струмового управління (рисунок 2.3б). Блок корекції поздовжньої складової струму статора у векторній системі управління включається тільки після закінчення перехідного процесу пуску електроприводу. Тому для підйомно-транспортних механізмів, працюючих в повторно-короткочасному режимі, більш кращою є система ЧКЕ з частотно-струмовим управлінням.

В системі ЧКЕ каскадний блок може бути виконаний на базі трифазного резонансного паралельного інвертора струму. Трифазний резонансний паралельний інвертор струму є простим по конструкції і в управлінні, забезпечує форму миттєвих значень струму, наближену до синусоїдальної.

Трифазний резонансний паралельний інвертор струму працює з постійною вихідною частотою, що відповідає частоті резонансного контуру, складеного з індуктивності обмоток трансформатора та комутуючих конденсаторів, тому каскадний блок є автономним і не вимагає зовнішньої системи управління. При пуску електроприводу потрібно попередній заряд комутуючих конденсаторів резонансного інвертора струму.

Трифазний резонансний інвертор струму може використовуватися в системі частотно-параметричного електроприводу. Конденсаторний блок, виконаний з шести елементів, він з'єднаний з активно-індуктивним навантаженням.

В системі ЧКЕ протягом усього часу роботи підтримується приблизно постійний рівень ЕРС ротора, тому при виборі трифазного резонансного інвертора струму в якості інвертора каскадного блоку не потрібно додаткових регулюючих впливів. Каскадний блок передає в ланку постійного струму ПЧ потужність ковзання, складову при малих ковзаннях не більше 10-15% від потужності, спожитої електроприводом з мережі живлення.

Результати досліджень однодвигунного ЧКЕ із зустрічно-паралельним каскадним блоком показують, що максимальне зниження споживання

електроенергії ЧКЕ з мережі за час пуску з постійним абсолютним ковзанням $\beta_\alpha = 0,15$ в результаті роботи каскадного блоку знижується приблизно на 4% в порівнянні з частотним пуском закороченого АДФР.

Тому каскадний блок більш доцільно використовувати в системі дводвигунного ЧКЕ, додатково реалізувавши з його допомогою синхронізацію швидкостей АДФР.

3.2. Системи дводвигунного електроприводу на базі АДФР з електричним зв'язком роторів двигунів

В АДФР ЕРС ротора, відповідно до виразу (3.22), пропорційна відхиленню $\Delta\omega$ швидкості обертання ротора від швидкості обертання поля статора. Тому в дводвигунному електроприводі порівняння ЕРС роторів двох АДФР дозволяє здійснити непряме порівняння відхилень обох двигунів. Це дає можливість в системі дводвигунного електроприводу на базі АДФР реалізації НЗ $\Delta\omega_\gamma$ без використання датчиків швидкості (рисунок 3.7). Порівняння випрямлених ЕРС роторів відбувається автоматично при підключенні мостових випрямлячів, включених в ланцюзі обмоток роторів двигунів, до загального навантаження, в якості якої може використовуватися резистор.

Використання в якості струмообмежувального елемента резистора, що володіє активним опором, визначає низькі енергетичні показники електроприводу при пуску через великі втрати енергії в резисторі. Регулювання опору резистора зазвичай виконується ступінчасто за допомогою релейно-контакторної апаратури, що не дозволяє отримати плавне управління пусковим моментом асинхронного двигуна. Процес синхронізації швидкостей двигунів заснований на тому, що випрямлені ЕРС, що подаються з виходів мостових діодних випрямлячів на загальний резистор, впливають один на одного, що в результаті призводить до зміни струмів роторів двигунів та вирівнювання їх кутових швидкостей.

Включення в ланцюзі ротора АДФР індивідуальних випрямлячів, загального інвертора та частотно-регульованого опору (рисунок 3.7) дозволяє

зробити систему електроприводу більш економічною. При регулюванні частоти на виході інвертора змінюється індуктивний опір струмообмежувального пристрою, що дозволяє регулювати струм в ланцюзі ротора. Якщо струмообмежувальний пристрій виконано у вигляді індукційного резистора, що має масивний магнітопровід, в якому індуктивна та активна складові загального комплексного опору залежать від частоти, можна забезпечити стабілізацію пускового моменту двигуна, керуючи частотою на виході інвертора.

Слід зазначити, що стандартний перетворювач частоти не призначений для роботи за умов широкого діапазону зміни ЕРС ротора, тому для реалізації даної схеми необхідна розробка спеціального перетворювача частоти. Через наявність струмообмежувального активного опору на виході інвертора енергетичні показники електроприводу будуть нижче, ніж при частотному та частотно-каскадному управлінні.

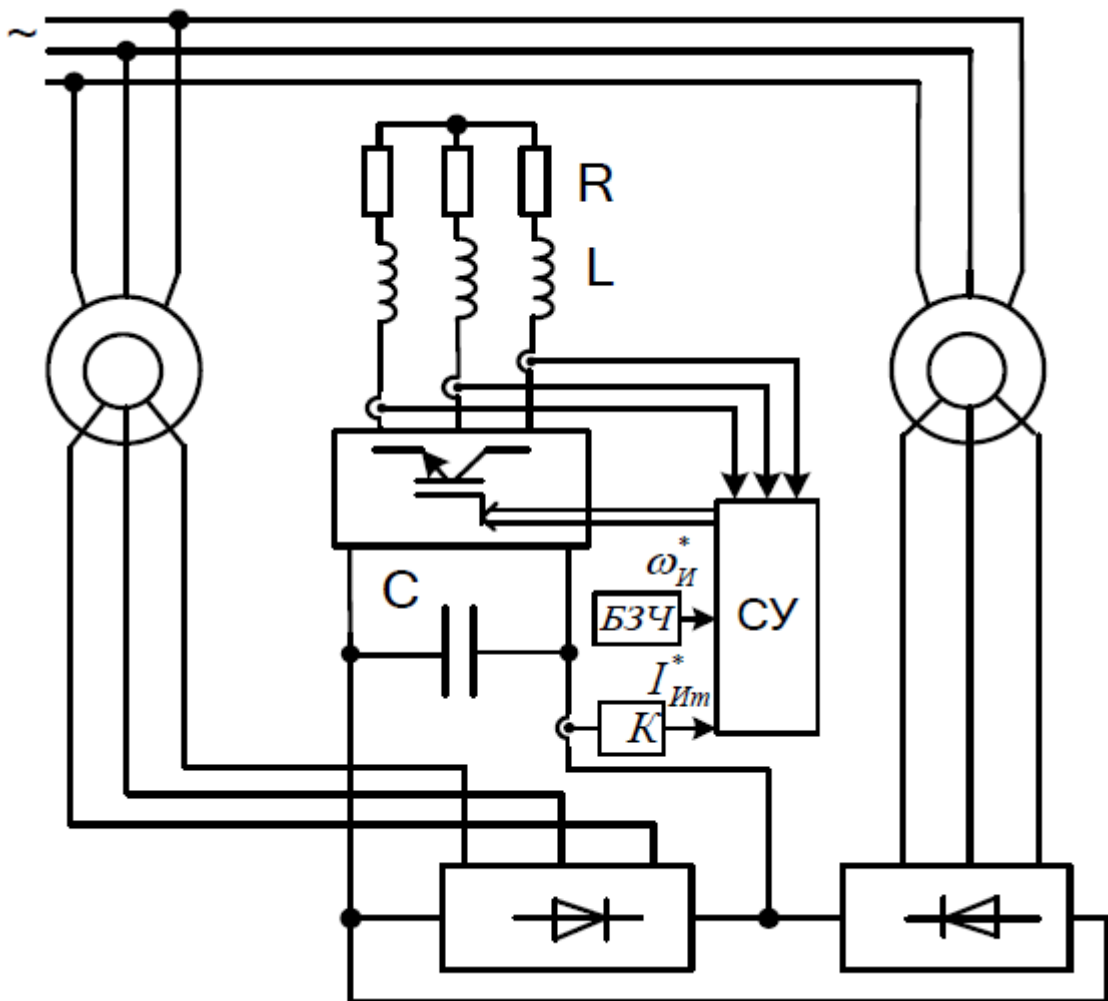


Рисунок 3.7 - Схема дводвигунного електроприводу на базі АДФР із загальним трифазним інвертором струму, до виходу якого підключений частотно-залежний індуктивно-активний струмообмежуючий елемент

При частотному управлінні дводвигунним електроприводом на базі АДФР можна синхронізувати швидкості двигунів за рахунок вирівнювання випрямлених ЕРС роторів, включивши в ланцюзі роторів мостові випрямлячі та підключивши їх виходи до загального навантаження, наприклад до резистора R_d (рисунок 3.8). ЕРС ротора кожного з двигунів, згідно з виразом (3.9), буде пропорційна величині $\Delta\omega_{ел}$, яка визначається відхиленням швидкості обертання ротора ω від швидкості обертання поля статора ω_1 . Тому наявний в системі внутрішній зворотний зв'язок по різниці ЕРС роторів двигунів за своїм синхронізує дії еквівалентна негативного зворотного зв'язку по різниці відхилень швидкостей двигунів від швидкості ідеального холостого ходу (здійснюється НЗ $\Delta\omega_\gamma$), розглянутої у розділі 2.

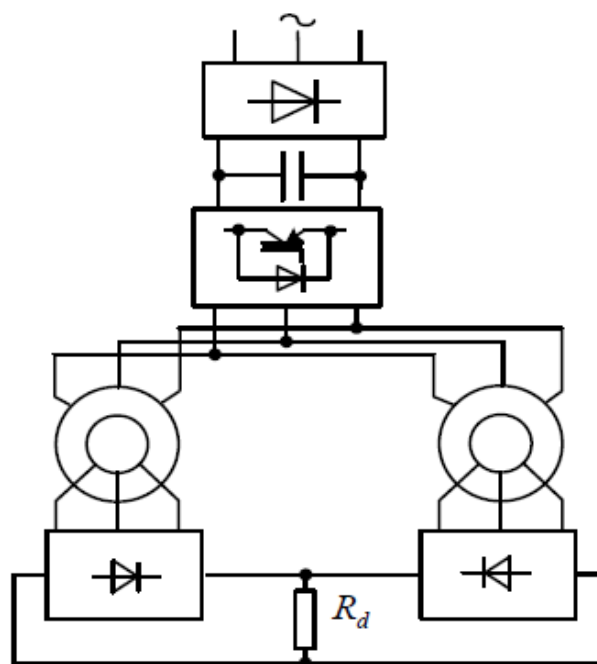


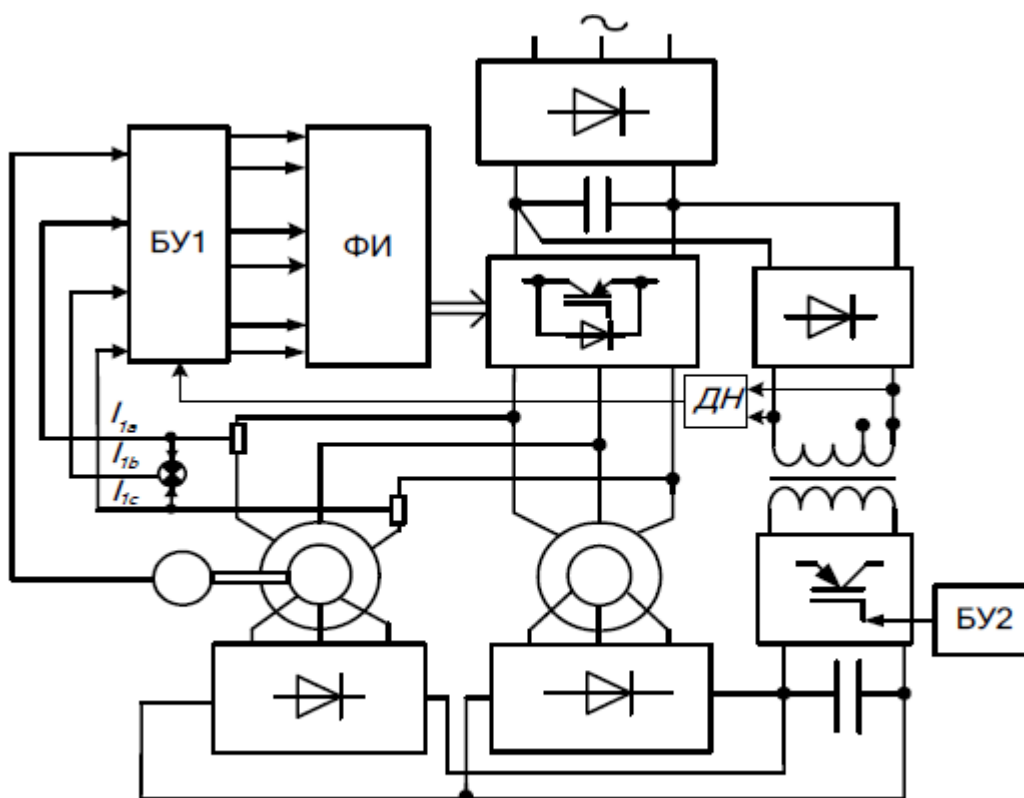
Рисунок 3.8 - Схема дводвигунного електроприводу на базі АДФР з частотним управлінням та електричним зв'язком двигунів по ланцюгу ротора

При такій схемі електроприводу (рисунок 3.8) синхронізація швидкостей двигунів досягається за рахунок додаткових втрат енергії в резисторі R_d , що

супроводжується зниженням жорсткості робочої ділянки механічних характеристик двигунів.

У розглянутих схемах, показаних на рисунках 3.7 та 3.8, синхронізація швидкостей досягається за рахунок підключення до виходів випрямлячів, включених в ланцюзі роторів АД, до загального навантаження, при цьому створюється загальний електричний ланцюг, через який протікають випрямлені струми роторів обох двигунів, в результаті двигуни надають взаємний вплив один на одного.

Якщо замість резистора R_d до виходу мостових випрямлячів підключити енергозберігаючий каскадний блок, реалізувавши систему частотно-каскадного електроприводу (рисунок 3.9а та 3.9б), буде забезпечений такий же синхронізуючий двигуни ефект при кращих енергетичних показниках електроприводу.



а

дводвигунного ЧКЕ із загальним електричним ланцюгом роторів (рисунок 3.10), яка побудована на основі Г - подібної схеми заміщення АД.

