МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Таврійський національний університет
імені В.І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра Інженерних систем та технологій

На правах рукопису

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

АДАПТИВНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА МОСТОВОГО КРАНА

Здобувача вищої освіти
Янголя Олексія Олександровича
Освітня програма
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(Спеціальність
174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»)

_____
(підпис)

Науковий керівник:
д.т.н., професор Селюков В.О.

_____
(підпис)

Національна шкала_____
Кількість балів_____
Оцінка: ECTS

Київ – 2026

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра Інженерних систем та технологій
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри
_____Наталія ОМЕЦИНСЬКА
«____» _____2025_року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Янголя Олексія Олександровича

1. Тема роботи: Адаптивна система автоматичного керування режимами роботи електропривода мостового крана_____

керівник роботи: _д.т.н., професор Селюков О.В._____
затверджені Наказом ТНУ імені В.І Вернадського:

від «7 » листопада 2025 № 138/1-ОД

2. Строк подання студентом роботи: 15.05.2026_____

3. Вихідні дані до роботи: електромеханічна система механізму пересування мостового крана з урахуванням пружних зв'язків, дводвигунний асинхронний електропривод на базі двигунів з фазним ротором типу МТ 012-6, адаптивна система частотно-каскадного електроприводу на базі автономного інвертора напруги.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Проаналізувати стан існуючих досліджень електромеханічних систем з пружними зв'язками та обґрунтувати доцільність застосування перспективних систем регульованого асинхронного електроприводу на мостових кранах; Розробити математичний опис, дослідити динамічні властивості двомасової пружної електромеханічної системи; Обґрунтувати доцільність побудови автоматизованих систем та провести експериментальні дослідження їх динамічних процесів; Розглянути вимоги до охорони праці та алгоритми дій в умовах надзвичайних ситуацій.

5. Перелік графічного матеріалу: графічна робота виконана у вигляді мультимедійної презентації_____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	професор Олександр СЄЛЮКОВ		
Розділ 2	професор Олександр СЄЛЮКОВ		
Розділ 3	професор Олександр СЄЛЮКОВ		
Розділ 4	професор Олександр СЄЛЮКОВ		

7. Дата видачі завдання _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	*Назва етапів бакалаврської роботи*	*Термін виконання етапів роботи*	*Заключний документ етапу*
1	Вибір теми бакалаврської роботи, призначення керівника	до 31.10.2025	Затвердження переліку тем бакалаврських робіт
2	Пошук і відбір літератури по темі роботи, складання плану бакалаврської роботи	до 14.12.2025	Список літературних джерел, план роботи
3	Визначення об’єкта, предмета, мети, завдань та методів дослідження, написання вступу до теми бакалаврського дослідження	до 25.01.2026	Текст вступу
4	Написання тексту бакалаврської роботи відповідно до її структури:	26.01.2026-17.05.2026	Текст розділів
	4.1 I розділ	26.01.2026-6.03.2026	Текст розділу
	4.2 II розділ	9.03.2026-27.03.2026	Текст розділу
	4.3 III розділ	30.03.2026-17.04.2026	Текст розділу
	4.4 IV розділ	20.04.2026-8.05.2026	
5	Підготовка графічних матеріалів чи іншого унаочнення	11.05.2026-15.05.2026	Роздатковий матеріал, презентація
6	Оформлення кінцевого списку використаних джерел та додатків	11.05.2026-15.05.2026	Список літературних джерел
7	Оформлення та попередній захист бакалаврської роботи	18.05.2026-22.05.2026	Бакалаврська робота, рішення кафедри про допуск до захисту
8	Внесення коректив та кінцеве редагування бакалаврської роботи	25.05.2026-29.05.2026	Бакалаврська робота
9	Реєстрація бакалаврської роботи на кафедрі	1.06.2026-5.06.2026	Бакалаврська робота внесена до журналу реєстрації випускових робіт
10	Захист бакалаврської роботи	10.06.2026-28.06.2026	Рішення Екзаменаційної комісії про захист

АНОТАЦІЯ

Янголь О. О. Адаптивна система автоматичного керування режимами роботи електропривода мостового крана. – Рукопис.

Кваліфікаційна бакалаврська робота за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, Київ, 2026 рік.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено динамічні процеси в електромеханічних системах механізмів пересування мостових кранів з урахуванням пружних зв'язків. Розроблено математичні моделі двомасової дводвигунної системи та синтезовано алгоритми перехресної корекції швидкостей. Запропоновано використання автоматизованої системи частотно-каскадного електроприводу на базі асинхронних двигунів з фазним ротором із зустрічно-паралельним каскадним блоком. Доведено, що впровадження загальної ланки постійного струму та зворотних зв'язків за різницею швидкостей забезпечує надійну синхронізацію тягових двигунів, ефективно демпфує пружні коливання, знижуючи максимальні динамічні навантаження на 25–30%, та зменшує енергоспоживання з мережі до 4%. Практичне значення полягає у можливості промислового впровадження розробленої системи для підвищення енергоефективності, плавності ходу та надійності роботи підйомно-транспортних машин.

Об’єкт дослідження – процес керування електромеханічною системою механізму пересування мостового крана з урахуванням пружних зв'язків.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та автоматизовані системи керування двомасовими дводвигунними електроприводами на базі асинхронних двигунів з фазним ротором.

Мета роботи – розробка, теоретичне обґрунтування та експериментальне дослідження адаптивної системи автоматичного керування дводвигунним електроприводом мостового крана для зниження динамічних навантажень у пружних елементах та підвищення енергоефективності.

Методи дослідження – системний аналіз, математичне моделювання, методи теорії автоматичного керування, комп’ютерна симуляція, фізичний експеримент на лабораторному стенді.

Ключові слова: електропривод, мостовий кран, асинхронний двигун з фазним ротором, частотно-каскадне керування, пружні зв'язки, демпфування коливань, математичне моделювання.

ABSTRACT

Yangol O. O. Adaptive system for automatic control of operating modes of the electric drive of a bridge crane. – Manuscript.

Qualification bachelor's thesis in specialty 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics". – V.I. Vernadsky Tavrichesky National University, Kyiv, 2026.

In the bachelor's qualification work, dynamic processes in electromechanical systems of bridge crane movement mechanisms were investigated, taking into account elastic connections. Mathematical models of a two-mass two-motor system were developed and algorithms for cross-speed correction were synthesized. The use of an automated system of a frequency-cascade electric drive based on asynchronous motors with a phase rotor with a counter-parallel cascade block was proposed. It is proven that the introduction of a common DC link and feedbacks based on the speed difference ensures reliable synchronization of traction motors, effectively dampens elastic oscillations, reducing maximum dynamic loads by 25–30%, and reduces power consumption from the network by up to 4%. The practical significance lies in the possibility of industrial implementation of the developed system to increase energy efficiency, smoothness and reliability of lifting and transport machines.

The object of research is the process of controlling the electromechanical system of the bridge crane movement mechanism taking into account elastic connections.

The subject of research is methods, algorithms and automated control systems for dual-mass dual-motor electric drives based on asynchronous motors with a phase rotor.

The purpose of the work is to develop, theoretically substantiate, and experimentally study an adaptive automatic control system for a two-motor electric drive of a bridge crane to reduce dynamic loads in elastic elements and increase energy efficiency.

Research methods – system analysis, mathematical modeling, methods of automatic control theory, computer simulation, physical experiment on a laboratory stand.

Keywords: electric drive, bridge crane, asynchronous motor with phase rotor, frequency cascade control, elastic couplings, vibration damping, mathematical modeling.

ЗМІСТ

ВСТУП…….....08
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ТА АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ МОСТОВИХ КРАНІВ.....11
1.1 Огляд досліджень електромеханічних систем з пружними зв'язками механізмів пересування мостових кранів…….…….....11
1.2 Огляд перспективних для застосування на механізмах пересування кранів та транспортних візків систем регульованого асинхронного електроприводу……17
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕСУВАННЯ КРАНА……..34
2.1 Автоматизовані системи частотного та частотно-каскадного електроприводу на базі асинхронного двигуна з фазним ротором……...34
2.2 Математичний опис та основні властивості двомасової ЕМС з дводвигунним електроприводом……...……...……50
2.3 Корекція динамічних характеристик двомасової ЕМС з дводвигунним електроприводом…….....54
РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ОДНОДВИГУННОГО ТА ДВОДВИГУННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ…….....64
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ……..70
4.1 Організація та ергономіка робочого місця розробника системи..……..70
4.2 Забезпечення оптимальних параметрів світлового середовища..…….……..71
4.3 Безпека життєдіяльності та дії в умовах надзвичайних ситуацій…….....73
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК……..……..……..76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……...…….....78

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

Актуальність теми. Сучасні промислові та металургійні підприємства неможливо уявити без інтенсивного використання підйомно-транспортного обладнання, серед якого провідне місце займають мостові крани. Особливістю електромеханічних систем (ЕМС) таких механізмів є значні габаритні розміри, великі маси рухомих елементів та скінченна жорсткість металоконструкцій (наявність пружних механічних зв'язків). Під час пуско-гальмівних режимів роботи та при зміні навантажень у цих пружних елементах виникають інтенсивні коливальні процеси. У поєднанні з несиметричністю керуючих впливів у дводвигунних електроприводах це призводить до небезпечного перекосу моста крана, підвищеного зносу ходових коліс і підкранових колій, а також до зниження загальної надійності механізму.