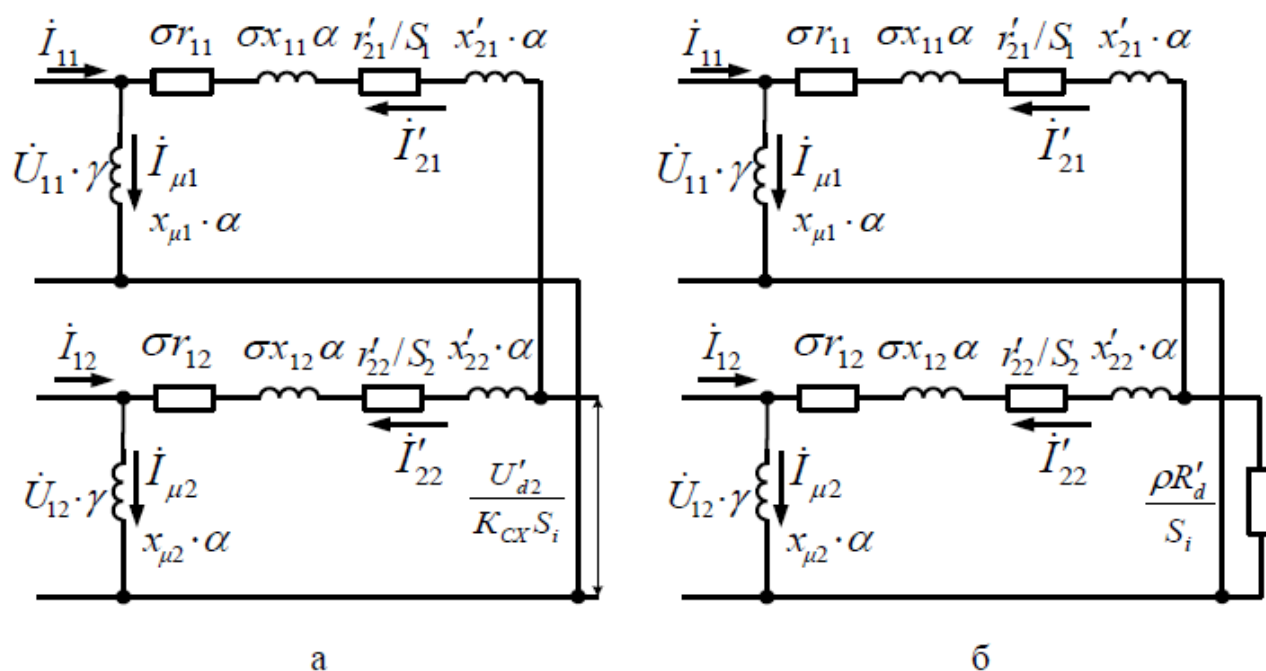


Рисунок 3.10. Схеми заміщення дводвигунного асинхронного електроприводу, наведені до ланцюга статора з введеним в ланцюзі роторів: а - загальною додатковою напругою; б - загальним резистором

Для схеми (рисунок 3.10а) рівняння балансу напруг для фази i - двигуна за умови рівності напруги живлення має вигляд:

$$\dot{U}_{1i}\gamma = \dot{I}'_{2i} \left[\left(\sigma \cdot r_{1i} + r'_{2i}/S_{\alpha i} \right) + j\alpha \left(\sigma \cdot x_{1i} + x'_{2i} \right) \right] + U'_{d2}/(S_{\alpha i} \cdot K_{cx}), \quad (3.29)$$

де $i = 1, 2$; U'_{d2}/K_{cx} - приведенне до статора випрямлена напруга ротора σ - коефіцієнт приведення опорів обмотки статора при переході від Г - подібної схеми заміщення АД до Г - подібної схеми; K_{cx} - коефіцієнт приведення до ланцюга змінного струму напруги у випрямленому ланцюзі.

Решта позначень введені раніше.

$$\dot{I}'_{21} = \frac{\dot{U}_1 \gamma - U'_{d2} / (S_{\alpha 1} \cdot K_{\text{cx}})}{[\sigma \cdot I_{11} + \frac{I'_{21}}{S_{\alpha 1}} + j\alpha(\sigma \cdot X_{11} + X'_{21})]}; \quad (3.30)$$

$$\dot{I}'_{22} = \frac{\dot{U}_1 \gamma - U'_{d2} / (S_{\alpha 2} \cdot K_{\text{cx}})}{[\sigma \cdot I_{12} + \frac{I'_{22}}{S_{\alpha 2}} + j\alpha(\sigma \cdot X_{12} + X'_{22})]}. \quad (3.31)$$

Вирази(3.30) - (3.31) можна записати в загальному вигляді

$$\dot{I}'_{2i} = \frac{\dot{U}_1 \gamma - U'_{d2} / (S_{\alpha i} \cdot K_{\text{cx}})}{\sigma \cdot I_{1i} + \frac{I'_{2i}}{S_{\alpha i}} + j\alpha(\sigma \cdot X_{1i} + X'_{2i})}. \quad (3.32)$$

Якщо замінити дію додаткової напруги U_{d2} , підведену до виходів роторних випрямлячів, підключених до виходів роторних випрямлячів еквівалентного опору R_{d2} , то величина цього опору визначиться [34, 11]:

$$R_{d2} = \frac{U_{d2}}{\sum_{i=1}^2 I_{d2i}}, \quad (3.33)$$

де I_{di} - роторний струм i - двигуна, приведений до випрямленого ланцюга.

Виконавши операцію приведення всіх параметрів схеми до ланцюга постійного струму для i - двигуна визначимо вираз:

$$U'_{d2} = \left(\frac{\rho \cdot R'_{d2}}{S_{\alpha i}} \cdot \sum_{i=1}^2 I'_{2i} \right) K_{\text{cx}}, \quad (3.34)$$

де R_{d2} - опір, приведений до ланцюга постійного струму, еквівалентний за струмообмежувальною дією додатковій напрузі U_{d2} , підведену до нерегульованим випрямлячем в ланцюзі роторів АД; σ - коефіцієнт зворотного приведення до ланцюга змінного струму опору в ланцюзі постійного струму.

З рівняння (3.34) випливає, що збільшення ковзання одного з двигунів, що супроводжується зростанням струму ротора цього двигуна, повинно привести до зменшення струму ротора іншого двигуна, інакше баланс напруг,

який визначається виразом (3.34), буде порушуватися.

Якщо до виходів мостових випрямлячів підключений каскадний блок "інвертор – трансформатор - діодний міст", тоді

$$U_{d2} = E_{dH} - \left(\sum_{i=1}^2 I'_{2i} \right) R_{dH}, \quad (3.35)$$

де E_{dH} - випрямлена ЕРС інвертора.

Еквівалентний опір інвертуючого блоку "інвертор - однофазний трансформатор" визначається

$$R_{dH} = R_{TP} + 3 \cdot \frac{X_{TP}}{\pi} + \Delta R_{d\Sigma}, \quad (3.36)$$

де R_{TP} - наведений активний опір трансформатора; X_{TP} - наведений індуктивний опір трансформатора; $\Delta R_{d\Sigma}$ - опір, що враховує падіння напруги на всіх вентилях схеми.

Для протікання струму через інвертуючий блок напруга на первинній обмотці однофазного трансформатора має бути

$$U_1 \geq \frac{U_c}{K_{CX} K_{TP}}, \quad (3.37)$$

де U_c - напруга на фільтруючому конденсаторі ПЧ, K_{TP} – коефіцієнт трансформації узгоджувального трансформатора.

Моменти двигунів можна визначити за формулою

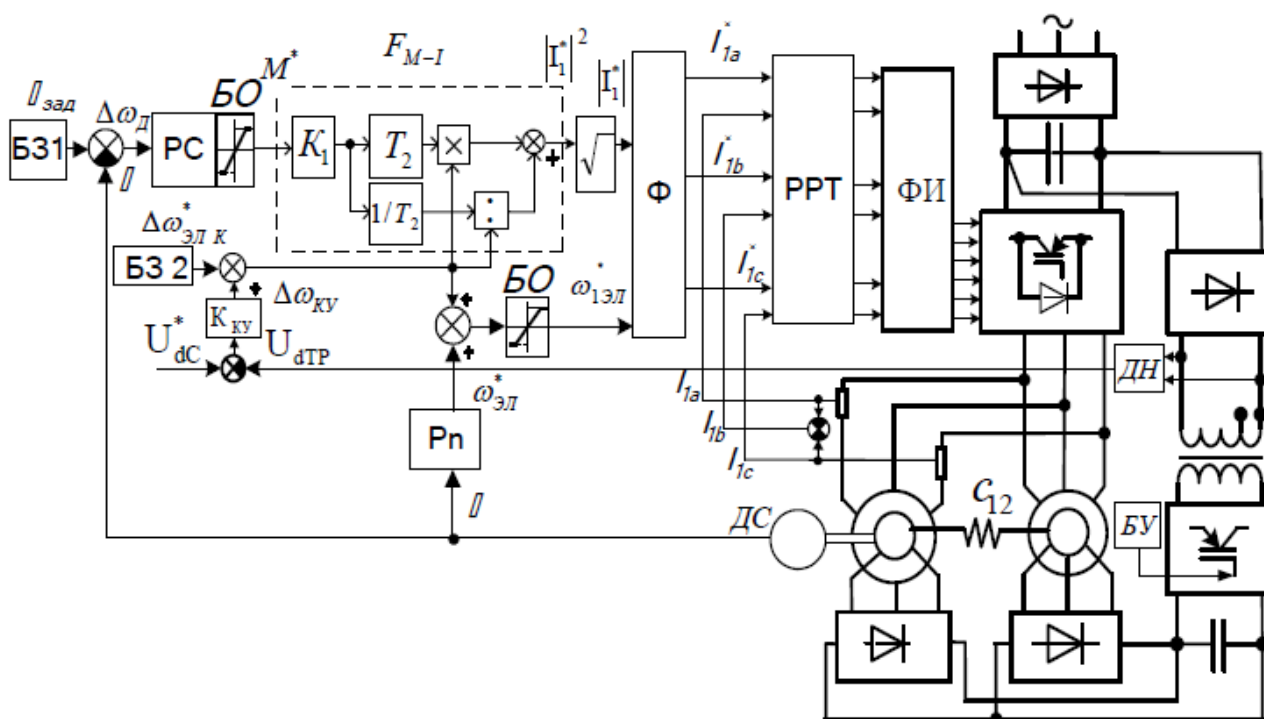
$$M_i = \frac{1,35}{\omega_1} \left(E_{2ki} \cdot \alpha \cdot S_{\alpha i} \cdot I_{di} - \frac{x_{2i} \cdot \alpha}{\sqrt{2}} I_{di}^2 \right). \quad (3.38)$$

Якщо до виходів мостових випрямлячів підключений резистор R_d , то у рівнянні (3.34) потрібно поставити $R_{d\Sigma} = R_d$. При нерівності ковзань відбувається перерозподіл значень еквівалентних опорів загального резистора, що вводяться в ланцюзі роторів обох АД, що призводить до зміни їх струмів роторів та моментів, за рахунок чого вирівнювати ЕРС і швидкості.

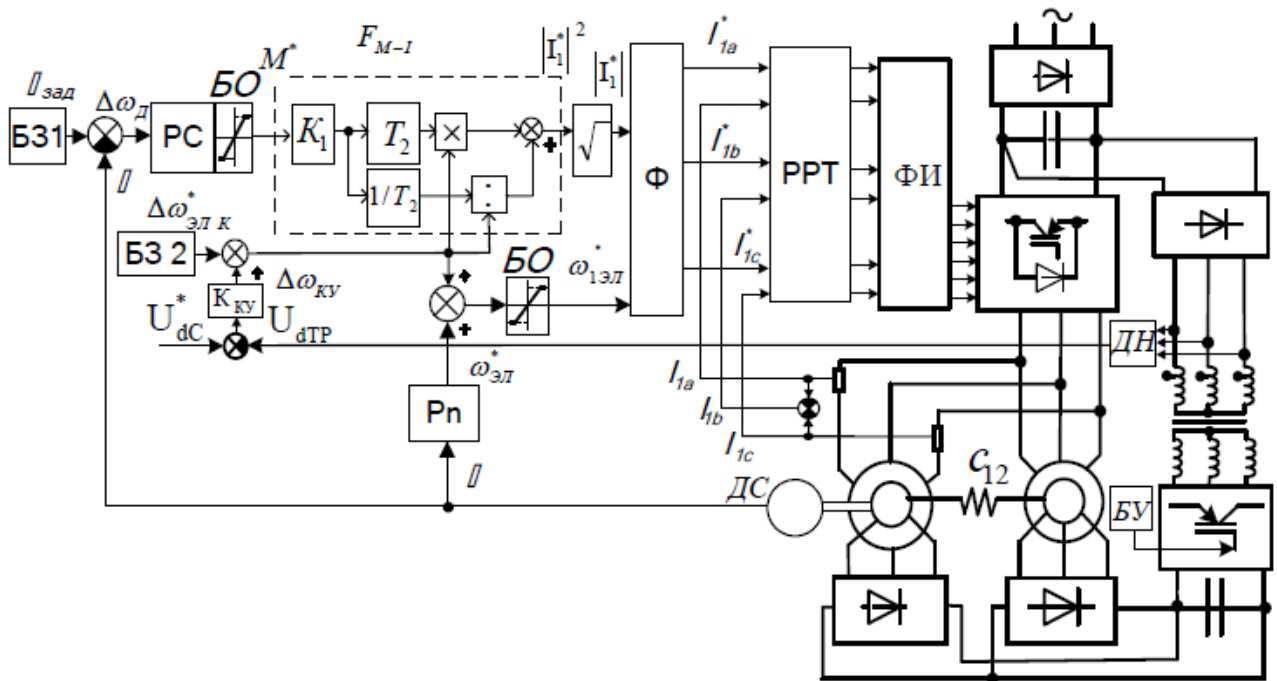
У дводвигунному електроприводі схему каскадного блоку доцільно виконувати в трифазному виконанні при потужності кожного з двигунів більше

15 кВт. Оскільки в каскадному блоці немає необхідності в регулюванні вихідної частоти інвертора, схема трифазного інвертора може бути виконана на найбільш простій елементній базі, наприклад на базі резонансного інвертора струму, наведеного в додатку Ж.

Управління системами дводвигунного асинхронного електроприводу з каскадним вентиляно-трансформаторним блоком може здійснюватися з використанням відомих простих систем скалярного управління без датчика швидкості, а також систем частотно-струмового управління з датчиком швидкості (рисунк 3.11).



а



б

Рисунок 4.11 - схеми дводвигунного частотно-каскадного електроприводу з системою частотно-струмового управління: а - з однофазним каскадним блоком; б - з трифазним каскадним блоком

Система управління інвертором ПЧ є частотно-струмовою двоконтурною, що працює на основі вимірювання вихідних змінних двигуна, прийнятого «провідним». Внутрішній контур з РРС та датчиками фазних струмів регулює миттєві значення фазних струмів статора «провідного» двигуна.

Зовнішній контур містить ПІ - регулятор швидкості, а також датчик швидкості, встановлений на валу «ведучого» двигуна. Інший АД є «веденим», на його обмотки подається така ж напруга живлення, як і у «ведучого» двигуна. Вихідні змінні цього двигуна не контролюються та не коригуються по ланцюгу обмотки статора, вони змінюються слідом за зміною вихідних змінних інвертора по результату роботи системи управління «ведучим» двигуном.

Швидкості двох двигунів вирівнюються за рахунок включення в ланцюзі їх роторів загального трифазного каскадного блоку, який містить інвертор, узгоджувальний трансформатор та діодний випрямляч, вихід якого підключений паралельно випрямляча і конденсатору перетворювача частоти.

Випрямлені напруги роторів двигунів надходять на вхід інвертора через ємнісний фільтр. Інвертор та трансформатор, встановлений на виході інвертора є загальним навантаженням для роторів обох двигунів, що мають свої значення ЕРС. При загальному навантаженні випрямлячів відбувається процес взаємного вирівнювання їх ЕРС за рахунок впливу зовнішнього випрямляча на комутацію діодів іншого випрямляч. Коли загальним навантаженням є резистор. У розглянутій схемі дводвигунного асинхронного електроприводу (рисунок 3.11) загальним навантаженням інвертора є каскадний блок, що передає на його вхід енергію з роторів двигунів в ланцюг постійного струму загального для двигунів перетворювача частоти.

У асинхронного двигуна ЕРС ротора пропорційна ковзанню, при номінальних значеннях напруги і частоти статора ЕРС ротора дорівнює $E_{2K} \cdot S$. Якщо вважати, що параметри двигунів ідентичні і двигуни мають рівні швидкості, то випрямлений струм ротора можна визначити за формулою:

$$I_d = \frac{E_{2K} \cdot S - E_{ин} - \Delta U_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}, \quad (3.39)$$

де R_{Σ} - приведений до випрямленого ланцюга еквівалентний опір всіх елементів з активними опорами; $E_{ин}$ - приведена до випрямленого ланцюга ЕРС інвертора; ΔU_{Σ} - сумарне еквівалентне падіння напруги на вентилях схеми.

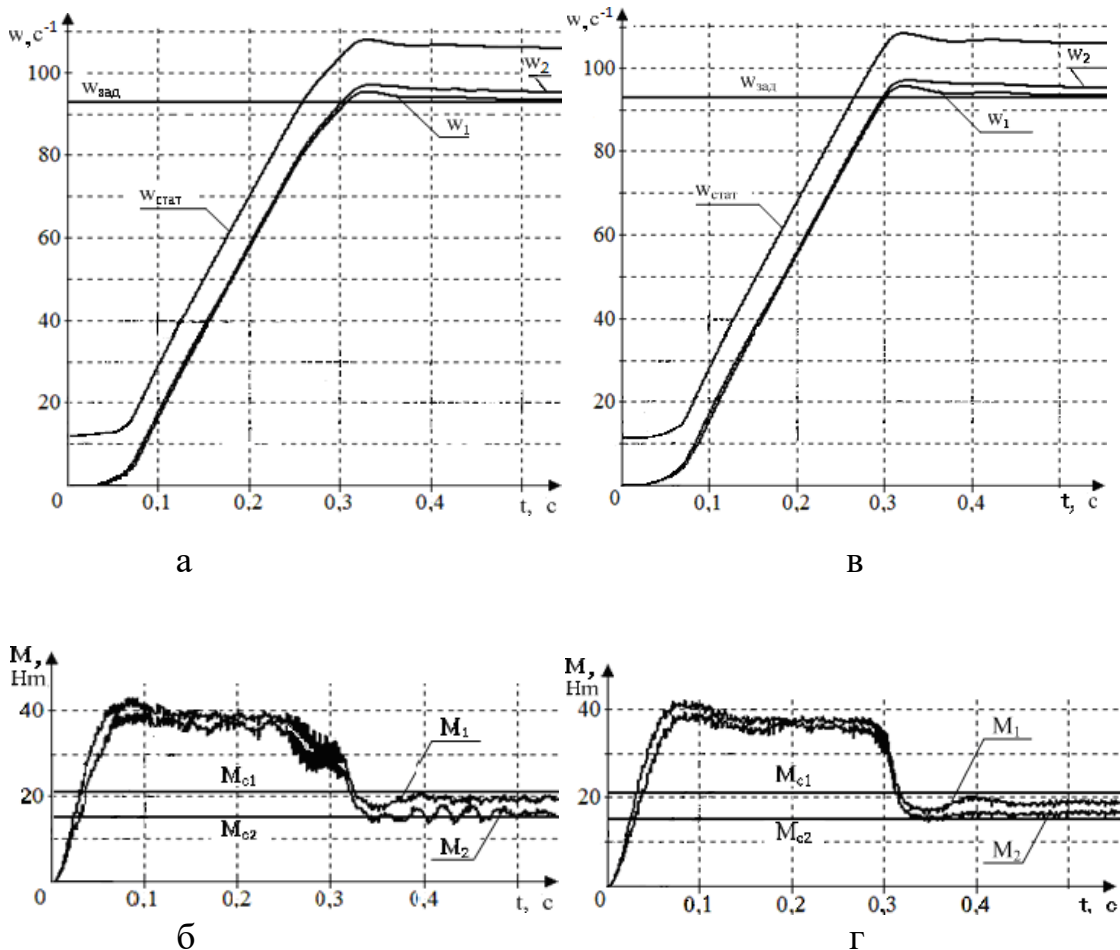
У випадку, коли АД 1 має більшу швидкість, ніж АД 2, то ковзання двигунів також будуть нерівними $S_1 < S_2$ і нерівними будуть ЕРС роторів $E_{2K} \cdot S_1 < E_{2K} \cdot S_2$, тому випрямляч АД 2 частково замикає випрямляч АД 1. Струм ротора АД 1 зменшується і він пригальмовується, струм ротора АД 2 зростає і він розганяється, в результаті швидкості двигунів вирівнюються.

Регулювання швидкості електроприводу здійснюється шляхом зміни частоти та напруги на виході інвертора ПЧ. ЕРС в обмотках ротора може підтримуватися на постійному рівні протягом усього часу пуску, в цьому випадку значно спрощується схема та алгоритм управління інвертором каскадного блоку, так як не потрібно регулювати його частоту. Наприклад,

можливе використання конструктивно простого резонансного інвертора струм.

Оскільки в каскадному блоці розглянутих схем (рисунок 3.11) є узгоджувальний трансформатор, в даній системі ЧКЕ можуть використовуватися АДФР з будь-якими коефіцієнтами трансформації.

Система дводвигунного ЧКЕ з частотно-струмовим скалярним управлінням досліджувалася методом комп'ютерного моделювання з використанням пакету прикладних програм MATLAB Simulink (Додаток Д). Модельована схема електроприводу, наведена на рисунку 3.11а, оснащена однофазним каскадним блоком. Результати моделювання пуску електроприводу з АДФР типу МТН 111-6, $P_H = 2.2$ кВт, наведені на рисунку 3.12.



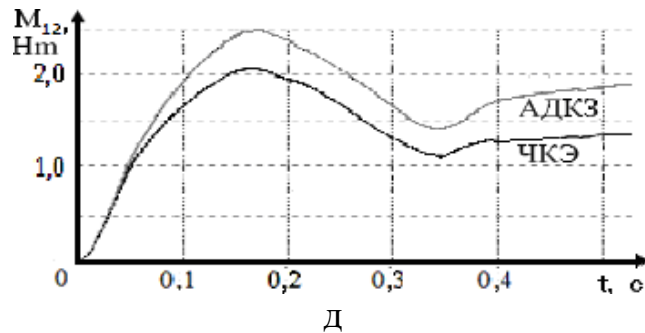


Рисунок 3.12 - динамічні процеси при пуску дводвигунної пружної ЕМС: а, б - при наявності загального каскадного блоку; в, г - при закорочених роторах обох АДФР; д - графік пружного моменту $M_{12}(t)$ в системі з ЧКЕ та при закорочених роторах АДФР

Такі двигуни встановлені на механізмі пересування моста мостового крана вантажопідйомністю 5 т. При моделюванні додаткова напруга, введена в ланцюг ротора, становила $U_{2m} = 0,15E_{2k} \cdot \alpha$, $M_{c1} = 1,5M_{c2}$. У систему пружного зв'язку введена похибка, прийнято, що діаметри коліс крана відрізняються на 2 %. За цих умов максимальне значення пружного моменту зменшилося на 17%, пружний момент у сталому режимі знизився на 38%. При моделюванні встановлено, що в пусковому режимі споживання ЧКЕ активної енергії з мережі зменшилося на 4,1%, в порівнянні з пуском АДФР з закороченим ротором.

Таким чином, при заданому рівні введеного в ланцюг ротора додаткової напруги, що забезпечує величину абсолютного ковзання $\beta_\alpha = 0,15$ результативність дії каскадного блоку в більшій мірі проявляється як засіб обмеження максимальних динамічних навантажень в пружному зв'язку. Тому каскадний блок найбільш доцільно використовувати в системах дводвигунного електроприводу з пружними зв'язками.

3.3. Експериментальне дослідження динамічних процесів в електромеханічній системі мостового крана, керованого дводвигунним електроприводом

Експериментальні дослідження, що підтверджують результативність дії вентильної системи із загальним резистором, що забезпечує синхронізацію швидкостей двох АДФР, проводилися на мостовому крані вантажопідйомністю 5т з довжиною прольоту 22,5 м, що працює в цеху ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат». Електропривод пересування моста крана має два АДФР МТФ 012-6, Номінальна потужність 2,7 кВт. Існуюча система ступінчастого резисторного управління двигунами містить силовий контролер, що забезпечує три пускові ступені та один ступінь для гальмування противключенням кожного з двигунів (додаток Е, рисунок Е.1а, Е.2а).

При проведенні експериментів з різними системами електроприводу вимірювалися струми роторів двох двигунів, за допомогою датчиків струму - шунтів. Для виконання частини експериментів, що характеризують особливості роботи дводвигунного електроприводу на мостовому крані, на валах двигунів тимчасово, за допомогою гумових перехідників, встановлювалися датчики швидкості - тахогенератори.

На рисунку Е.1а (додаток Е) наведені діаграми змінних АД, що показують, як змінюються струми роторів та швидкості асинхронних двигунів при роботі ступінчастою контакторно-резисторної системи управління. На крані використовується ручний силовий контролер, яким керує машиніст крана, тому моменти перемикачів пускових ступенів неоптимальні. При резисторно-контакторному управлінні на графіку зміни в часі швидкостей двигунів на початковому етапі після перемикачів відбуваються коливання швидкостей обох двигунів, статичні струми роторів різні, що визначається різними статичними навантаженнями на валах двигунів.

На рисунку Е.1б (додаток Е) наведені діаграми змінних АД, що показують, як змінюються струми роторів та швидкості асинхронних двигунів

при роботі з випрямлячами і загальним резистором в ланцюзі ротора. Коливання швидкості на початковій ділянці пуску практично відсутні.

З метою експериментального підтвердження можливості при наявності пружного зв'язку підвищення демпфуючої здатності дводвигунного електроприводу на базі АДФР за рахунок реалізації електричного зв'язку двигунів по ланцюгу ротора, еквівалентної дії негативного зворотного зв'язку по різниці відхилень кутових швидкостей двигунів від кутової швидкості обертання поля статора, на мостовому крані були змонтовані дві різні схеми:

а - з підключенням до виходів мостових випрямлячів індивідуальних резисторів (рисунок 3.13а);

б - з підключенням до виходів мостових випрямлячів загального резистора R_d (рисунок 3.13б).

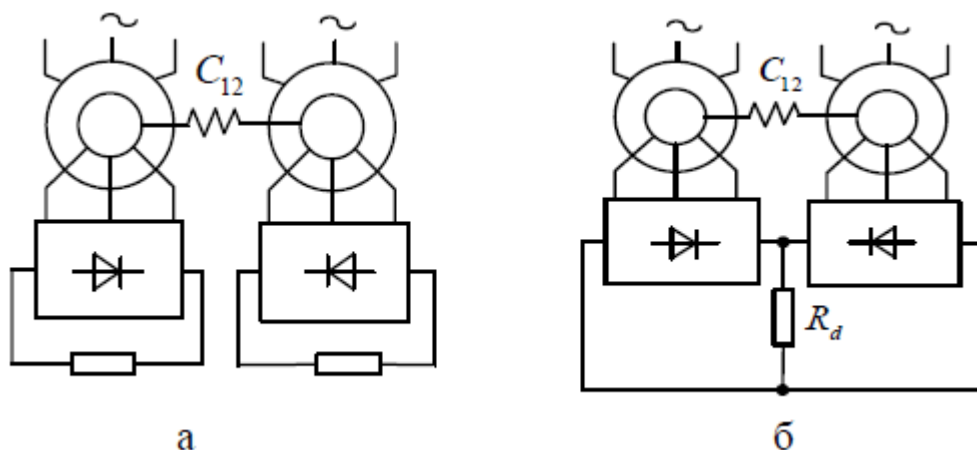
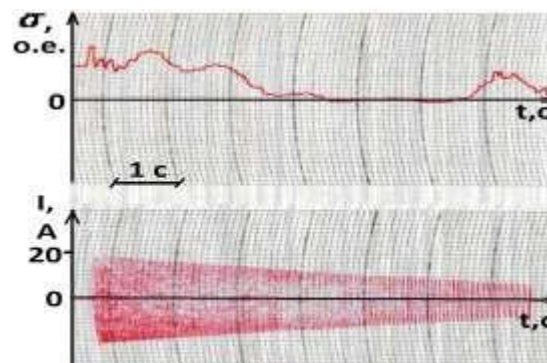
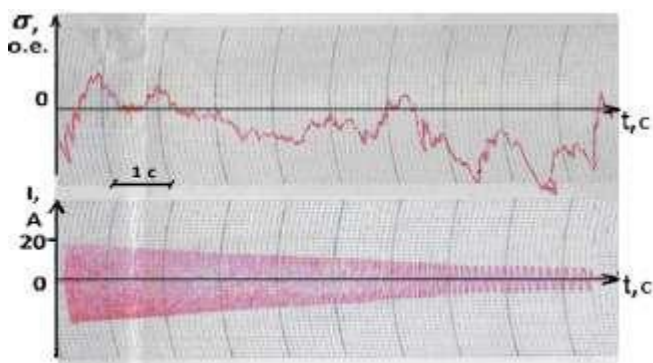


Рисунок 3.13. Системи дводвигунного асинхронного електроприводу:

а - з підключенням до виходів випрямлячів індивідуальних резисторів; б - з випрямлячами та загальним резистором



а

б

Рисунок 3.14. Тензограми вигину пролітної балки моста крана та струм ротора АДФР для схем дводвигунного електроприводу: а - з індивідуальними резисторами; б - із загальним резистором в випрямленого ланцюга

При роботі обох систем електроприводу проводилося вимірювання тензометричним методом динамічних навантажень у фермі мостового крана, пов'язаних з перекосом моста. На пролітну балку наклеювалися тензодатчики, їх виводи підключалися в схему вимірювального моста, сигнал посилювався за допомогою підсилювача. Вимірюваний тензометричним методом сигнал пропорційний вигину пролітної балки, тобто перекосу крана. Сигнали з датчиків струмів ротора, виконаних у вигляді шунтів та з підсилювача сигналів тензодатчиків "Топаз-3-01" записувався самописним приладом Н-237-5. Отримані експериментальним шляхом осцилограми, наведені в додатку И на рисунках Е.2.

Було виконано кілька експериментальних пусків і гальмувань при типовому циклі технологічних операцій механізмом пересування мостового крана. При використанні різних схем управління електроприводом пуск мостового крана проводився з однакового початкового положення моста, починаючи з місця виходу з ремонтної зони.

Візок розташовувався в кінцевому положенні, у обмежувача руху поблизу однієї кінцевої балки моста крана. З моменту пуску крана максимальна довжина пересування становила 15 метрів.

У додатку Е показані тимчасові залежності струму ротора одного двигуна та навантажень перекосу в пролітній Балці для випадку роботи крана з резисторно-контакторною системою управління (рисунок Е.2а), з випрямлячами і індивідуальними резисторами в ланцюзі ротора (рисунок Е.2б), з випрямлячами і загальним резистором в ланцюзі ротора (рисунок Е.2в). Внаслідок складності проведення даного експерименту, фіксувався струм тільки одного двигуна.

Вимірювання навантажень вигину пролітної балки мостового крана, що

працює на зазначеній ділянці підкранового шляху, при використанні різних систем електроприводу, здійснювалося тензометричним методом. З отриманих осцилограм зусиль в пролітній балці моста при використанні двох систем електроприводу були обрані типові ділянки, які наведені на рисунку 3.14.

На мостовому крані були проведені експерименти з дводвигунним асинхронними електроприводами, оснащеними включеними в ротор випрямлячами (рисунок 3.13), коли: виходи випрямлячів замкнуті на індивідуальні опори, (рисунок Е.2б); виходи випрямлячів замкнуті на загальний опір та забезпечується вирівнювання ЕРС роторів і швидкостей двигунів (рисунок Е.2в).

Під час проведення експериментальних досліджень механізму пересування моста відчував керуючі впливи з боку електроприводів та впливи, пов'язані з тертям реборд коліс об рейки, розгойдуванням вантажозахватного пристрою (кліщі), проходженням стиків рейок та інше. Це ускладнює визначення таких кількісних показників, як коефіцієнт затухання та логарифмічний декремент загасання.

В результаті виконаних експериментальних досліджень встановлено, що при використанні в дводвигунному електроприводі на базі АДФР вентильно-резисторної системи із загальним резистором, вирівнює ЕРС та швидкості двигунів, дія якої еквівалентно введенню негативного зворотного зв'язку по різниці кутових швидкостей $\Delta\omega$ двох АД, рівень максимальних динамічних навантажень в металоконструкції крана знизився приблизно на 25-30%.