На сьогодні значна частина експлуатованих мостових кранів оснащена морально застарілими системами реостатно-контакторного керування на базі асинхронних двигунів з фазним ротором (АДФР). Такі системи характеризуються вкрай низькою енергоефективністю через безповоротне розсіювання енергії ковзання у вигляді тепла на пускових резисторах, а також не здатні забезпечити необхідну плавність ходу та достатнє демпфування коливань. З огляду на світові тенденції до ресурсозбереження та автоматизації, нагальною потребою є модернізація приводів кранових механізмів шляхом впровадження сучасних адаптивних систем керування. Особливо перспективним напрямком є створення гібридних частотно-каскадних електроприводів (ЧКЕ) із застосуванням перехресних зворотних зв'язків, що дозволяє не лише рекуперувати енергію ковзання, але й автоматично синхронізувати роботу тягових двигунів. Тому тема розробки адаптивної системи автоматичного керування режимами роботи електропривода мостового крана є своєчасною, науково обґрунтованою та має високе практичне значення.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є розробка, теоретичне обґрунтування та експериментальне дослідження адаптивної системи автоматичного керування дводвигунним електроприводом мостового

крана для зниження динамічних навантажень у пружних елементах та підвищення загальної енергоефективності механізму.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано та вирішено такі основні завдання:

1. Проаналізувати стан існуючих досліджень електромеханічних систем із пружними зв'язками та обґрунтувати доцільність застосування перспективних систем регульованого асинхронного електроприводу на кранових механізмах.

2. Розробити математичний опис та дослідити динамічні властивості двомасової пружної електромеханічної системи з дводвигунним електроприводом.

3. Синтезувати алгоритми корекції динамічних характеристик (негативні зворотні зв'язки за різницею швидкостей) для ефективного демпфування коливань та запобігання перекосу моста.

4. Обґрунтувати архітектуру та розробити автоматизовану систему частотно-каскадного електроприводу на базі АДФР із загальною ланкою постійного струму в колах роторів.

5. Провести комп'ютерне моделювання та фізичні експериментальні дослідження динамічних процесів в ЕМС для підтвердження дієвості запропонованих алгоритмів та вентильно-резисторної системи вирівнювання електрорушійних сил (ЕРС).

6. Розробити комплекс заходів з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях для робочого місця інженера-розробника систем автоматизації.

Об’єкт дослідження – процес керування електромеханічною системою механізму пересування мостового крана з урахуванням впливу пружних механічних зв'язків.

Предмет дослідження – математичні моделі, алгоритми корекції та автоматизовані системи керування двомасовими дводвигунними електроприводами на базі асинхронних двигунів з фазним ротором.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань у роботі використано комплексний підхід, що базується на положеннях теорії автоматичного керування (ТАК), теорії електропривода та теоретичної

механіки. Синтез структурних схем здійснювався із застосуванням методів еквівалентних структурних перетворень та правила Мейсона. Аналіз динамічних процесів виконано методами математичного та імітаційного моделювання. Адекватність розроблених математичних моделей та ефективність запропонованих алгоритмів керування підтверджено шляхом проведення фізичного експерименту на спеціалізованому лабораторному стенді із застосуванням методів осцилографування перехідних процесів.

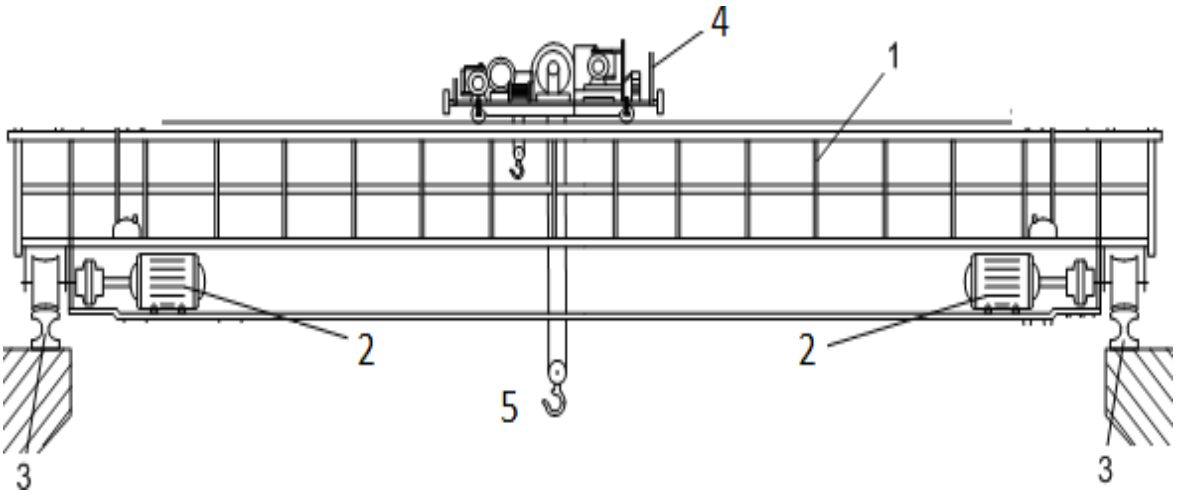
Практичне значення отриманих результатів. Запропонована адаптивна система автоматичного керування (ЧКЕ) дозволяє здійснити глибоку модернізацію існуючого парку мостових кранів без заміни самих тягових двигунів (АДФР). Впровадження розроблених контурів корекції забезпечує жорстку синхронізацію швидкостей дводвигунного приводу, що знижує пікові динамічні навантаження на 25–30% та усуває ризик перекосу кранового моста. Застосування зустрічно-паралельного каскадного блоку дає змогу рекуперувати до 4% електроенергії під час пускових режимів. Результати роботи можуть бути використані проектними організаціями та промисловими підприємствами при створенні сучасних енергоефективних систем автоматизації підйомно-транспортних машин.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ТА АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ МОСТОВИХ КРАНІВ

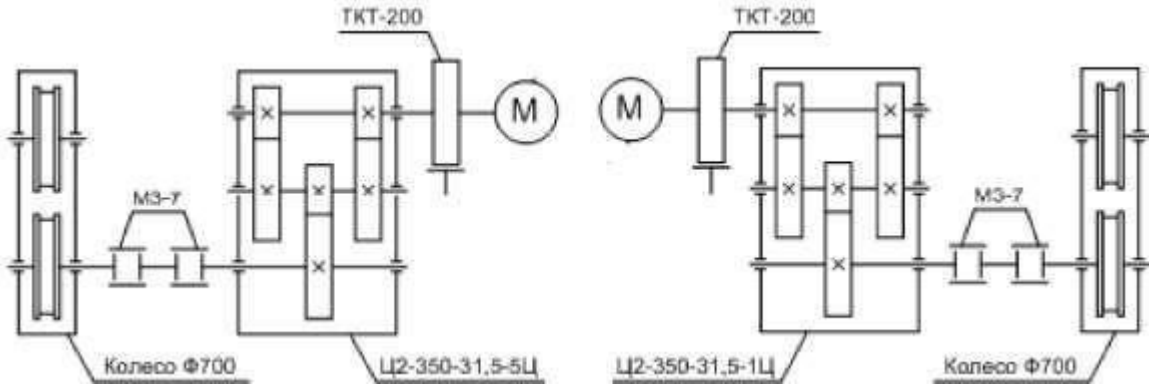
1.1. Огляд досліджень електромеханічних систем з пружними зв'язками механізмів пересування мостових кранів

Сучасні промислові підприємства неможливо уявити без активного використання різноманітних кранових механізмів та транспортних візків. Це обладнання призначене для здійснення переміщення вантажів як у горизонтальній, так і у вертикальній площинах. Їхній рух може відбуватися по похилих рейкових трасах, безрейкових дорогах або за допомогою складних канатних систем. Зокрема, по дворельсових коліях рухаються мостові, козлові, баштові та портальні кранові установки, а також залізничні крани, різноманітні пересувні візки і масштабні мостові перевантажувачі. Якщо говорити про металургійну галузь, то тут ключову роль відіграють мостові та козлові крани, спеціалізовані сталевози і шлаковози, електропередавальні мости, а також ремонтні та укладальні залізничні крани (детальніше інформація наведена у додатку А). Варто зазначити, що на певних металургійних об'єктах підйомно-транспортне устаткування виконує лише допоміжні функції, проте в таких підрозділах, як копровий цех, або на залізничних ремонтних станціях, кранові системи є основою всього технологічного процесу і належать до розряду головного обладнання.