3.4. Експериментальні дослідження дії вентильно-резисторної системи вирівнювання ЕРС асинхронних двигунів

Для експериментальних досліджень дії системи корекції із загальним вентильно-резисторним блоком, що забезпечує корекцію механічних характеристик двигунів, був розроблений та виготовлений випробувальний стенд, що має дві однакові випробовувані машини АД1 і АД2 (МТ 012-6, $P_n = 2.2$ кВт) та дві однакові навантажувальні машини НМ1 і НМ2 постійного

струму незалежного збудження (ДП 12, $P_H = 3$ кВт) рисунок 3.15. Випробовувані машини (ВМ) працюють в руховому режимі, навантажувальні машини (НМ) - в режимі електродинамічного гальмування, опір в ланцюзі якоря першого навантажувального двигуна регулюється ручним способом за допомогою лабораторного реостата R_y . Момент навантажувальної машини визначається:

$$M_{HM} = k\Phi_H I, \quad (3.40)$$

де k - конструктивна постійна НМ; Φ_H - номінальний магнітний потік НМ;

I - струм якоря НМ.

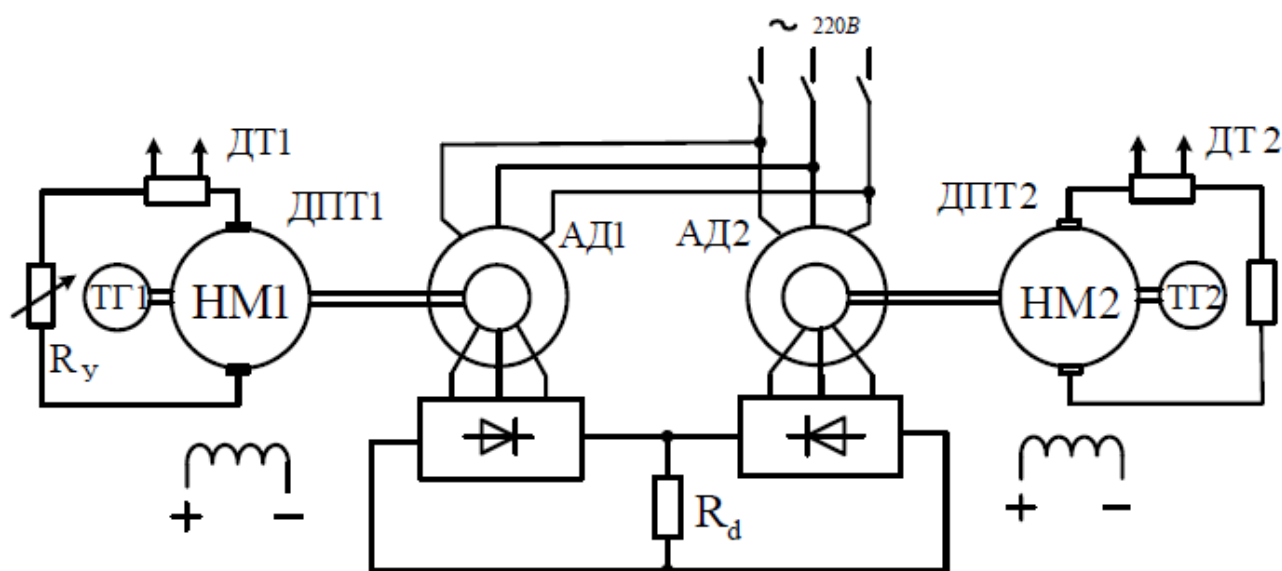


Рисунок 3.15 - Електрична схема випробувального стенду

До обмоток статорів їм підводилося знижена напруга, що становило $U_{1л} = 220$ В, що дозволило забезпечити необхідний гальмівний момент, створюваний НМ. Статичні механічні характеристики машин наведені на рисунку 4.16. У вихідному положенні ВМ1 та ВМ2 працювали з приблизно однаковими швидкостями і навантаженнями на валу, створюваними НМ1 та НМ2.

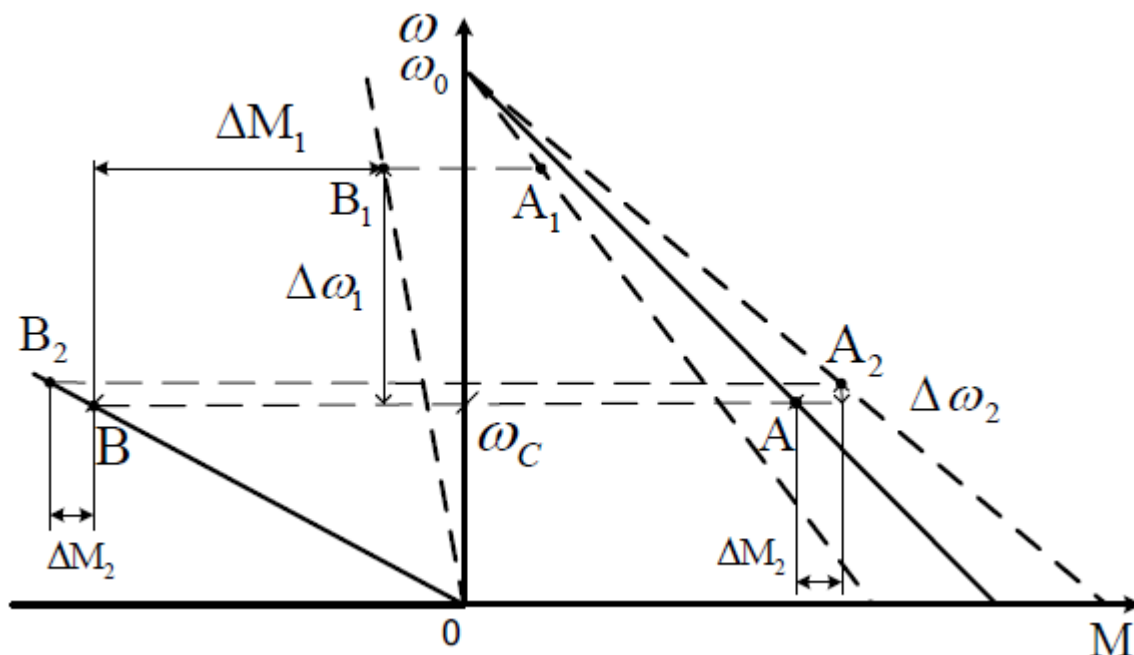


Рисунок 3.16. - Статичні механічні характеристики двох двомашинних агрегатів

На рисунку 3.16 показано початкове положення, коли BM_1 та BM_2 працювали в точці A , NM_1 та NM_2 - в точці B . При різкій зміні опору в ланцюзі якоря NM_1 , вона перейде в точку B_1 , а BM_1 перейде в точку A_1 , при цьому, за рахунок дії електричного зв'язку машин матиме більш «м'яку» механічну характеристику. Якби не було електричного зв'язку роторів машин, то другий двомашинний агрегат не змінив би свого положення на площині механічних характеристик. Але за рахунок дії електричного зв'язку по ланцюгу роторів двигунів, механічна характеристика BM_2 стане "жорсткіше" та BM_2 перейде в точку A_2 , а NM_2 перейде в точку B_2 .

У перехідних режимах при зміні статичного навантаження на валу однієї BM , що супроводжується переходом від однієї швидкості обертання до іншої та зміною моменту, змінюються швидкість і момент другого двомашинного агрегату, який пов'язаний з першим тільки по ланцюгу роторів АДФР. Отримані динамічні характеристики переходу двох двомашинних агрегатів з усталених режимів, зазначених точками A , в усталені режими, відмічені точками A_1 , B_1 і A_2 , B_2 та зворотні переходи агрегатів у вихідне положення, наведені на рисунку Е.3 (додаток Е).

Сигнали струмів в ланцюгах якоря навантажувальних машин постійного

струму знімалися за допомогою датчиків струму, виконаних у вигляді шунтів, подавалися на канали самописного приладу Н-237-5. При незмінному магнітному потоці збудження навантажувальних машин струм якоря машини прямо пропорційний моменту. Сигнали з тахогенераторів, тимчасово встановлених на валах двигунів, подавалися на канали самописного приладу Н-237-5, таким чином записувалися залежності швидкості двигунів від часу. В ході експерименту плавно періодично збільшувався, а потім зменшувався опір в ланцюзі якоря першої навантажувальної машини. Отримані залежності наведені на рисунку И.3 в додатку И, де наведені тимчасові характеристики струмів якорів навантажувальних машин, пропорційних їх моментам, швидкостей двох агрегатів. Ці характеристики відповідають розглянутим статичним характеристикам агрегату (рисунок 3.16).

Таким чином, за рахунок електричного зв'язку двигунів по ланцюгу ротора, випереджаючий двигун має більш «м'яку» механічну характеристику, а відстаючий двигун має більш «жорстку» механічну характеристику, що еквівалентно появі синхронізуючого моменту для асинхронних двигунів з фазним ротором.

Для забезпечення вирівнювання швидкостей обертання роторів АДФР дводвигунного електроприводу в якості загального приймача електричної енергії ковзання обох двигунів може бути використаний не тільки активний резистор, але і інвертор з частотно залежним індуктивно-активним опором, підключеним до його виходу (рисунок 3.7б), а також каскадний блок (рисунок 3.11), що дозволить поліпшити енергетичні показники роботи електроприводу.

Висновок

1. Система ЧКЕ на базі АІН має кращі енергетичні показники, ніж система частотного асинхронного електроприводу на базі того ж АДФР, що працює з закороченим ротором, що обумовлено передачею енергії ковзання в системі ЧКЕ в ланку постійного струму перетворювача частоти і забезпечує зниження до 4% споживаної електроприводом електроенергії з мережі.

2. Система ЧКЕ, виконана на базі АІН з зустрічно-паралельно включеним каскадним вентиляно-трансформаторним блоком, що зв'язує ланцюги статора та ротора, що має скалярну систему частотно-струмового управління, забезпечує прийнятні для ПТМ пускові характеристики зі стабілізацією пускового моменту і виходом на робочу ділянку механічної характеристики.
3. Системи дводвигунного електроприводу із загальною ланкою постійного струму в ланцюгах ротора АДФР мають властивість синхронізації швидкостей двигунів при їх неузгодженні. В якості приймача енергії ковзання двигунів в загальній ланці постійного струму можуть бути застосовані: резистор, інвертор з індуктивно-активним опором на виході, а також каскадний блок.
4. При використанні системи дводвигунного електроприводу із загальною ланкою постійного струму в ланцюгах роторів АДФР підвищується демпфуюча здатність електроприводу при пружному механічному зв'язку між двигунами, максимальні динамічні навантаження в пружному зв'язку знижуються в середньому на 25-30%.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МОСТОВОГО КРАНУ

4.1 Цілі та етапи реалізації стартап-проєкту

На початку розроблення стартап-проєкту доцільно обґрунтувати цілі етапів його реалізації (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Цілі основних етапів реалізації стартап-проєкту

Етапи реалізації стартап-проєкту	Цілі етапів реалізації стартап-проєкту
Початковий етап стартап-проєкту	Дослідження потреб та запитів споживачів, суперечностей та технологічних недосконалостей діючих продуктів-аналогів конкурентного середовища
Етап обґрунтування актуальності інноваційної ідеї	Задоволення нових потреб споживачів, вдосконалення діючих технологій та устаткування
Етап аналізу конкурентного середовища	Виявлення можливих конкурентів-виробників, які виготовляють схоже обладнання або пропонують схожі технології та здійснення порівняльного аналізу техніко-економічних переваг та недоліків реалізації запропонованої ідеї
Етап обґрунтування ресурсного забезпечення проєкту	Визначення необхідних матеріальних, трудових, капітальних ресурсів, ключових процесів, технології, обладнання та реалізації проєкту в часі і просторі
Етап фінансового забезпечення реалізації проєкту	Обґрунтування собівартості та ціни реалізації інноваційної ідеї
Інвестиційний етап реалізації стартап-проєкту	Пошук потенційних інвесторів фінансування стартап-проєкту
Маркетинговий етап реалізації проєкту	Обґрунтування каналів збуту продукту стартап-проєкту, залучення потенційних споживачів, формування необхідних сегментів ринку

4.2 Обґрунтування актуальності та новизни інноваційної ідеї стартап-проєкту

Початковий етап стартап-проєкту спирається на попередні розділи, в яких виявлені та узагальнені наявні суперечності та недосконалості діючих технологій, обладнання, які потребують розвитку, доопрацювання. Водночас, на початковому етапі доцільно виявити та дослідити нові потреби та запити

споживачів означеного виду діяльності. Окреслення нерозв'язаних проблем, виявлених суперечностей дозволить обґрунтувати доцільність їх вирішення за допомогою створеного обладнання або технології.

Обґрунтування інноваційної ідеї зумовлює необхідність окреслення її актуальності для подолання виявлених на попередньому етапі суперечностей, вивчення та характеристики нових потреб і запитів споживачів, які будуть покладені в основу розроблення інноваційної ідеї, технології, обладнання, їх виробництва та продажу в ході реалізації стартап-проєкту. Водночас доцільно охарактеризувати основні переваги пропонованого обладнання або технології, а також вигоди від їх використання споживачами. Результати узагальнені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Актуальність та новизна ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Переваги та вигоди споживача
Сучасна система керування мостовим краном з метою зниження споживання електроенергії в процесі функціонування	Електромашинобудування	Підйом і опускання важких заготовок
	Металургія	Забезпечення плавності керування
	Транспортування (Склади, цехи)	Підвищення ресурсу

4.3. Аналіз конкурентного середовища

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів передбачає:

- визначення кола конкурентів, що вже існують на ринку, та проводиться збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проєкту та проєктів-конкурентів;
- визначення переліку техніко-економічних переваг ідеї.

Результати аналізу узагальнені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Переваги ідеї проєкту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики	Стартап-проєкт	ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат»
1.	Розрахункова продуктивність, т / год		680

2.	Споживання електричної енергії агрегатом, кВт * год	213	211
3.	Сумарна економія електроенергії за рік, кВт * год	457,026	430,521
4.	Річна економія електроенергії в грошовому еквіваленті, тис. грн.	160,36	151,06
5.	Витрати на придбання насосного агрегату тис. грн.	654,5	858,84

Водночас, в ході реалізації стартап-проєкту доцільно здійснити SWOT-аналіз потенційних загроз та можливостей реалізації стартап-проєкту, визначивши сильні та слабкі сторони, а також його можливості та загрози. SWOT-аналіз (табл. 4.4) дозволяє упорядкувати процес формування бізнес-ідеї.

Таблиця 4.4 – Матриця SWOT-аналізу

S (strength) – Сильні сторони	W (weaknesses) – Слабкі сторони
1. Сприяння зростанню чисельності цільових груп споживачів. 2. Можливість постановки задач під широкий спектр застосування. 3. Кращі показники енергетичної ефективності. 4. Автоматизована система управління	1. Рентабельність проєкту. 2. Вузька продуктова лінійка 3. Відставання в використанні інформаційних систем 4. Конкурентноспроможність продукту
O (opportunities) – Можливості	T (threats) – Загрози
1. Обслуговування додаткових груп споживачів. 2. Використання інтернет та e-mail маркетингу для реклами 3. Побудова сильного локального бренду 4. Можливість швидкого розвитку в зв'язку з ростом попиту на ринку	1. Великі фірми, що складають конкуренцію. 2. Залежність від наших співробітників і постачальників, з якими укладені договори. 3. Неможливість швидкого продажу нової технології через її невідповідність технічним умовам виробництва нової техніки.

4.4 Обґрунтування ресурсного забезпечення проєкту

Обґрунтуємо та узагальнимо в табл. 4.5 величину необхідних капіталовкладень на реалізацію стартап-проєкту.

Таблиця 4.5 – Капіталовкладення на реалізацію проєкту

Статті капіталовкладень	Величина, тис. грн.
Прямі матеріальні затрати	
– витрати купівельних комплектуючих виробів	100
Прямі затрати на оплату праці виробничих працівників	

– працівників	заробітна плата виробничих	40
Вартість основних фондів та нематеріальних активів виробничого призначення		
– початкова вартість задіяних у виробничому процесі основних засобів та необоротних нематеріальних активів (разом із транспортуванням, установкою та демонтажем)		50
Інші прями витрати:		
– витрати на дослідження та розробку інноваційних технологій		30
– витрати на послуги сторонніх підприємств (реклама)		5
Загальновиробничі витрати		
– витрати на охорону праці, техніку безпеки		10
Всього капіталовкладень на реалізацію проєкту		235

4.5 Ключові види діяльності та ключові партнери

Для досягнення мети проєкту покладені наступні види діяльності: інноваційна, реалізація та сервіс. Для кожного виду діяльності наведемо опис і результат, які запишемо в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Ключові види діяльності

Назва діяльності	Опис діяльності	Результат діяльності
Інноваційна	Впровадження розробленого методу керування у продукт введений на ринок, наладка параметрів під конкретну ціль	Продукт, пристосований до індивідуальних потреб
Реалізація	Впровадження технології на ринку	Продаж системи та задоволення потреб споживачів
Сервіс	Установка, інструктаж по експлуатації; продажі додаткового або допоміжного обладнання та пристроїв	Взаємодія виконавців і споживачів

На сьогодні на ринку пристроїв автоматизації та енергоефективних технологій для мостових кранів присутня величезна кількість виробників. Вибір пристроїв та засобів цих підприємств залежить від конкретної ситуації, яка пов'язана з умовами в яких перебувають споживачі пропонованої технології, тому окреслити ключових партнерів достатньо складно.

Серед присутніх на ринку виробників пристроїв автоматизації та енергоефективних технологій можна виділити наступні: Siemens, Schneider Electric, Schindler.

4.6 Прямі матеріальні витрати

Відповідно до П(С)БО 16 «Витрати» обґрунтуємо прямі матеріальні витрати на одиницю продукції – витрати на сировину, матеріали, комплектуючі.

Означені витрати узагальнимо в табл. 4.7:

Таблиця 4.7 – Прямі матеріальні витрати

№ п/п	Назва ресурсу	Одиниця вимір.	Ціна	Кількість ресурсу	Потреба на місяць	Потреба на рік
1.	НМА	грн.	2000	5	10 000	120 000
2	Витрати комплектуючих виробів(засобів автоматизації)	грн.	10 000	10	100 000	1200 000
Всього:					110 000	1320

4.7 Інші прямі витрати

До прямих інших прямих витрат належать витрати на дослідження та розробку, послуги сторонніх організацій, комунальні послуги та оренду, кредити та їх обслуговування, втрати від браку з технологічних причин, безнадійної дебіторської заборгованості, операційної курсової різниці, витрати штрафів, пені, утримання об'єктів соціально-культурного призначення тощо. Узагальнимо інші прямі витрати в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Обґрунтування прямих інших витрат

Види послуг	Джерело даних	Вартість послуг, грн.	
		на місяць	на рік
1. Реклама	Угода	5 000	60 000
2. Транспортні витрати	Розрахунки	2 000	24 000
всього:		7 000	84 000

4.8 Умовно-постійні витрати

До умовно-постійних виробничих витрат відносять витрати на обслуговування і управління виробництва, які залишаються незмінними або майже незмінними при зміні обсягів діяльності. До них відносять: амортизаційні відрахування, Фонд оплати праці адміністративно-технічного персоналу з нарахуваннями,

орендну плату підприємства, комунальний податок, збір за забруднення навколишнього природного середовища, витрати на пожежну сигналізацію, тощо. Розрахунок умовно-постійних витрат підприємства записують у табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Умовно-постійні витрати підприємства

Статті витрат	Витрати, тис.грн	
	на місяць	на рік
1. ФОП адміністративно-технічного персоналу	40 000	480 000
2. Реклама	5 000	60 000
всього:	45 000	5400

4.9 Обґрунтування рівня рентабельності інноваційної ідеї

Відповідно до розділу 3 «Податок на прибуток підприємства» Податкового кодексу України, прибуток – це частина валового доходу підприємства (фірми) за винятком усіх витрат на виробничу та комерційну діяльність.

Відносна величина прибутку підприємства характеризується рівнем рентабельності. Рівень рентабельності це співвідношення прибутку до витрат виробництва, розрахованих у відсотках:

$$N_{\text{пр.}} = \frac{П}{ВВ} * 100\%, \quad (4.1)$$

де П – прибуток підприємства, ВВ – валові витрати.

Прибуток – це не арифметична ймовірність, яка визначається лише наприкінці звітного періоду (місяця, кварталу, року). Це специфічна мета підприємства, яка вимірюється кількісно, тому величину прибутку доцільно планувати та визначати з самого початку.

В умовах ринкової економіки величина прибутку повинна відображати відносини власності або інші фінансові зобов'язання, наприклад, оплату дивідендів власникам акцій або залучення кредиту, тощо. Рекомендований розподіл прибутку підприємства за фондами такий:

- фонд розвитку виробництва (ФРВ) – 50%;
- фонд соціального розвитку (ФСР) – 25%;

- преміальний фонд (ПФ) – 10%;
- дивіденди засновникам – 15%

Дані обґрунтування необхідного рівня прибутку інноваційної ідеї, для якої розраховується ціна узагальнюємо в табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування рівня рентабельності товару (послуги)

Статті витрат	Джерело даних	Од. вимір.	Значення показників.
1. Собівартість одиниці продукції	табл. 17	грн.	150 000
Обсяг виробництва в рік	Прогноз		10
2. Необхідний прибуток	п.п.2,1+2,2+2,3+2,4+ 2,5+ 2,6	грн.	3 000 000
2.1. Засоби ФРВ	Колективна угода	грн.	1 500 000
2.2. Засоби ФСР	Колективна угода	грн.	750 000
2.3. Засоби ПФ	Колективна угода	грн.	300 000
2.4. Грошові виплати власникам підприємства	Колективна угода	грн.	450 000
2.5. Фінансовий резерв	$(2.1+2.2+2.3+2.4)*$ $*0.05/0.95$	грн.	157 894
2.6. Податок на прибуток	$(2.1+2.2+2.3+2.4+$ $+2.5)*0.18$	грн.	540 000
3. Необхідний рівень рентабельності продукції	п.2 / п.1*100%	%	50

4.10 Обґрунтування собівартості інноваційної ідеї стартап-проекту

Собівартість інноваційної ідеї складається з умовно-змінних та умовно-постійних (накладних) витрат. Розрахунок собівартості узагальнимо в табл. 4.11.

Таблиця 4.11 – Обґрунтування собівартості товару (послуги), грн.

Статті витрат	Джерела даних	Витрати, тис.грн	
		на місяць	на рік
1. Умовно-змінні витрати	табл. 4.7	110 000	1 320 000
2 Умовно-постійні (накладні) витрати	табл.4.9	45000	540 000
3. Собівартість	стр.1+стр.2	155 000	1860

4.11 Обґрунтування вартості виробництва інноваційної техніки

Враховуючи необхідність наповнення виробничих фондів підприємства, підтримання належного рівня рентабельності, обґрунтуємо вартість обладнання (технології). Зазначимо, що саме податок на додану вартість (ПДВ), який сплачується всіма суб'єктами господарської діяльності відповідно до розділу 5 Податкового кодексу України перетворює вартість товару (послуги) на його ціну. Величина ПДВ становить 20% доданої вартості товару (послуги). Визначимо величину ПДВ та ціни техніки (технології). Узагальнимо результати обґрунтування в табл. 4.12.

Таблиця 4.12 – Обґрунтування вартості та ціни

Статті витрат	Джерело даних	Одиниці вимірювання	Значення показників
1. Собівартість одиниці товару (послуги)	табл. 4.11	грн.	155 000
2. Норма рентабельності	табл. 4.10	%	50
3. «Нормальний» питомий прибуток	п.1 * п.2 / 100%	грн.	77 500
4. Вартість виробництва одиниці продукції	п.1 + п.3	грн.	232 500
5. ПДВ	п.4*0,2	грн.	46 500
6. Відпускна ціна товару (послуги)	п.4+п.5	грн.	279 0

4.12 Цільові групи потенційних споживачів

В обґрунтуванні потенційних споживачів доцільно виявити цільові групи, яким будуть пропонуватися створені технології:

Таблиця 4.13 - Характеристика потенційних клієнтів

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Оптимізація режимів роботи обладнання з метою зменшення витрат електричної енергії	Компанії, роботи яких пов'язана з використанням автоматизованих систем керування складних технологічних комплексів	Відмінності у сферах діяльності компаній, підходи до створення продукції	Легкість застосування, покращення енергетичних показників

4.13 Бізнес-модель проєкту

Розробка стартап-проєкту - це створення бізнес-моделі комерціалізації науково-технічних розробок. Побудова конкурентної бізнес-моделі є ефективним інструментом вирішення поставлених у роботі задач і представляє структуру найважливіших елементів бізнес-проєкту та є джерелом інноваційних ідей і підходів, які можуть бути застосовані в унікальному поєднанні компонентів. В табл. 4.14 представляємо структуру бізнес-моделі інноваційного обладнання або технології.

Таблиця 4.14 – Структура бізнес моделі обладнання (технології)

Ключові партнери Підприємства-виробники і компанії у сфері автоматизації та енергоефективних технологій ООО«Высокие инженерные технологии» Praskom innovation ООО Компания «Интегратор»	Ключові види діяльності <ul style="list-style-type: none"> • Наладка параметрів під конкретну ціль • Впровадження технології на ринку <ul style="list-style-type: none"> • Установка, інструктаж по експлуатації • Продажі додаткового або допоміжного обладнання та пристроїв 	Цінність пропозиції Сучасна система керування мостовим краном з метою зниження споживання електроенергії	Споживчі сегменти <ul style="list-style-type: none"> • Видобувні підприємства • Логістичні фірми • Машинобудівні заводи
	Ключові ресурси <ul style="list-style-type: none"> • Витрати на роботу персоналу • Витрати на комплектуючі вироби 		Канали збуту Прямий канал збуту
Структура собівартості 1.Витрати разові (капітальні): 2350000 2.Витрати постійні: 45000 3.Витрати змінні: 110000		Потоки надходження доходу Активний продаж	

4.14 Аналіз ризиків стартап проєкту

Впровадження та реалізація стартап-проєкту може мати значні ризики, тому необхідно проводити обґрунтування ризиків, які залежать від факторів

невизначеності.

Інноваційні ризики визначаються ймовірністю втрат підприємства від інвестування засобів у виробництво нового обладнання (технологій), які можуть не знайти очікуваного попиту у споживачів на ринку.

Таблиця 4.15 - Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Конкуренція	Поява на ринку кращих рішень від конкурентів	Вдосконалення технічних моментів власного продукту. Пошук нових методів оптимізації методу

Аналіз тенденцій енергозберігаючої політики та енергетичної стратегії в Україні показує, що в умовах ринку посилюється значимість енергозберігаючих технологій в усіх галузях промисловості. У зв'язку з цим, енергоефективне управління підприємством при комплексному методологічному підході до проблеми енергозбереження в цілому має значення для всього народного господарства країни.

Метою стартап-проєкту є підвищення техніко-економічних показників процесів транспортування і зниження електроспоживання комплексом, за рахунок побудови систем управління, які базуються на використанні адекватної моделі комплексу, що враховує його внутрішні зв'язки.

У табл. 4.16 приведені результати підготовки інноваційного стартапу та узагальнюються основні техніко-економічні показники.

Таблиця 4.16 - Узагальнюючі техніко-економічні показники

Показники	Значення
Річний випуск продукції, од.	10
Капіталовкладення, тис. грн.	235
Собівартість продукції, тис. грн.	150
Ціна продукту, тис. грн	300
Прибуток, тис. грн.	150
Рентабельність, %	50
Період повернення капіталовкладень, років	2

ВИСНОВКИ

В результаті проведених в дисертаційній роботі досліджень було вирішено актуальне наукове завдання, що полягає в розробці систем регульованого асинхронного електроприводу з поліпшеною демпфуючою здатністю та енергетичними показниками, адаптованих до умов роботи на механізмах пересування кранів і транспортних візків.

Основні результати, отримані в дисертації, дозволяють сформулювати наступні висновки.

1. Виконаний аналіз сучасних асинхронних електроприводів, що застосовуються на кранових механізмах та перспективних розробках показав можливість поширення нових рішень в області частотного управління із застосуванням коригуючих пристроїв, успішно використовуваних в системах з короткозамкненими двигунами, на системи з двигунами з фазним ротором, які мають додаткові можливості корисною реалізацією енергії ковзання шляхом її передачі в ланку постійного струму перетворювача частоти.
2. Доведено методами структурного аналізу та математичного моделювання результативність впливу на систему управління електроприводом систем корекції, що працюють за принципом визначення різниці швидкостей двигунів або різниці відхилень швидкостей двигунів від швидкості обертання поля статора, вплив яких спрямований на синхронізацію швидкостей двигунів дводвигунного електроприводу, із забезпеченням зниження на 25-30% рівня максимальних динамічних навантажень в пружній електромеханічній системі.
3. Розроблена та досліджена система частотного асинхронного електроприводу з векторним управлінням з нелінійною корекцією взаємного положення, формуючи момент векторних змінних за рахунок регулювання намагнічуючої складової струму статора в залежності величини статичного моменту, що забезпечує зниження споживання струму статора до 6-7% при статичних навантаженнях не перевищують 50% від номінальної.
4. Розроблені та досліджені системи частотно-каскадного електроприводу з

послідовним і паралельним підключенням до перетворювача частоти каскадного блоку, що виконує передачу енергії ковзання двигуна в ланку постійного струму перетворювача частоти, що дозволяє, знизити струм статора в середньому на 4%, в порівнянні з роботою двигуна при замкненому роторі, синтезовані системи їх управління. Для найбільш універсальної системи частотно-каскадного електроприводу з паралельно включеним каскадним блоком з частотно-струмовим управлінням розроблена система корекції сигналу завдання частоти ЕРС ротора в залежності від величини випрямленої вихідної напруги каскадного блоку.