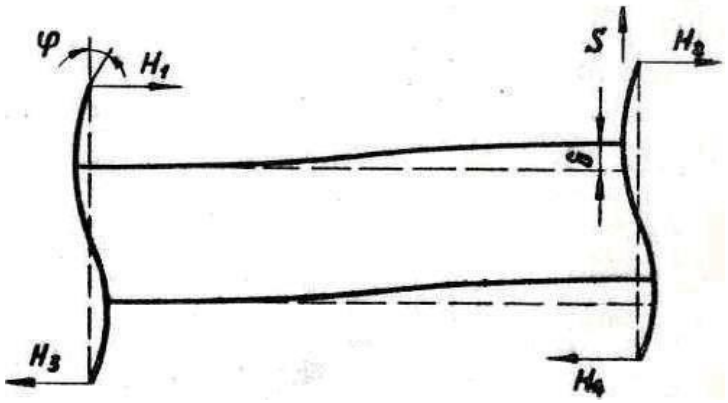
Серед усього розмаїття підйомних пристроїв найбільшого поширення набули саме мостові та козлові крани, які характеризуються класичними, типовими конструктивними рішеннями. Стандартний мостовий кран зазвичай складається з механізму, що забезпечує пересування самого моста, вузла для підйому вантажів та системи переміщення вантажного візка. Основна несуча конструкція — міст крана — виготовляється у формі масивної рами 1 (див. рисунок 1.1). Вона включає чотири ключові балки: дві кінцеві та дві прогонові. Ця рама здійснює свій рух по спеціальних підкранових шляхах за допомогою коліс, оснащених ребордами для надійного утримання на рейках.



а



б



в

а - загальний вигляд конструкції; б - схема кінематичного ланцюга механізму переміщення моста; в - деформація (вигин) рами моста під час руху з перекосом.

Рисунок 1.1 - Улаштування мостового крана

Силові агрегати (двигуни 2) передають крутний момент на ведучі колеса,

які котяться по напрямних рейках 3. Передача руху відбувається через систему валів, з'єднувальних муфт та редукторів. Детальну схему кінематичного ланцюга, що описує роботу механізму пересування моста, можна побачити на рисунку 1.1, б. Що стосується вантажного візка 4, то він рухається по власних рейках, які прокладені вздовж головних прогонових балок моста. Саме на цьому візку змонтовано основний робочий орган — механізм 5, призначений для підйому різноманітних вантажів.

Переважна більшість електромеханічних систем (ЕМС), що використовуються в конструкціях сучасних кранів, відрізняються високим рівнем уніфікації та збираються зі стандартних, перевірених часом вузлів. Металеві конструкції таких машин мають вражаючі габарити, значну масу окремих складових частин та специфічну, скінченну жорсткість своїх елементів. Саме наявність пружних механічних зв'язків стає головним фактором, що провокує виникнення підвищених динамічних навантажень всередині електромеханічних систем кранів. Такі складові, як масивна рама моста або підйомний гнучкий канат, не є абсолютно жорсткими і здатні до деформацій під навантаженням.

Найбільш суворим та інтенсивним умовам експлуатації на мостових та козлових кранах піддається електропривод механізму пересування моста. Така інтенсивність зумовлена специфікою роботи: механізм змушений постійно зупинятися в точно визначених позиціях, а також регулярно і різко змінювати напрямок свого руху під час виконання технологічних операцій.

Підвищений рівень динамічних зусиль, що впливають на металоконструкцію крана, здебільшого пояснюється несиметричним характером керуючих впливів у системі дводвигунного електроприводу. Додатково на це впливають різні статичні навантаження, що припадають на кожен з двигунів, а також неоднакові зведені моменти інерції електроприводів, які виникають тоді, коли вантажний візок знаходиться в несиметричному положенні відносно центру прольоту. Все це в комплексі неминуче призводить до перекосу кранового моста під час руху.

Наявність у механічній структурі ЕМС компонентів із значною масою у

поєднанні з відносно низькою жорсткістю зумовлює вкрай складний перебіг динамічних процесів. Наприклад, пружний вигин металевої ферми моста під дією навантажень може досягати кількох десятків міліметрів, особливо якщо довжина самого прольоту моста становить значну величину, сягаючи позначки у кілька десятків (до 50) метрів.

Наукові розвідки та практичні експерименти, проведені багатьма вченими в цій галузі, дали змогу достовірно встановити факт того, що найвищі динамічні навантаження в системі генеруються саме через пружні перекісні деформації кранового моста.

Для забезпечення руху механізмів пересування мостових кранів застосовуються системи приводів, що складаються з двох або більшої кількості електродвигунів. З огляду на специфіку технологічних процесів, вантажний візок досить часто позиціонується в безпосередній близькості до однієї з опорних конструкцій моста. Як наслідок, під час переміщення всього крана його металоконструкція зазнає впливу суттєвих додаткових пружних деформацій. Усередині пружної ЕМС, через неминуче маятникове розгойдування вантажу на підвісі, зароджується складний коливальний процес. У цей процес поступово залучаються інерційні маси як самого кранового візка, так і всього масивного моста. При цьому на низькочастотні коливальні рухи кранової ферми, що є прямим наслідком розгойдування вантажу, додатково накладаються високочастотні власні коливання конструкції. Останні генеруються пружними деформаціями моста, які виникають через асиметричну роботу і неузгодженість керуючих впливів у дводвигунному електроприводі.

На противагу цьому, механізми, в яких реалізовано жорстке кріплення вантажу (сюди можна віднести різноманітні транспортні візки, рейкові передавальні мости тощо), зазвичай відрізняються високою жорсткістю своєї металоконструкції. Завдяки цій особливості вони значно менше страждають від пружних деформацій під час здійснення прямолінійного поступального руху.

Електроприводи, що є невід'ємною частиною ЕМС, відіграють вирішальну роль у формуванні загальної картини динамічних процесів, оскільки вони володіють здатністю активно демпфувати (гасити) пружні коливання в системі.

Однак варто підкреслити, що специфічні динамічні характеристики електромеханічних систем вантажопідіймальних механізмів, які працюють під управлінням асинхронних двигунів, на сьогодні вивчені не повною мірою і потребують подальших глибоких наукових досліджень та детального опрацювання.

Функціонування механізмів пересування крана (МПК) в інтенсивному повторно-короткочасному режимі неминуче супроводжується підвищеним рівнем вібраційного навантаження на всі деталі механічного вузла. Практика показує, що традиційні механічні пристрої демпфування виявляються малоефективними для боротьби з такими коливаннями в пружних ЕМС. Тому, спираючись на результати попередніх досліджень, виникає гостра необхідність у штучному підвищенні демпфуючих властивостей самих систем асинхронного електроприводу, які масово встановлюються на сучасному підйомно-транспортному обладнанні (ПТО). Успішне розв'язання цієї складної проблеми неможливе без ретельного та всебічного вивчення динамічної поведінки ЕМС із пружними зв'язками.

Якщо аналізувати світовий ринок підйомно-транспортної техніки, то серед ключових гравців варто виокремити такі відомі корпорації, як "Demag" (Німеччина), американську компанію "Cleveland", японського гіганта "Mitsubishi" та британську фірму "Matterson". Конкурентна перевага їхньої продукції багато в чому базується на активному впровадженні інноваційних систем електроприводу, що характеризуються суттєво поліпшеними динамічними властивостями.

Сьогодення диктує нові, більш жорсткі вимоги до таких матеріаломістких інженерних об'єктів, якими є кранові механізми. Головним трендом стає пошук та впровадження ефективних ресурсозберігаючих концепцій та рішень. Як один із перспективних напрямків розглядається проектування мостових кранів із суттєво полегшеними металоконструкціями, конструктивна ідеологія яких наближена до будови промислових роботів-маніпуляторів. Проте варто враховувати, що таке полегшення неминуче тягне за собою посилення вимог до якості роботи систем електроприводу. Від них вимагатиметься ідеальна

плавність протікання пускових і гальмівних режимів та значно вища здатність до демпфування коливань.

На сучасних кранових механізмах та транспортних візках масово використовуються асинхронні електродвигуни двох основних типів: з короткозамкненим ротором (АДКЗ) та з фазним ротором (АДФР). Класичні системи дводвигунного асинхронного електроприводу найчастіше приводять у дію механізми пересування кранових мостів, а у випадках використання грейферних кранів — вони також відповідають за процеси підйому вантажу та закривання самого грейфера.

Проведені дослідження переконливо довели, що у випадках застосування дво- або багатодвигунних приводних систем, побудованих на базі АДФР і об'єднаних пружним механічним зв'язком, вкрай важливо забезпечувати точну синхронізацію швидкостей обертання двигунів. Цього можна досягти шляхом створення їхнього електричного зв'язку по колу ротора з формуванням спільної ланки постійного струму. З іншого боку, традиційна система узгодженого параметричного резисторно-контакторного управління електрично пов'язаними двигунами на сьогодні вважається такою, що має досить низькі енергетичні показники.