5. Виконано аналіз систем дводвигунного асинхронного електроприводу, що забезпечують синхронізацію швидкостей двигунів, розроблений і досліджений дводвигунний частотно-каскадний електропривод з паралельним підключеним до перетворювача частоти каскадним блоком, що виконує передачу енергії ковзання двигуна в ланку постійного струму перетворювача частоти, а також вирівнювання ЕРС та швидкостей роторів, що забезпечує зниження на 25-30% максимальних динамічних навантажень в електромеханічній системі з пружними зв'язками. Розроблена система частотно-струмового управління з корекцією сигналу завдання частоти ЕРС ротора в залежності від величини випрямленої вихідної напруги каскадного блоку.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Абрамович І. І. Вантажопідйомні крани промислових підприємств: Довідник/ І. І. Абрамович, В. Н., Березін, А. Г. Яуре // м.: Машинобудування. 1989. - 360 с.
2. Александров М. П. Довідник по кранах: в 2 т. Т.1. Характеристики матеріалів і навантажень, основні розрахунки кранів, їх приводів і металевих конструкцій / М.П. Александров, М. М. Гохберг, А. а Ковін та ін. // М.: Машинобудування, 1988. - 536 с.
3. Парницький А.Б. Мостові крани загального призначення / А. Б. Парницький, А. П. Шабанов, А. Г. Лисяков - м.: Машинобудування, 1971. - 352с.
4. Козак С. А. Динаміка мостових кранів / С. А. козак. - М.: Машинобудування, 1968. - 331 с.
5. Керівництво по експлуатації Altivar 71 VW3A3510 V. 2. Schneider Electric, 2008. 48 с.
6. Герасим'юк П. Р. Тиристорний електропривод для кранів / р. п. Герасим'як. - М.; енергія, 1978. - 112с.
7. Тищенко В. Н. Математичний опис та дослідження перехідних процесів багатодвигунного електроприводу з електричним зв'язком асинхронних машин.- Електротехніка. 1978, №7, с.30-33.
8. Унгуру С., Йордан Г. Системи узгодженого обертання асинхронних електродвигунів. - Л.: Енергія, 1971. - 182 с.
9. Браславський І. Я. Про можливості енергозбереження при використанні регульованих асинхронних електроприводів / І. Я. Браславський // Електротехніка. - 1998. №8.- С. 2-6.
10. Maria, G., John A. Optimal efficiency slip-power recovery drive / IEEE Transactions Energy Conversion, vol. 3. № 2. June, 1988.
11. Грузов В. Л. Аналіз та оптимізація алгоритмів управління в частотно регульованих електроприводах з інверторами напруги / В. Л. Грузов, А. Н.

Красильников, А. В. Машкін // Електротехніка. -2000.- №4. С. 15-20.

12. Зобов І. Б. Сім відмінностей перетворювачів частоти та систем частотного регулювання / І. Б. Зобов, Є. А. Кисельова // Теплоенергоєфективні технології. - 2007. - № 2. - С. 11-18.

13. Жемеров Г. Г. Тиристорні перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком / Г. Г. Жемеров // - м.: енергія, 1977. - 280 с.

14. Гречко Е. Н. Автономні інвертори модуляційного типу / Е. Н Гречко, Тонкаль В. Є. - Київ : Наук. думка. – 1983. - 304 с.

15. Мещеряков В. Н. Автоматизований електропривод з релейним регулюванням вхідного струму інвертора та фазних струмів статора / В. Н. Мещеряков, О. В. Крюков, В. Н. Воейков, Д. В. Ласточкін // Автоматизація та ІТ в енергетиці. 2019. № 6 (119). - С. 4-8.

16. Биков Ю. Г. Жорсткість тягової характеристики асинхронного двигуна з урахуванням прискорення ротора при зриві зчеплення / Ю. Г. Биков, А. Л, Лувішіс // Електротехнічна промисловість. Сер. Тягове та підйомно-транспортне електрообладнання, 1984, № 6/86.- С. 1-3.

17. Герасим'як Р. П. Електроприводи кранових механізмів / Р. П. Герасим'як, В. А. Парал. - М. Енергія, 1970. - 136 с.

18. Рапутов Б.М. Електрообладнання кранів металургійних підприємств / Б. М. Рапутов. - М.: Металургія, 1990. - 272 с.

19. Браславський І. Я. Енергозберігаючий асинхронний електропривод / І. Я. Браславський, З. Ш. Ішматов, В. Н. Поляков - м.: Академія. - 2004.- 256 с.

20. Герасим'як Р. П. Тиристорний електропривод для кранів / Р. П. Герасим'як. - М.; енергія, 1978-112с.

21. Рабинович А. А. Кранове електрообладнання. Довідник / А. А. Рабинович. - М.; Енергія, 1979. - 240с.

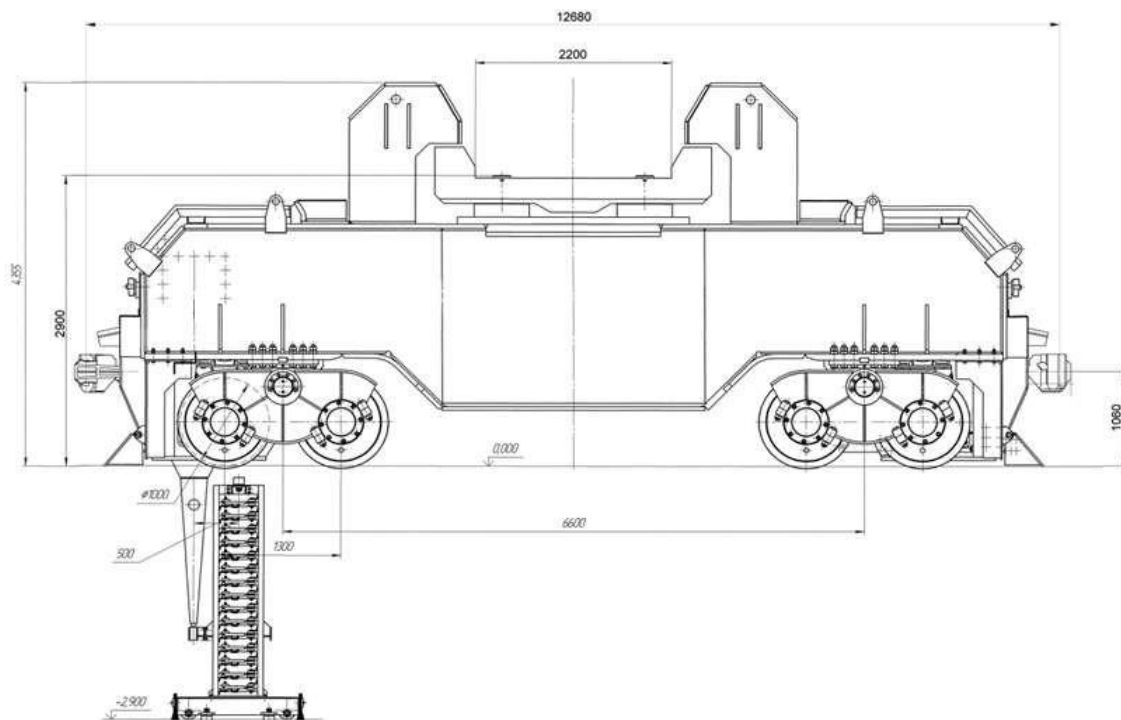
22. Ільїнський Н. Ф. Перспективи розвитку регульованого електроприводу / Н. Ф. Ільїнський // Електрика. – 2003. – № 2-с. 2-7.

23. Виноградов А. Б. Нова серія високоякісних адаптивно-векторних

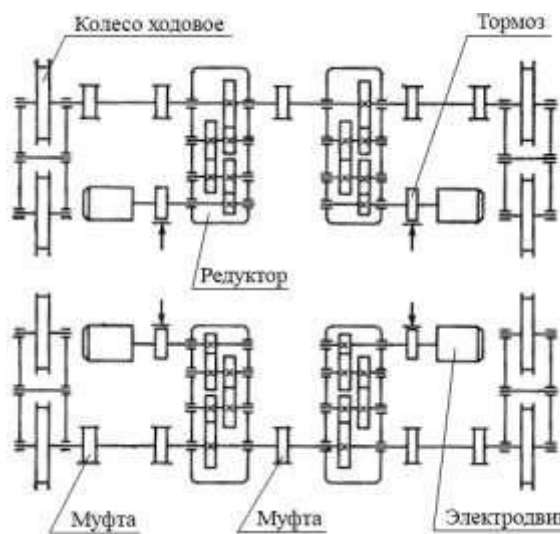
- асинхронних електроприводів з IGBT інвертором напруги / А. Б. Виноградов, І.Ю. Колодін, Д. А. Монон // Електромеханіка, 2003, №1. - С. 31 - 41.
24. Симаков Г. М. Порівняльна оцінка роботи асинхронної машини в умовах мінімізації реактивної потужності / Г. М. Сімаков, Ю. П. Філюшов // Електротехніка. - 2017. - №2. - С. 8-15.
25. Волков А. В. Втрати потужності асинхронного двигуна в частотно-керуваних електроприводах з широтно-імпульсної модуляцією. Електротехніка. 2002, № 8. - С. 2-9.
26. Довідник з автоматизованого електроприводу / під ред. В. А. Єлісєєва, А. В. Шинянського. - М: Энергоатомиздат, 1983, 616 с.
27. Дьяконов В. Matlab 6/6.1/6. 5 + Simulink 4/5 в математиці та моделюванні // м.: Солон-Прес, 2003 – 576 с.
28. Мещеряков В. Н. Системи плавного пуску асинхронного двигуна з фазним ротором / В. Н. Мещеряков, А. І. Бойков, Д. В. Ласточкін // Електротехнічні системи та комплекси. 2019. № 1. (42). С. 24-29.
29. Мещеряков В. Н. Вентильно-ємнісна система стабілізації струму для електродугової установки / В. Н. Мещеряков, А. М. Євсєєв, О. В. Данилова, Д. В. Ласточкін // Електротехнічні системи та комплекси. 2019. № 3 (44). - С. 63-67.
30. Герман-Галкін С. Г. Комп'ютерне моделювання напівпровідникових систем MATLAB 6.0 / С. Г. Герман-Галкін. - м.: КОРОНА. – принт-2001. -320 с.

ДОДАТКИ ДОДАТОК А

Підійомно-транспортні механізми, що переміщуються по рейковому шляху



а



б



в

Рисунок А.1 - Транспортні механізми, що переміщуються по рейсовому шляху: а - загальний вигляд сталевоза ; б - кінематична схема ходової частини сталевоза; в - електропередавальний міст

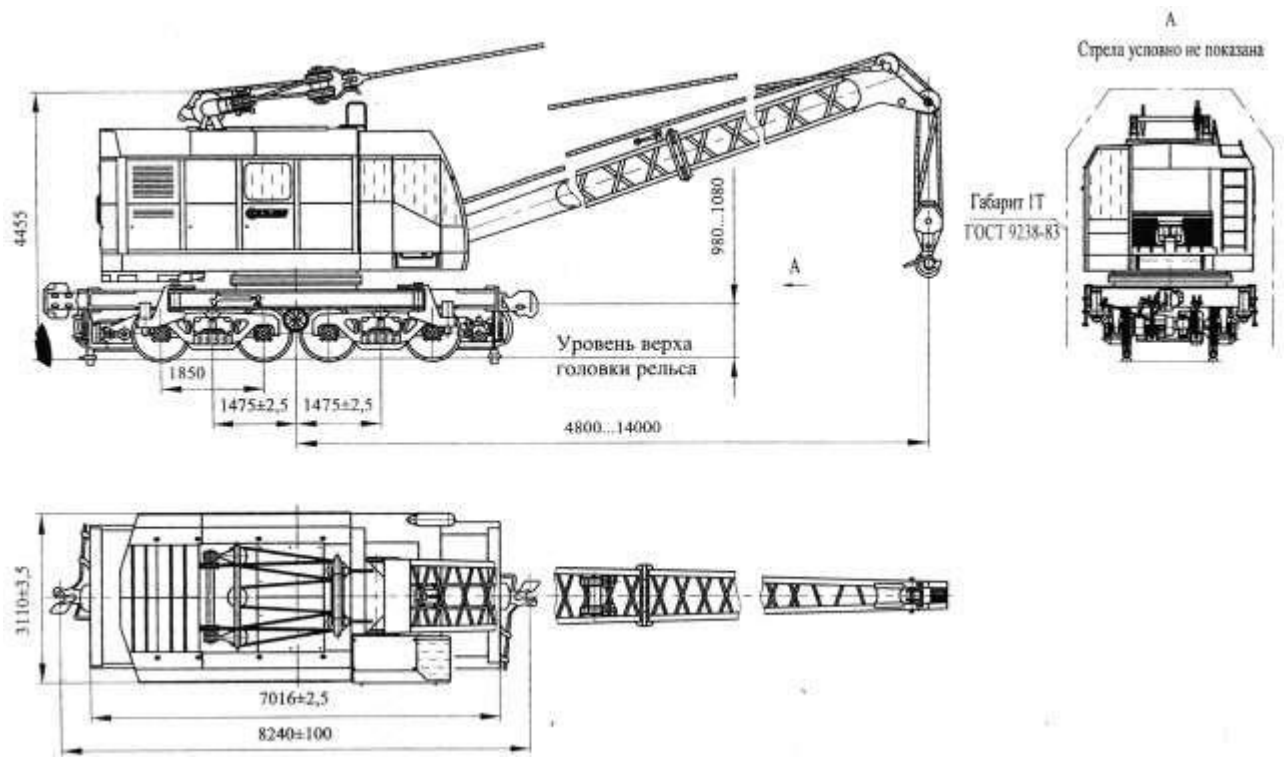


Рисунок А.2 - Загальний вигляд залізничного крана КЖ – 462

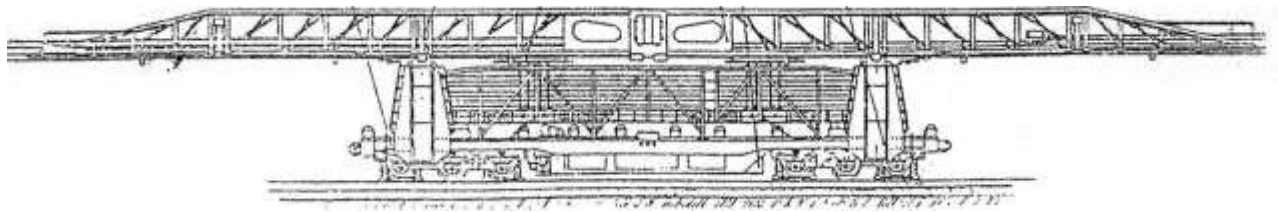


Рисунок А.4 - Загальний вигляд укладального крана УК-25/9-18

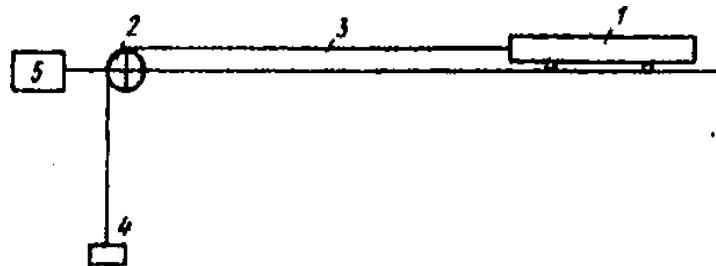


Рисунок А.5 - вантажний візок для вертикального переміщення вантажу

ДОДАТОК Б

Перетворення структурних схем

Правило Мейсона дозволяє визначити передавальну функцію між будь-якими змінними структурної схеми:

$$W(p) = \frac{\overline{M_S}(p)}{w_0(p)} = \frac{\sum [W_i(p) \cdot \Delta_i(p)]}{\Delta(p)},$$

де $\Delta(p)$ - характеристичний многочлен системи,

$$\Delta(p) = 1 - \sum W_{K1}(p) + \sum W_{K2}(p) - \sum W_{K3}(p) + \dots,$$

$\sum W_{K1}(p)$ - сума передач всіх контурів;

$\sum W_{K2}(p)$ - сума добутку передач не торкаючись один одного пар контурів;

$\sum W_{K3}(p)$ - сума добутку передач не стосуються один одного трійок контурів;

$W_i(p)$ - передача і-го прямого шляху від вхідної змінної до вихідної;

$$\Delta_i(p) = 1 - \sum W_{iK1}(p) + \sum W_{iK2}(p) - \sum W_{iK3}(p) + \dots,$$

$\sum W_{iK1}(p)$ - сума передач всіх контурів, що не стосуються і-го прямого шляху;

$\sum W_{iK2}(p)$ - сума добутків передач всіх пар контурів, що не стосуються і-го прямого шляху та один одного;

$\sum W_{iK3}(p)$ - сума добутків передач всіх трійок контурів, що не стосуються і-го прямого шляху і т. д.