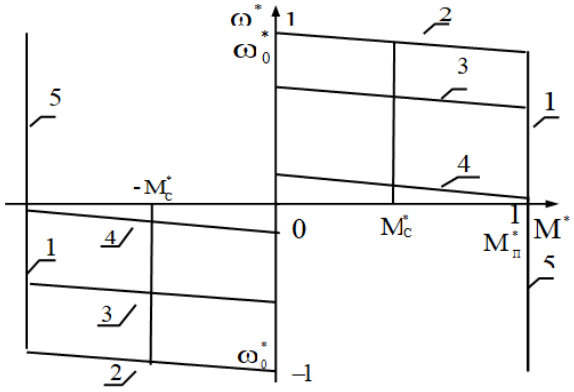
З огляду на це, на кранових механізмах і транспортних візках спостерігається стійка тенденція до все ширшого використання систем регульованого асинхронного електроприводу на базі частотного управління. Стрімкий розвиток перетворювальної техніки, а також вдосконалення алгоритмічної бази систем управління дали змогу значно оптимізувати як енергетичні, так і динамічні характеристики роботи асинхронних електроприводів. Разом з тим, проблема бездоганної спільної роботи сучасного асинхронного електроприводу та складної механічної частини кранових систем і візків залишається надзвичайно актуальною і зберігає необхідність продовження наукових досліджень у цьому напрямку.

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

На сьогоднішній день найбільш перспективним напрямком модернізації та оснащення механізмів пересування кранів (МПК) вважається масове впровадження частотно-регульованого асинхронного електроприводу, побудованого на базі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором (АДКЗ). Процес створення таких інноваційних систем частотного керування нерозривно пов'язаний із застосуванням передових теоретичних розробок у галузі електромеханіки. Актуальною проблемою, з якою стикаються під час експлуатації мостових та козлових кранів, залишається подача живлення до електроприводів через систему відкритих тролеїв, оскільки такий спосіб не здатний стовідсотково гарантувати безперебійність електричного зв'язку між мережею та приводом. Поряд із цим, на виробництвах продовжує функціонувати величезна кількість застарілих та енергозатратних систем електроприводу на основі асинхронних двигунів з фазним ротором (АДФР), які використовують класичне контакторно-резисторне керування. З огляду на гостру потребу в їхній глибокій модернізації, економічно доцільно розглядати шляхи подальшого використання існуючих АДФР, проте виключно за умови їх оснащення принципово новими, значно більш енергоефективними системами керування.

Головне завдання електроприводу МПК полягає у забезпеченні точного виконання необхідних технологічних режимів роботи механічного устаткування. Це стосується етапів пуску, гальмування, а також усталеного руху, що досягається шляхом плавного регулювання двох ключових параметрів роботи електродвигуна: кутової швидкості обертання ω та електромагнітного моменту М. Будь-який процес регулювання цих координат неминуче супроводжується цілеспрямованою зміною механічних характеристик силового агрегату. Тому сучасні приводні системи МПК повинні формувати специфічні статичні механічні характеристики, графічне відображення яких наведено на рисунку 1.2. Варто зауважити, що для переважної більшості механізмів

переміщення кранів та промислових візків не висувається надто суворих вимог щодо високої «жорсткості» робочої ділянки механічної характеристики електроприводу. У багатьох практичних ситуаціях цілком достатньою виявляється природна жорсткість характеристики самого двигуна. При цьому статичний момент опору має чітко виражений реактивний характер і, як правило, його значення не перевищує 50% від номінального крутного моменту привідних агрегатів. Така специфика безпосередньо пов'язана з важким повторно-короткочасним режимом роботи подібних механізмів, де тривалість включення (ТВ) часто сягає 40% і навіть більше.



1 - зона пуску; 2 - зона усталеної роботи; 3 та 4 - зони регулювання швидкості; 5 - зона гальмівних режимів.

Рисунок 1.2 - Розподіл статичних механічних характеристик реверсивного приводу за робочими зонами

Ключові відмінності у вимогах до механічних характеристик систем електроприводу, призначених для різних видів підйомно-транспортних машин (ПТМ), переважно полягають у необхідній ширині діапазону регулювання частоти обертання. Загалом, для ефективної та безпечної роботи електропривід будь-якої ПТМ має відповідати комплексу суворих критеріїв. До них належать: беззаперечна надійність самого електродвигуна, максимальна простота його конструктивного виконання та гарантована здатність стабільно функціонувати у вкрай несприятливих умовах промислового середовища. Окрім цього, привід повинен забезпечувати формування таких механічних характеристик, які дозволять здійснювати плавне та точне регулювання швидкості. Вкрай важливою є також вимога щодо підтримки стабільності пускового і гальмівного

моментів, оскільки саме це гарантує незмінність прискорень під час протікання інтенсивних динамічних процесів. Нарешті, сучасні тенденції вимагають максимального застосування уніфікованих схемотехнічних рішень у силовій частині, а також стандартизованих алгоритмів роботи систем керування.

Повертаючись до сьогодення, варто ще раз підкреслити, що найбільш прогресивним рішенням для МПК залишається частотно-регульований привод на базі АДКЗ. Технологія частотного керування надає можливість гнучко змінювати швидкість обертання магнітного поля статора, тим самим забезпечуючи плавне коригування швидкості ротора в дуже широких межах, демонструючи при цьому чудові показники економічної ефективності. Завдяки цим перевагам, частотний асинхронний електропривід знаходить своє успішне і масове застосування на різноманітних конвеєрних лініях, мостових та козлових кранових установках, передавальних візках та багатьох інших спеціалізованих механізмах підйомно-транспортної сфери.

Якщо розглядати специфіку роботи ПТМ на металургійних підприємствах, то вона кардинально відрізняється від умов експлуатації аналогічних машин загальнопромислового призначення. Тут домінує набагато вища інтенсивність навантажень та екстремальні умови навколишнього середовища. Більшість кранових механізмів у цій галузі функціонують у важкому або дуже важкому режимах (класи А5, А6), де показник ТВ становить від 40% до 60%. У таких підрозділах, як сталеплавильні, конвертерні цехи чи ділянки гарячого прокату, обладнання постійно піддається впливу надвисоких температур, критичної запиленості та сильної вібрації. Такі агресивні фактори накладають жорсткі обмеження на можливість впровадження надмірно складних або делікатних приводних систем. Відповідно, експлуатаційні служби завжди віддають перевагу максимально простим, витривалим та безвідмовним рішенням у сфері електроприводу.

Виходячи з цих реалій, на сьогодні в промисловості вже активно експлуатується ціла низка надійних та перевірених часом розробок на базі частотного керування короткозамкненими двигунами. Водночас науковці та інженери не зупиняються на досягнутому, продовжуючи створювати нові

варіації частотних приводів, які відрізняються між собою за рівнем складності апаратної реалізації, точністю регулювання координат та загальною вартістю впровадження.

Узагальнена класифікація сучасних систем асинхронного електроприводу зазвичай здійснюється за кількома ключовими критеріями: способом формування необхідних характеристик, базовими законами керування та низкою інших технічних параметрів. Якщо говорити про апаратну базу керування АДКЗ, то вона традиційно будується на двох основних типах перетворювачів: безпосередніх (або матричних) перетворювачах частоти (НПЧ) та перетворювачах, що містять проміжну ланку постійного струму між випрямним та інверторним блоками (ПЧ з ЛПС).

Аналіз ринку свідчить, що беззаперечну перевагу зараз мають саме перетворювачі з проміжною ланкою постійного струму. Фундаментом таких пристроїв виступає класична мостова схема автономного інвертора напруги (АІН), побудована на базі сучасних потужних IGBT-транзисторів, які обов'язково шунтуються зворотними діодами. Базовий принцип функціонування цієї схеми ґрунтується на використанні методу широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Домінуючим типом перетворювачів у системах регульованого приводу ПТМ є саме ПЧ на основі АІН. Класична структура такого пристрою включає нерегульований мостовий випрямляч (В), згладжуючий ємнісний фільтр (С) та безпосередньо транзисторний мостовий АІН. Для розсіювання енергії під час гальмівних режимів до схеми додатково підключають гальмівний резистор R_T, комутація якого здійснюється спеціальним транзисторним ключем K_T (структуру показано на рисунку 1.3). Процес формування вихідного трифазного струму необхідної частоти та амплітуди реалізується завдяки ШІМ-керуванню випрямленою напругою, що досягається за допомогою високочастотного почергового перемикання силових транзисторів анодної та катодної груп інверторного моста.

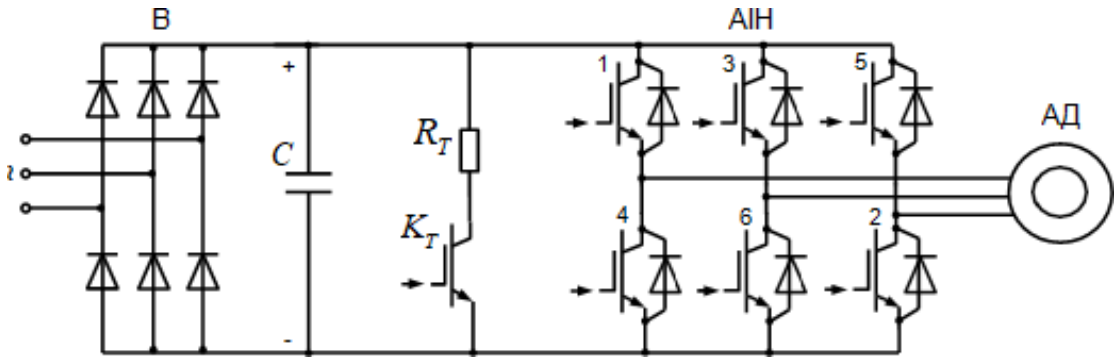
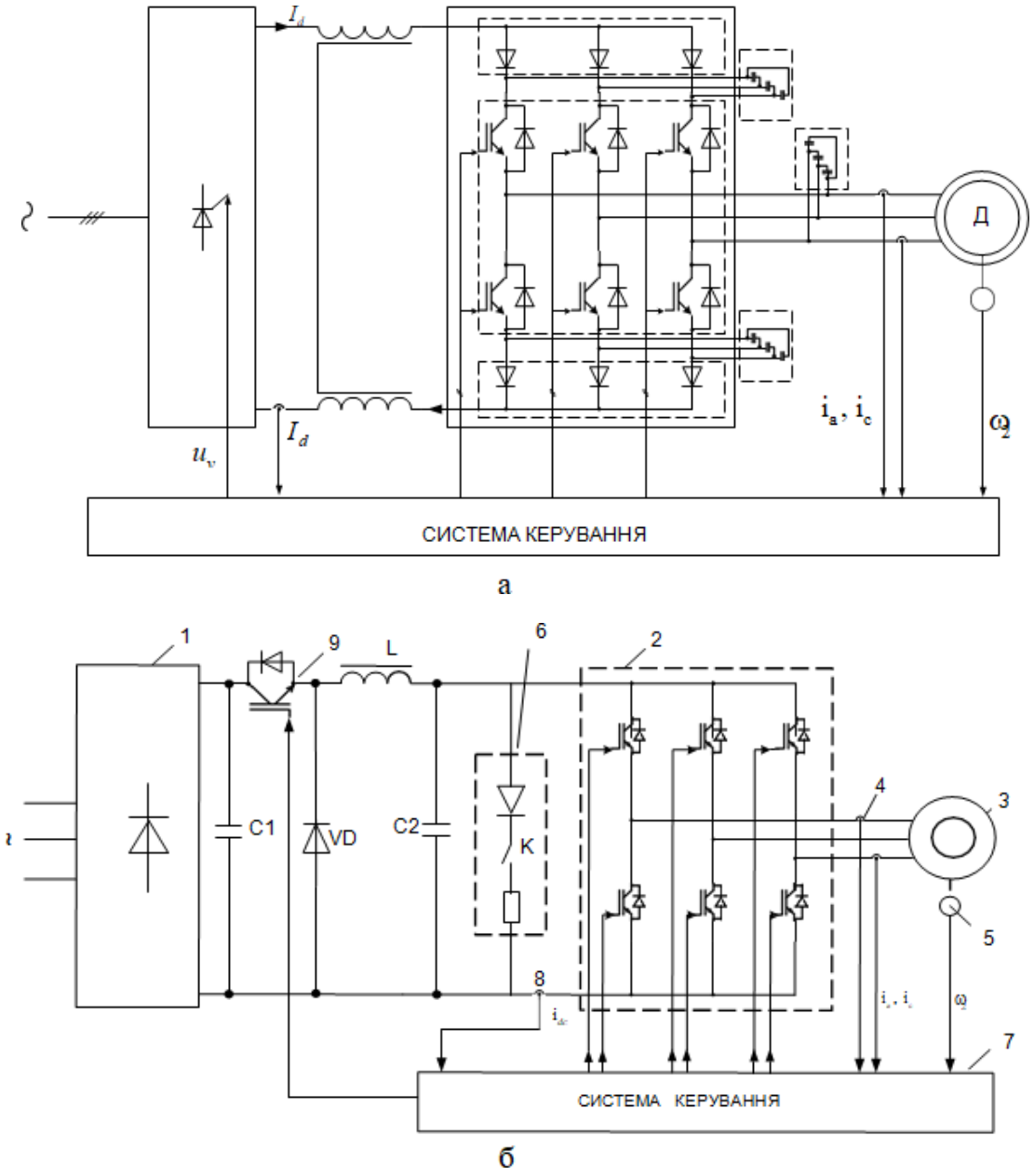


Рисунок 1.3 - Схема конфігурації електроприводу

"Перетворювач частоти – Асинхронний двигун" на основі автономного інвертора напруги.

Існує також альтернативний підхід, заснований на використанні автономних інверторів струму (АІТ). Вони здатні генерувати надзвичайно якісну форму вихідної кривої напруги. Такі пристрої конструюються із застосуванням повністю керованих напівпровідникових ключів, які здатні тривалий час працювати на високих частотах комутації (понад 7,5 кГц). Завдяки цьому вихідна напруга АІТ містить мінімальну кількість вищих гармонік, що позитивно впливає на форму струму статора двигуна. Сучасна силова електроніка, зокрема розробки корпорації "Siemens", вже дозволяє досягати таких частот перемикання IGBT-транзисторів, проте через високу вартість подібні елементи ще не набули статусу масових для підйомної техніки. Типова схема приводу з АІТ, яка забезпечує бездоганну якість живлення двигуна за рахунок високочастотної комутації, продемонстрована на рисунку 1.4, а.

До базового складу частотного перетворювача на основі АІТ зазвичай входить керований тиристорний випрямляч, згладжуючий реактор у ланці постійного струму, сам інверторний міст та спеціальний конденсаторний фільтр на виході. Специфіка побудови АІТ полягає в тому, що у кожне плече моста інтегруються IGBT-транзистори разом із послідовними відсікаючими діодами. Крім цього, для покращення параметрів вихідної напруги до точок їх з'єднання часто додають комутувальні конденсаторні ланцюги.



а - модифікація на базі автономного інвертора струму із розширеною комплектацією плечей моста; б - модифікація на базі автономного інвертора напруги з інтегрованим комутуючим IGBT-транзистором у проміжній ланці постійного струму

Рисунок 1.4 - Варіанти структурних схем електроприводів із додатковими силовими компонентами

Керування удосконаленим АІТ з додатковим силовим транзистором найчастіше здійснюється із застосуванням релейних алгоритмів. Використання цього додаткового електронного комутатора дозволяє динамічно регулювати рівень випрямленої напруги та загальну потужність, яка подається на вхідні клеми інвертора.

Якщо для традиційних АІН золотим стандартом є широтно-імпульсна модуляція, то в архітектурах на базі АІТ науковці пропонують ширше впроваджувати саме принципи релейного керування струмом. Проте, якщо поглянути на реальний стан справ у галузі експлуатації ПТМ, абсолютним лідером залишаються системи частотного приводу на базі АІН, що працюють із ШІМ.

Що стосується філософії управління процесами в асинхронному частотному приводі МПК, то всі алгоритми глобально поділяються на дві великі категорії: системи скалярного та системи векторного керування. Окремо існує метод прямого керування моментом (DTC), але на сьогодні він так і не здобув значної популярності при проєктуванні кранових систем.

Найбільшу затребуваність на підйомних механізмах, завдяки своїй технічній лаконічності та надійності, отримали саме скалярні системи. Найпростішим у практичній реалізації вважається класичний закон скалярного керування для зони нижче номінальної швидкості, відомий як $U_1/f_1 = const$. Однак базова версія цього закону має недоліки на низьких частотах, тому на практиці інженерам доводиться впроваджувати додаткові алгоритми корекції (IR-компенсація). Оновлений закон $U/f = const$ із функцією вольтододавання забезпечує цілком прийнятний діапазон регулювання швидкості, який сягає 10:1 навіть без використання енкодерів (датчиків швидкості).

Паралельно існують і значно інтелектуальніші системи векторного керування двигунами, закони яких максимально наближені до оптимальних теоретичних моделей. Такі алгоритми здатні вирішувати глобальні оптимізаційні завдання, наприклад, зводити до абсолютного мінімуму енергетичні втрати під час роботи або оптимізувати процес за іншими заданими критеріями.

Загалом, у родині скалярних систем можна виділити дві основні підгрупи:

- Розімкнуті структури (без контурів зворотного зв'язку): сюди відносять найпростіші системи без стабілізації магнітного потоку; системи, що стабілізують лише магнітний потік; алгоритми комплексної стабілізації потоку та швидкості; а також рішення, спрямовані на підтримку сталого

електромагнітного моменту.