ДОДАТОК В

Комп'ютерні моделі двомасової пружної однодвигунної ЕМС

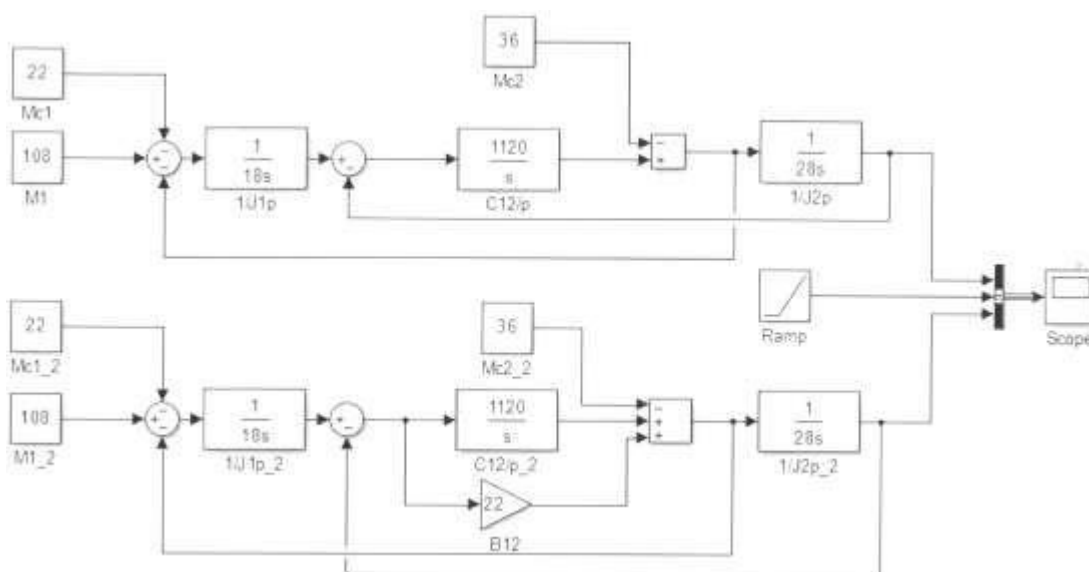


Рисунок В.1 - Схема моделі двомасової однодвигунної ЕМС

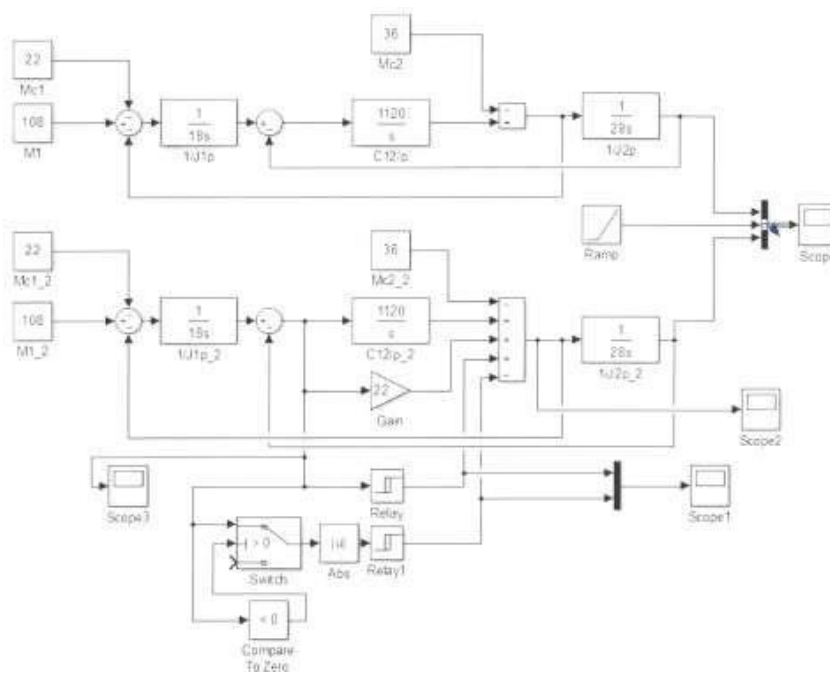


Рисунок В.2 - Схема моделі двомасової однодвигунної ЕМС з НЗ $\Delta\omega$

Таблиця В.1

Параметри двомасової однодвигунної системи

J_1 $\text{Н}\cdot\text{М}/\text{с}^2$	J_2 $\text{Н}\cdot\text{М}/\text{с}^2$	C_{12}	q
18	18 - 25	$1,12 \cdot 10^3$	1 - 10

схема; б - алгоритм роботи тиристора 18

Математичний опис роботи логічних блоків схеми (рисунок Г.1).

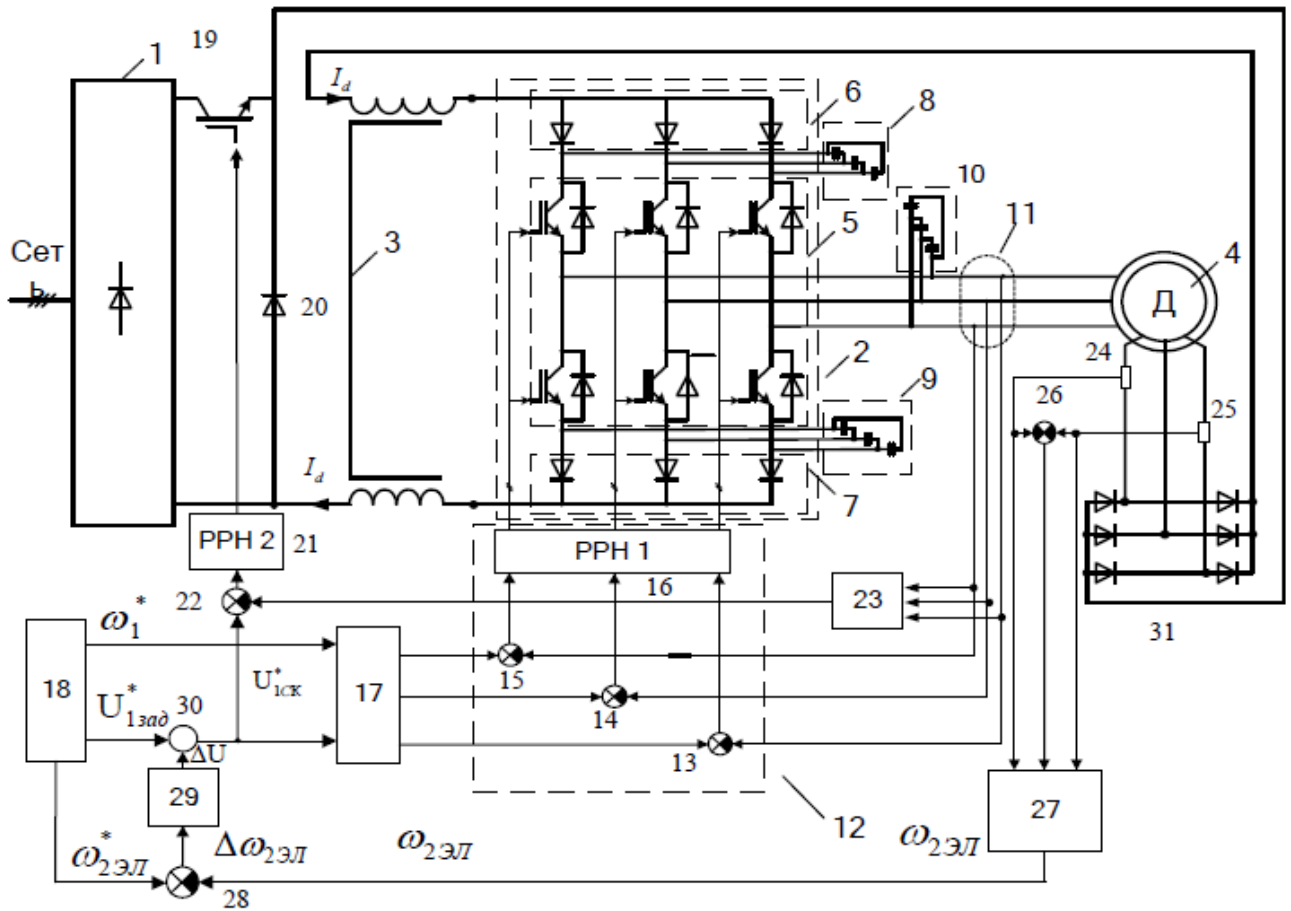


Рисунок Г.2 - Функціональна схема ЧКЕ на базі АТ з РРН і комутатором в ланці постійного струму

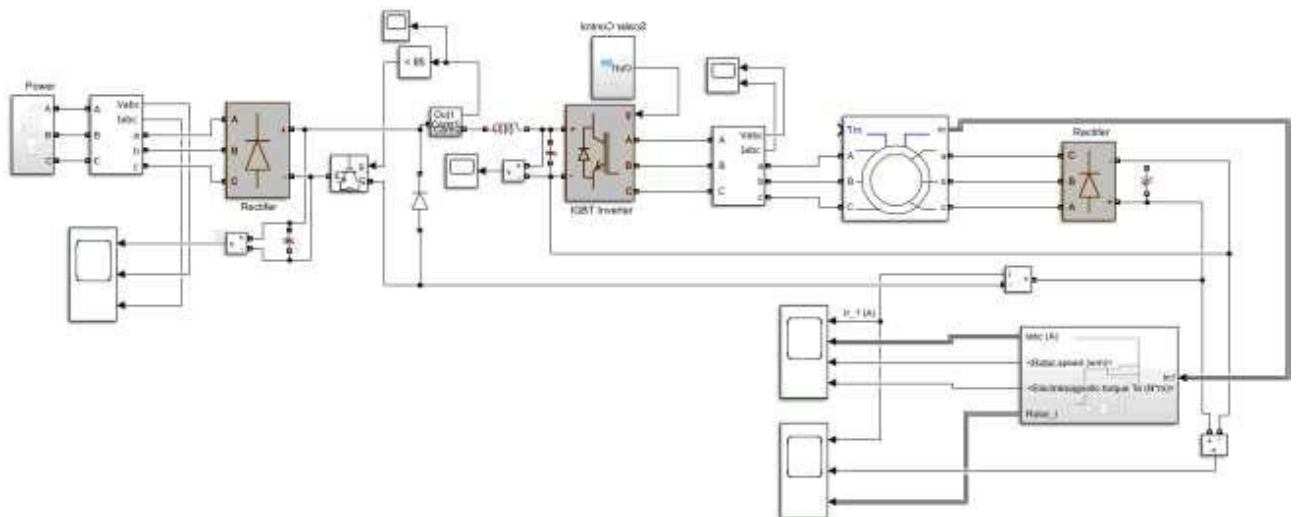
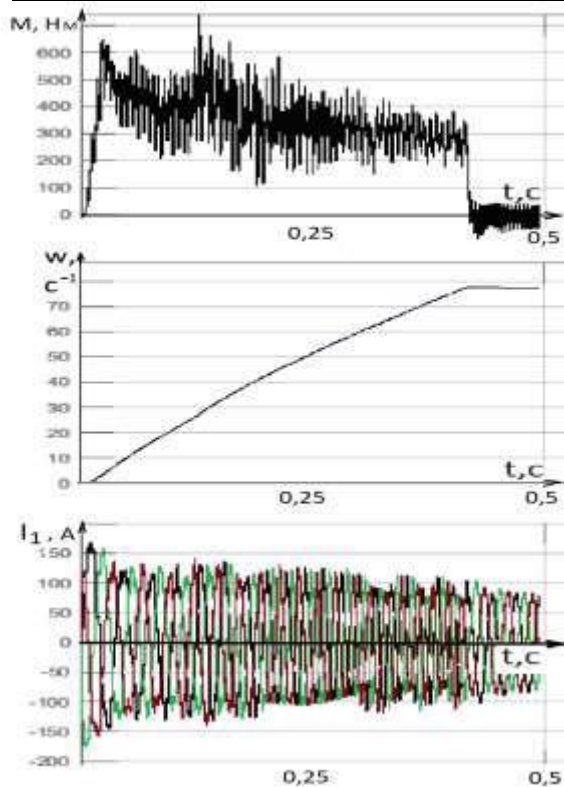


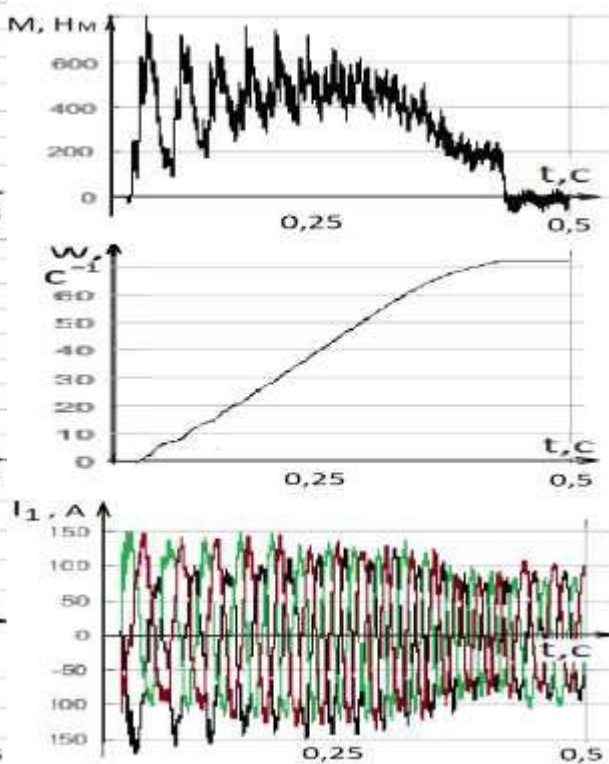
Рисунок Г.3 - Комп'ютерна модель ЧКЕ ТВ на базі АТ з комутатором для схеми (рисунок 4.2)

Таблица Г.2

$P_H,$ кВт	$n_H,$ об/мин	$M_M /$ M_H	\cos φ	$I_c,$ А	$R_c,$ Ом	$X_c,$ Ом	$I_p,$ А	$\Gamma_p,$ Ом	$X_p,$ Ом	k_e	$J,$ кгм ²
30	725	3,0	0,74	71,6	0,186	0,225	74,3	0,059	0,17	1,41	1,42



а



б

ДОДАТОК Д

Комп'ютерна модель дводвигунної системи ЧКЕ з електричним каскадним зв'язком і механічним пружним зв'язком двигунів