• Замкнуті структури: включають системи регулювання магнітного потоку з паралельною стабілізацією абсолютного ковзання; алгоритми, що адаптують потік залежно від поточного статичного навантаження, та різноманітні оптимальні системи.

Практика показує, що для досягнення необхідної жорсткості пускових і регулювальних характеристик механізмів пересування крана цілком достатньо грамотної побудови замкнутих систем скалярного керування зі зворотним зв'язком.

Якщо ж технологія вимагає безпрецедентної якості керування та динаміки, на допомогу приходять системи векторного типу та приводи з прямим керуванням моментом. Принцип дії векторного керування базується на безперервному математичному аналізі поточних просторових векторів електромагнітних величин двигуна, які безпосередньо формують швидкість та момент. Ці системи характеризуються феноменальною швидкодією і здатні розширити діапазон регулювання швидкості до вражаючих 1:1000 (за умови наявності прецизійного датчика швидкості). Векторні приводи ідеально підходять для налаштування енергозберігаючих режимів, мінімізації нагріву обмоток та вирішення інших складних інженерних задач. Разом з тим, варто враховувати одну технічну особливість: у багатьох класичних векторних системах поздовжню (намагнічувальну) складову вектора струму статора фіксують на незмінному рівні, що іноді обмежує гнучкість при вирішенні специфічних оптимізаційних завдань.

Теоретично відомо, що максимальний крутний момент будь-якої електричної машини генерується за умови, коли два вектори, що його формують (один з яких відповідає за магнітний потік), зміщені один відносно одного рівно на 90 електричних градусів. Домогтися такого ідеального просторового розташування векторів у звичайному асинхронному двигуні надзвичайно складно. Повністю це реалізується лише в машинах подвійного живлення, проте через їхню конструктивну перевантаженість та високу вартість вони не знайшли свого місця в підйомно-транспортному машинобудуванні.

При розробці систем оптимального векторного керування критично важливим вузлом стає програмний блок непрямого обчислення кута між векторами, оскільки виміряти його фізично практично неможливо. Крім того, подібні складні системи виявляють високу чутливість до теплового дрейфу параметрів — зокрема, до зміни активного опору обмоток при нагріванні двигуна. Для подолання цих труднощів та точного розрахунку кута доводиться синтезувати складні математичні моделі (спостерігачі стану), які в режимі реального часу коригують алгоритми керування, спираючись на миттєві значення трифазних струмів та напруг. Проблематиці мінімізації струмів статора при збереженні продуктивності та побудові енергоефективних векторних приводів присвячено безліч праць видатних світових вчених, що відкриває перспективи їх ширшого використання на ПТМ у майбутньому.

Згадані раніше системи прямого керування моментом (DTC) суттєво відрізняються від класичного векторного підходу. Їхня архітектура базується на використанні релейних гістерезисних регуляторів та інтелектуальному виборі оптимального вектора напруги інвертора для миттєвої корекції потоку та моменту в необхідному напрямку. Незважаючи на відмінну динаміку, системи DTC є концептуально і математично складнішими за традиційні скалярні та векторні аналоги, через що їх впровадження на крановій техніці наразі залишається епізодичним.

Підсумовуючи критерії вибору, можна стверджувати: якщо крановий механізм чи транспортний візок працює у звичайному режимі без надвисоких вимог до динаміки та глибини регулювання швидкості, проєктувальники однозначно обирають скалярні системи частотного керування з мінімальною кількістю зовнішніх датчиків. Коли ж технологічний процес (наприклад, точне складання деталей) вимагає прецизійного позиціонування об'єкта та діапазону регулювання понад 10:1, безальтернативним вибором стають векторні системи із замкнутим контуром за швидкістю.

Протягом кількох минулих десятиліть в інженерному середовищі панувала думка, що важким експлуатаційним умовам МПК найкраще відповідають класичні електроприводи на базі двигунів з фазним ротором (АДФР), де

використовується параметричне реостатне керування. Суть цього методу полягає у виведенні надлишкової енергії ковзання з роторного кола і її безповоротного розсіювання у вигляді тепла на блоках потужних резисторів. Саме тому в металургійній промисловості досі експлуатується величезний парк АДФР із застарілими системами контакторного керування та масивними силовими контролерами. Такі системи, попри їхню колосальну енергозатратність та низький ККД, свого часу довели здатність безперебійно працювати в пекельних умовах: інтенсивних циклах з ТВ до 60%, при жахливій спеці, підвищеній вологості та тотальному запиленні. Однак глобальний тренд на енергозбереження та сучасний рівень розвитку силової електроніки безапеляційно вимагають переходу до інноваційних енергоефективних систем керування АДФР.

Одним із відомих рішень у цьому напрямку є система асинхронного вентильного каскаду (АВК), принципову схему якої зображено на рисунку 1.5. Побудована на базі АДФР, вона дійсно демонструє непогані показники енергоефективності, оскільки повертає частину енергії в мережу. Однак її суттєвим

обмеженням є вкрай вузький діапазон регулювання швидкості (максимум до 20% вниз від номінальної характеристики). Крім того, традиційні АВК практично не застосовуються на кранових механізмах через їхню нездатність формувати жорсткі пускові та ефективні гальмівні характеристики. Конструктивно в системі АВК додаткова проти-ЕРС вводиться безпосередньо в коло ротора АДФР через зв'язку нерегульованого діодного випрямляча та веденого мережею інвертора, який підключений до живлення через узгоджувальний трансформатор. Особливістю АВК є те, що просторове положення вектора додаткової напруги жорстко зафіксоване в протифазі до вектора роторного струму. Якщо для спрощення розрахунків знехтувати активним опором джерела (прийняти $R_d = 0$), то базове рівняння, що описує взаємозв'язок між вектором додаткової напруги та струмом ротора, набуває вигляду:

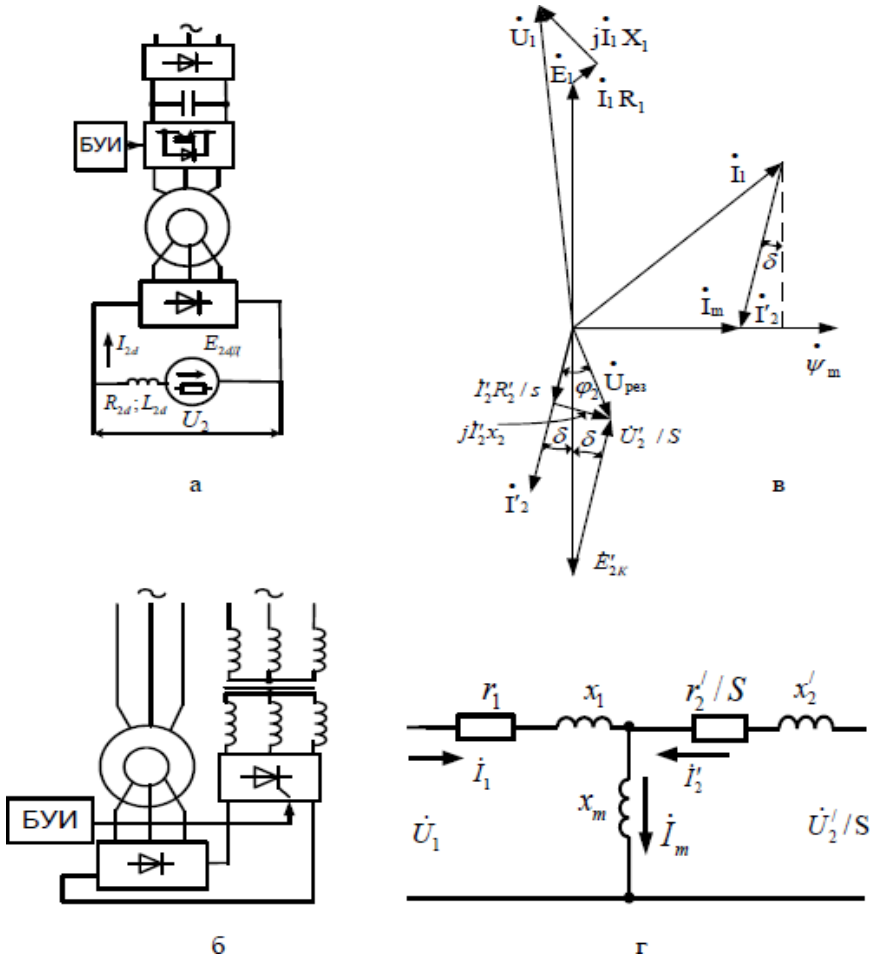
$$\overline{U}_2 = -\overline{I}_{i2} \cdot \left(\overline{E}_{dn} + L_d \cdot \frac{d\left|\overline{i}_2\right|}{dt} \right), \qquad (1.1)$$

де i_2 — просторовий вектор струму ротора;

$E_{dД}$ — вектор додаткової електрорушійної сили в колі постійного струму;

L_d — еквівалентна індуктивність згладжувального дроселя в ланці постійного струму.

Спроби вдосконалити класичний АВК шляхом додавання контурів частотного керування призводять до створення надзвичайно громіздких та складних комплексів, які не знайшли свого місця в реальному промисловому виробництві.

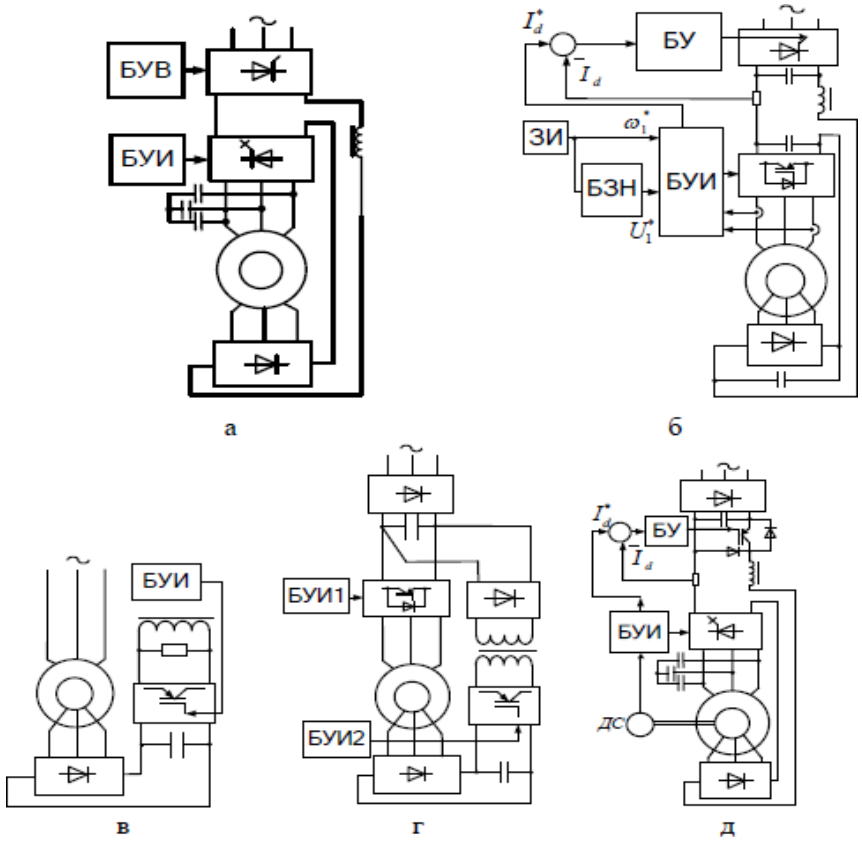


а – загальна функціональна схема приводу; б – силова схема класичного АВК; в – векторне подання режимів АВК; г – еквівалентна схема заміщення каскаду

Рисунок 1.5 - Методи інтеграції додаткової електрорушійної сили в роторне коло машини

Значно перспективнішим вектором розвитку сучасних приводів на базі АДФР є синтез гібридних топологій, які гармонійно поєднують сильні сторони як частотного, так і каскадного принципів керування. Такі комплекси отримали назву систем частотно-каскадного електроприводу (ЧКЕ). Різноманітні структурні рішення для реалізації управління двигунами з фазним ротором на базі ЧКЕ детально проілюстровані на рисунку 1.6.

Головна технічна перевага ЧКЕ полягає у здатності одночасно та повністю незалежно керувати електромагнітними процесами як у статорному, так і в роторному колах двигуна. Залежно від обраної архітектури, статорна обмотка може отримувати енергію безпосередньо від промислової мережі або ж від власного перетворювача частоти, реалізуючи необхідний закон керування (наприклад, U/f = const). У схемах, реалізованих на базі автономних інверторів струму (рисунок 1.6, а) або інверторів напруги (рисунок 1.6, б), кола статора і ротора мають загальний гальванічний зв'язок. У таких системах надлишкова енергія ковзання успішно рекуперується з ротора і направляється назад у ланку постійного струму головного перетворювача частоти. Контури керування ЧКЕ можуть будуватися як за бездатчиковим скалярним принципом, так і з використанням енкодерів для підвищення точності. Ця концепція управління АДФР вважається надзвичайно перспективною для розробки узгоджених дводвигунних кранових електроприводів. На рисунку 1.6, в також продемонстровано цікаву топологію ЧКЕ на базі АІН, де спеціальний каскадний блок підключено зустрічно-паралельно до основного силового тракту. Ця архітектура наразі активно досліджується як потенційна заміна старим приводам МПК.



а - архітектура ЧКЕ на основі АІТ; б - архітектура ЧКЕ на основі АІН; в - конфігурація з перетворювачем у роторному колі; г - схема ЧКЕ АІН із паралельним каскадним підключенням; д - модифікація ЧКЕ АІТ, доповнена електронним комутатором.

Рисунок 1.6 - Структурно-функціональні варіанти побудови гібридних систем

Окремого розгляду заслуговує схема ЧКЕ, в якій обмотки статора та ротора з'єднані послідовно через єдину ланку постійного струму. Ця топологія отримала назву частотно-каскадного електроприводу з послідовним збудженням (ЧКЕ ПЗ). За аналогією, класичні системи вентильного каскаду з такою ж комутацією називають АВК з послідовним збудженням (АВК ПЗ). Приклад функціональної побудови системи ЧКЕ ПЗ на базі струмового інвертора з GTO-тиристорами, що включає діодний випрямляч та імпульсний транзисторний ключ у ланці випрямленого струму, наведено на рисунку 1.6, д. Головним обмеженням послідовної схеми є сувора вимога до параметрів двигуна: застосовувати можна лише ті АДФР, у яких номінальні значення струмів статора і ротора збігаються (допускається похибка не більше 10%). Ця ж специфічна проблема притаманна і системам ЧКЕ ПЗ, що оснащені

релейними регуляторами напруги (РРН). Для того, щоб АІТ спільно з РРН формував вихідну напругу з мінімально допустимим коефіцієнтом гармонійних спотворень, необхідне застосування силових транзисторів, здатних комутувати струми на частотах понад 7,5 кГц. І хоча світові лідери (зокрема "Siemens") вже постачають такі рішення на ринок, їхня надзвичайно висока ціна гальмує масове впровадження.

Зважаючи на економічні реалії, пріоритетним завданням сучасних розробок є проєктування та глибоке дослідження алгоритмів керування, орієнтованих на використання доступних і поширених силових компонентів, що працюють на стандартних частотах комутації (в межах до 2,5 кГц).

Найбільш ґрунтовно в науковій літературі досліджено роботу систем ЧКЕ в режимі генерації стабільної частоти напруги на виході інвертора (тобто режими класичного АВК ПЗ). Крім обмежень щодо струмів, вагомим недоліком архітектури ЧКЕ ПЗ на базі АІТ є необхідність використання керованого мережевого випрямляча на вході, що автоматично тягне за собою погіршення загального коефіцієнта потужності всього електроприводу. З іншого боку, в системах ЧКЕ ПЗ, побудованих на базі АІН (рисунок 1.6, б), виникає інша апаратна проблема: для стабільної роботи інвертора напруги потрібне значне збільшення загальної ємності блоку фільтрувальних конденсаторів у ланці постійного струму, що збільшує габарити пристрою.

Існує ще один цікавий підхід до побудови електроприводу на базі машини з фазним ротором, який передбачає введення в роторне коло додаткової ЕРС самоіндукції, генерованої інвертором (див. рисунок 1.6, в). У такій схемі інвертор відіграє роль посередника, що забезпечує постійний коливальний обмін електромагнітною енергією між батареєю конденсаторів у ланці постійного струму та індуктивністю масивного реактора, встановленого на виході. Таким чином, у ротор вводиться змінна проти-ЕРС, параметри якої повністю визначаються ЕРС самоіндукції цього реактора. Амплітуда додаткової електрорушійної сили в колі ротора гнучко регулюється завдяки програмній зміні частоти перемикання транзисторних ключів інвертора. Роль додаткового резистора в такій схемі зводиться до захисту — він обмежує максимальні

сплески напруги в проміжній ланці постійного струму та частково демпфує надлишкову енергію всередині утвореного коливального контуру.

Проте інженери дійшли висновку, що при розробці систем ЧКЕ набагато раціональніше перенаправляти енергію ковзання безпосередньо в ланку постійного струму головного інвертора. Цього можна досягти завдяки зустрічно-паралельному підключенню додаткового силового каскадного модуля відносно основного каналу живлення. Схема ЧКЕ на базі інвертора напруги, зображена на рисунку 1.6, г, де реалізовано вентильно-трансформаторний зв'язок між обмотками статора і ротора, є логічним продовженням та значним удосконаленням попередньої концепції. Завдяки такому рішенню, вся потужність ковзання не втрачається даремно, а рекуперується і передається в ланку постійного струму ПЧ, звідки знову живить статорні обмотки двигуна. Величезною перевагою такої топології є повна відсутність жорстких обмежень щодо співвідношення номінальних струмів статора та ротора, що робить її універсальною і дозволяє використовувати абсолютно будь-які моделі АДФР, доступні на ринку.