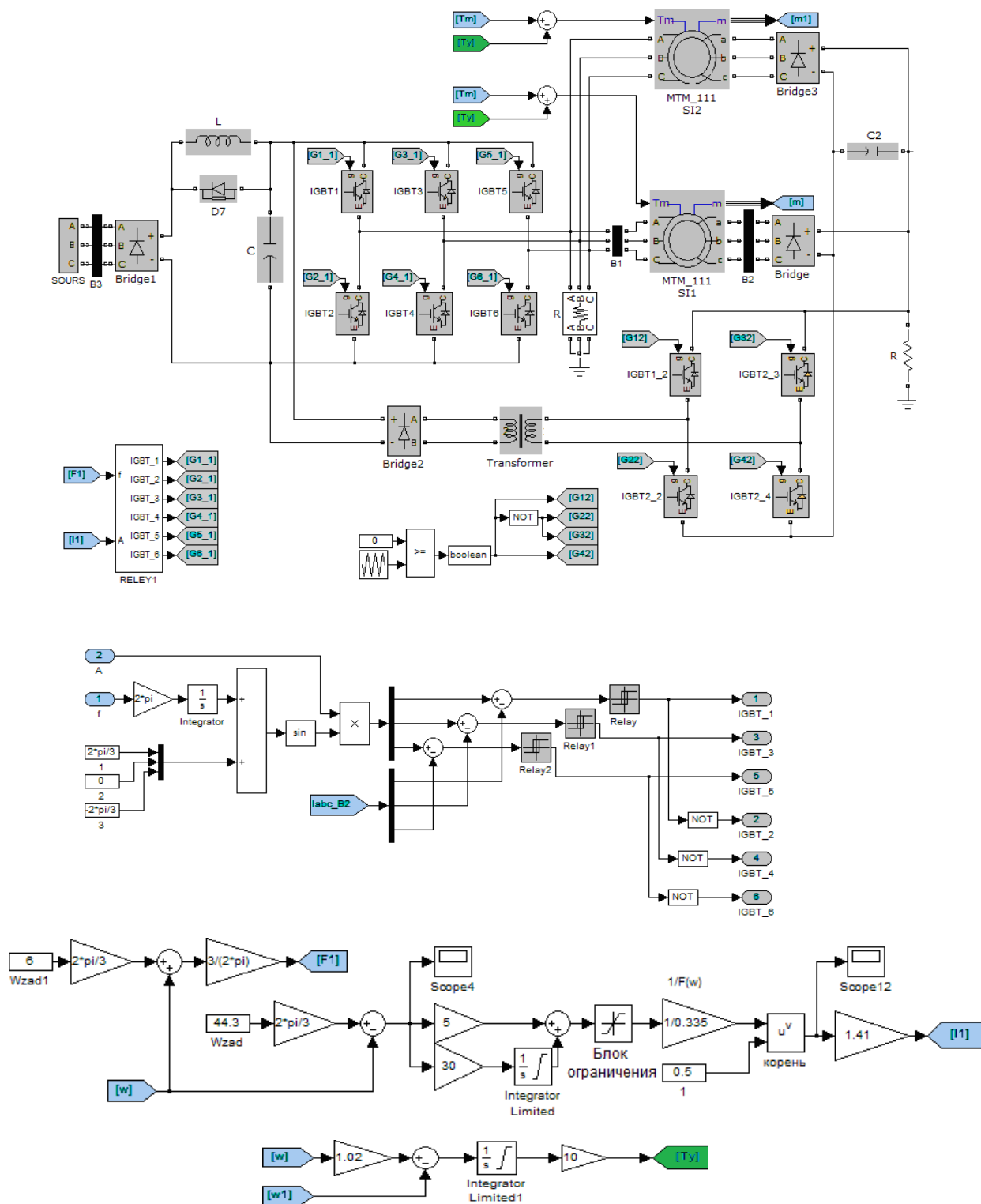
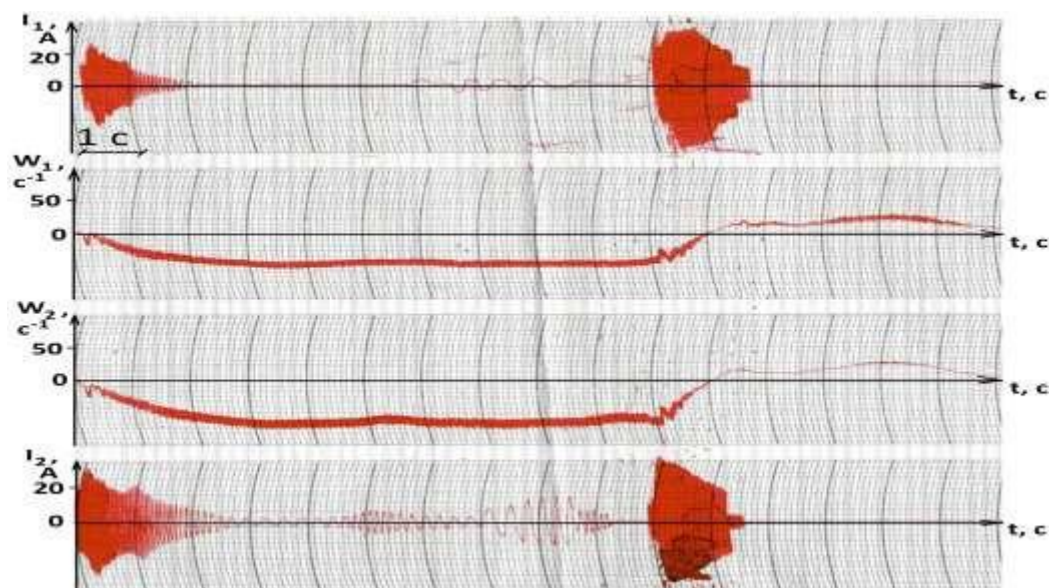


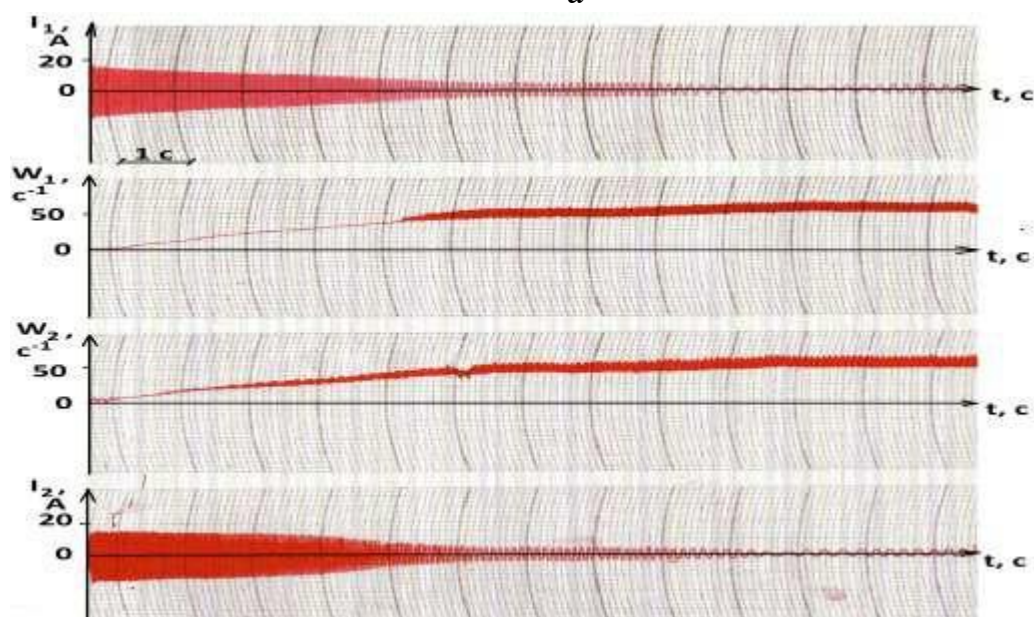
Рисунок Д.1 - Схема моделі дводвигунного ЧКЕ з пружним зв'язком двигунів в пакеті прикладних програм MATLAB Simulink

ДОДАТОК Е

Експериментальні динамічні характеристики систем дводвигунного асинхронного електроприводу із загальним вентиляно-резисторним блоком

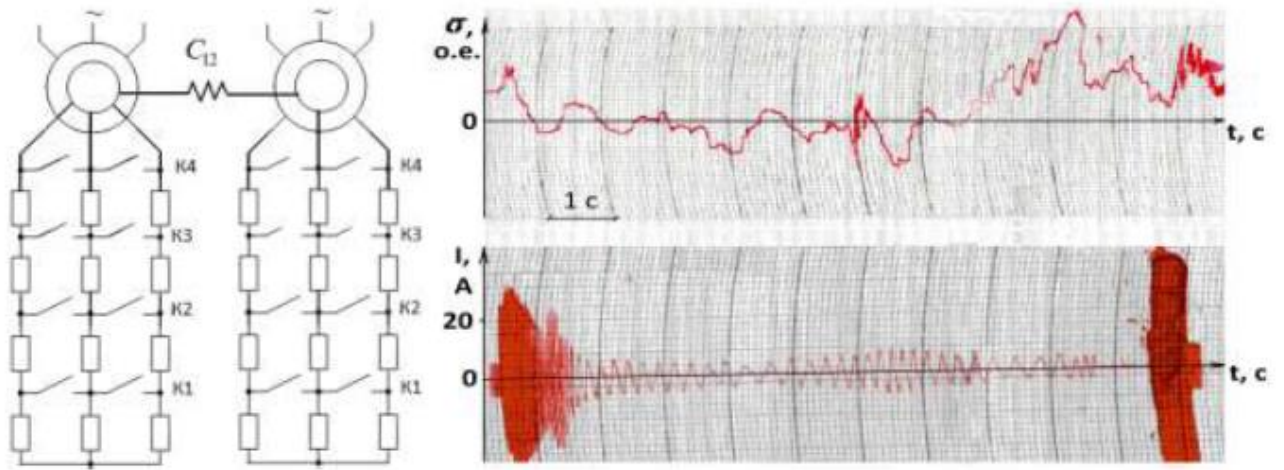


а

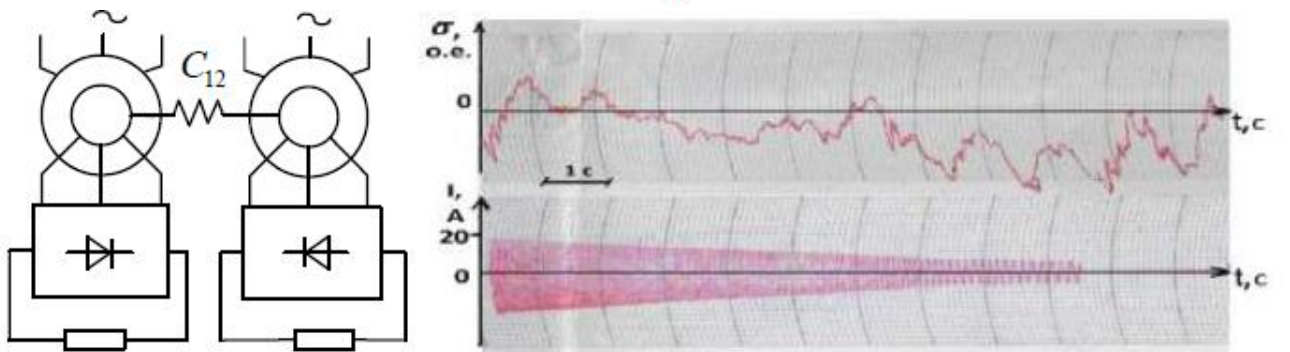


б

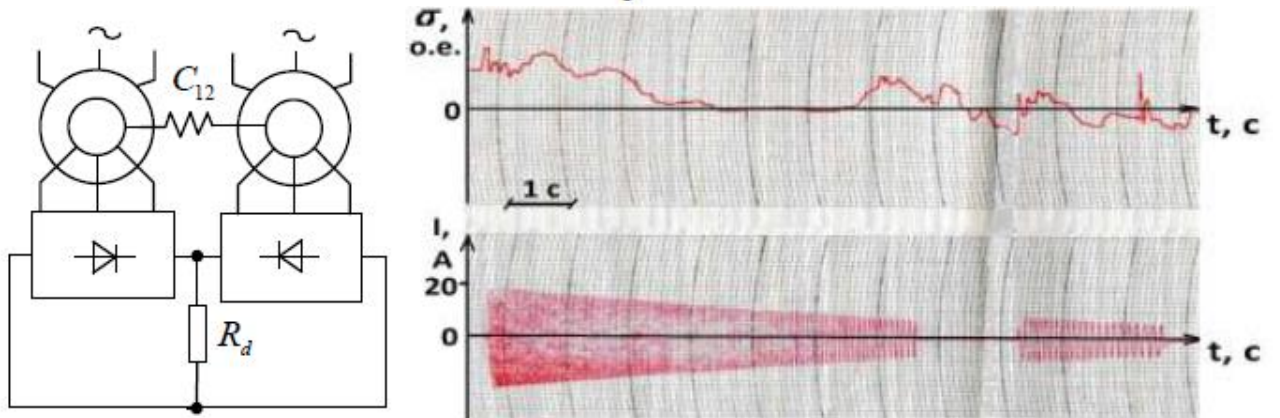
Рисунок Е.1 - Зміна в часі струмів роторів і швидкостей двох асинхронних двигунів механізму пересування крана: а – з ручним силовим контролером, що перемикає пускові резистори; б - зі схемою з діодними випрямлячами та загальним резистором в ланцюзі ротора



а



б



в

Рисунок Е.2. Схеми управління механізмом пересування крана, тимчасові діаграми тензор зусиль при вигині пролітної балки і струму ротора одного АДФР: а - з ручним силовим контролером, що перемикає пускові резистори; б - з діодними випрямлячами і незалежними резисторами в ланцюзі ротора; в - з діодними випрямлячами і загальним резистором в ланцюзі ротора

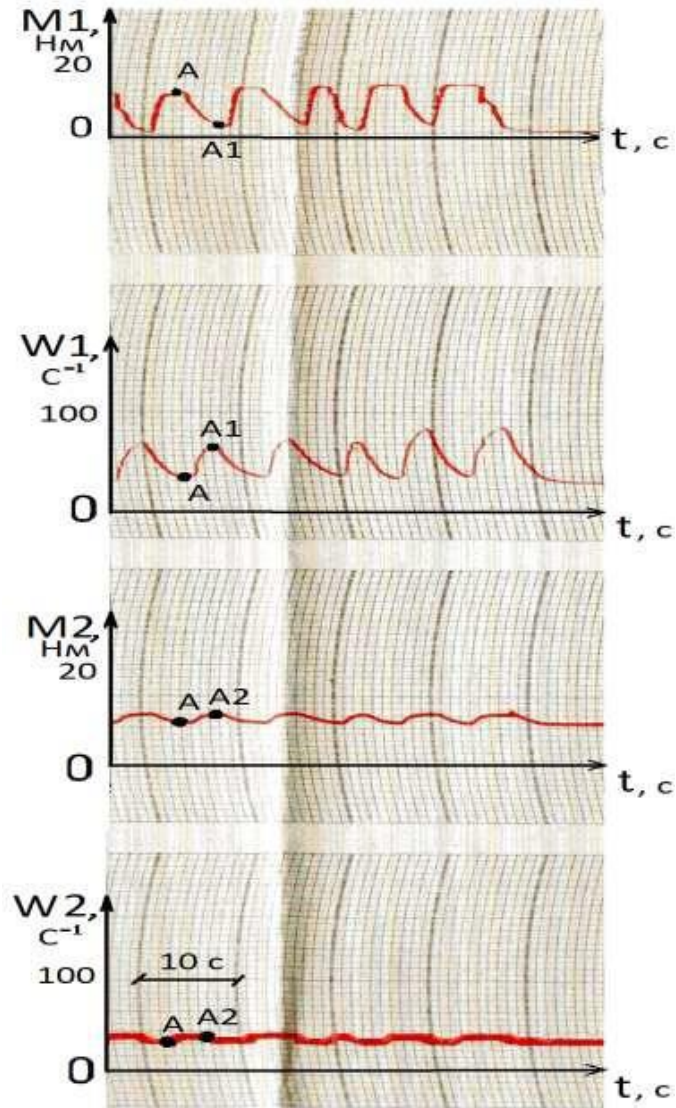


Рисунок Е.3. Динамічні характеристики двох двомашинних агрегатів, отримані на випробувальному стенді

Точками А, А1, А2 позначені координати випробовуваних АДФР, відмічені на графіках статичних механічних характеристик (рисунок 4.17).

У кожній із зазначених точок швидкості випробовуваних машин рівні швидкості відповідних навантажувальних двигунів, моменти випробовуваних машин рівні по модулю моментам відповідних навантажувальних машин, але мають протилежний знак.

Для зручності аналізу на рисунку Е.3 позначені моменти випробовуваних АДФР, хоча фактично записувалися моменти навантажувальних машин.