Важливо зазначити, що системи ЧКЕ навіть у найпростішій розімкнутій конфігурації генерують механічні характеристики, які за своєю формою наближені до так званих "екскаваторних". Такі спадаючі характеристики є винятково сприятливими для кінематики механізмів пересування кранів, що робить цей напрямок надзвичайно перспективним для подальших наукових та стендових досліджень.

Глибокий аналіз усього спектру експлуатаційних проблем МПК, а також вивчення глобальних трендів у галузі створення силової перетворювальної техніки дозволяють зробити однозначний висновок: подальше використання класичних контакторно-реостатних схем керування АДФР є технічним анахронізмом. Ці системи не витримують жодної критики з погляду енергозбереження, оскільки просто спалюють величезні обсяги енергії ковзання. Більше того, ступінчаста природа реостатного пуску не здатна забезпечити той діапазон та плавність регулювання швидкості, яких сьогодні вимагають сучасні технологічні процеси від кранових механізмів. Враховуючи

вищезазначене, очевидно, що інженерний пошук та вдосконалення приводів на базі двигунів з фазним ротором не завершено. Існує нагальна практична необхідність у створенні та комплексному тестуванні нових, високоефективних одно- та дводвигунних приводних комплексів, що базуються на синергії частотних та частотно-каскадних принципів керування.

У процесі синтезу та відлагодження таких сучасних керуючих алгоритмів провідну роль відіграють передові методи математичного та імітаційного моделювання. Для глибокого аналізу складної палітри динамічних, енергетичних, електромагнітних та електромеханічних явищ у багаторівневих системах частотного приводу науковці створюють деталізовані комп'ютерні моделі. Безперечним лідером у цій сфері залишається програмний комплекс MATLAB, зокрема його потужне середовище візуального моделювання Simulink. Детальні алгоритми побудови подібних віртуальних стендів та приклади симуляції перехідних процесів широко представлені в спеціалізованій технічній літературі.

Підводячи загальний підсумок огляду передових технічних досягнень у сфері регульованого асинхронного електроприводу, можна констатувати наступне: найгострішим завданням сьогодення є розробка архітектурно простих, безвідмовних та енергоефективних приводних систем як на базі АДКЗ, так і на базі існуючих АДФР. Ключ до успіху лежить у застосуванні адаптивних алгоритмів та спеціалізованих контурів корекції, які дозволять цим системам ідеально підлаштовуватися під жорсткі та специфічні умови експлуатації механізмів пересування мостових кранів і важких транспортних візків.

Висновок до розділу 1

Кранові механізми, зокрема мостові та козлові крани, відіграють ключову роль у сучасній промисловості та металургії, забезпечуючи вертикальне й горизонтальне переміщення вантажів. Електромеханічні системи (ЕМС) таких кранів відрізняються значними габаритами та масою складових вузлів. При цьому їхня кінцева жорсткість і наявність пружних механічних зв'язків стають головною причиною виникнення підвищених динамічних навантажень.

Дослідження показують, що найбільш суттєві динамічні зусилля в системі пов'язані з пружною перекісною деформацією моста крана. Ця деформація значною мірою спричинена несиметричністю керуючих впливів з боку дводвигунного електроприводу, що неминуче призводить до перекосу моста під час руху.

Сучасні тенденції до ресурсозбереження та проєктування кранів із полегшеними металоконструкціями висувають більш жорсткі вимоги до систем електроприводу. Від них очікується підвищена демпфуюча здатність, а також ідеальна плавність протікання пускових і гальмівних режимів. На сьогодні найперспективнішим напрямком для механізмів пересування кранів визнано застосування частотно-регульованого асинхронного електроприводу на базі двигунів з короткозамкненим ротором (АДКЗ). На практиці найбільшу перевагу віддають перетворювачам частоти з проміжною ланкою постійного струму та автономним інверторам напруги (АІН), які функціонують за принципом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Водночас на підприємствах залишається величезний парк машин, оснащених двигунами з фазним ротором (АДФР), які працюють під управлінням застарілих та енерговитратних контакторно-резисторних систем. Для їхньої глибокої модернізації найбільш ефективним та економічно доцільним шляхом є створення гібридних систем частотно-каскадного електроприводу (ЧКЕ). Такі рішення дозволяють корисно рекуперувати енергію ковзання назад у ланку постійного струму головного перетворювача, суттєво підвищуючи енергоефективність комплексу. Таким чином, найгострішим та найактуальнішим завданням сьогодення залишається розробка архітектурно простих, безвідмовних та енергоефективних систем асинхронного електроприводу. Використання адаптивних алгоритмів та спеціалізованих контурів корекції дозволить цим системам ідеально підлаштовуватися під жорсткі умови експлуатації механізмів пересування мостових кранів та важких транспортних візків.

РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕСУВАННЯ КРАНА

2.1. Автоматизовані системи частотного та частотно-каскадного електроприводу на базі асинхронного двигуна з фазним ротором

Автоматизовані комплекси скалярного частотного керування відрізняються значним різноманіттям і можуть будуватися із залученням широкого спектра сучасної елементної бази. Розглянемо конфігурацію електроприводу, яка продемонстрована на рисунку 2.1. Вона спроєктована на основі автономного інвертора струму (АІТ), реалізованого на базі потужних GTO-тиристорів. Специфічною особливістю цієї силової архітектури є наявність додаткових комутувальних вентилів у структурі перетворювача частоти. Таке схемотехнічне рішення надає можливість ефективно регулювати струм у випрямленому контурі та цілеспрямовано підвищувати рівень напруги безпосередньо на вхідних клемах АІТ.

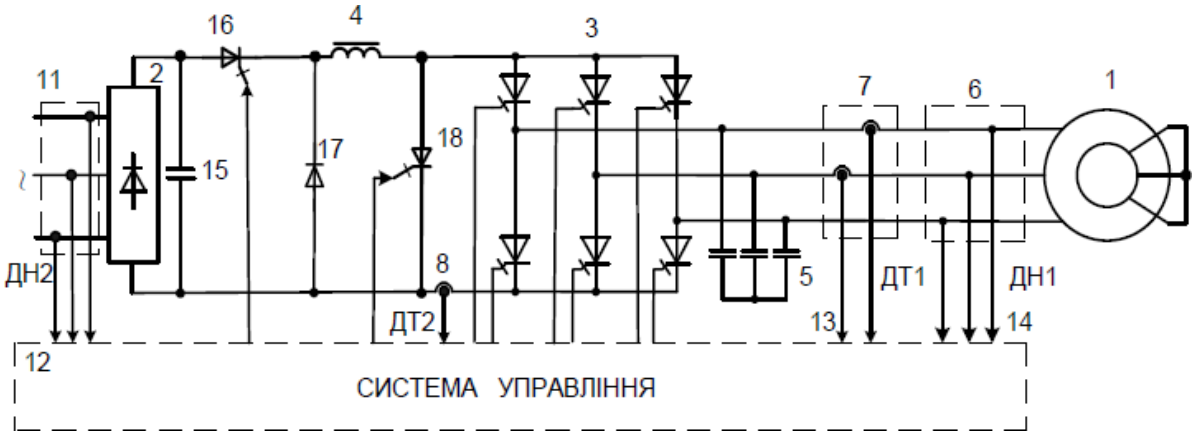


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи частотного керування асинхронним двигуном на основі АІТ із розширеною вентильною комутацією

У додатку Г більш детально проаналізовано специфіку функціонування систем асинхронного частотного та частотно-каскадного електроприводу (ЧКЕ), які оснащені подібними додатковими комутуючими елементами в силовому тракті перетворювача та працюють під керівництвом релейних алгоритмів управління.

Аналізуючи асинхронний привод, логіка роботи якого тісно пов'язана із вищезгаданою схемою, варто зазначити, що система керування безперервно генерує необхідний закон частотного регулювання. У силовому блоці застосовується класичний нерегульований випрямляч мережі живлення. Процес регулювання струму у випрямленому колі здійснюється імпульсним методом — завдяки високочастотній комутації вентильного ключа 16, тоді як зворотний діод 17 гарантує безперервність протікання струму. Керування другим вентильним ключем 18 забезпечує динамічне підвищення напруги на вході АІТ. Це досягається шляхом циклічного накопичення електромагнітної енергії в дроселі (реакторі 4) з її наступною порційною віддачею у випрямлений ланцюг, узгоджено з напругою живильної мережі. Відповідні керуючі імпульси для ключів 16 та 18 генерує спеціалізований логічний блок перемикань, що є невід'ємним ядром загальної системи управління.

Системи ЧКЕ, окрім базового перетворювача частоти, містять у своїй архітектурі додаткові силові компоненти, які інтегруються безпосередньо в коло роторної обмотки. Їхнє головне технологічне призначення — реалізація каскадного методу рекуперації енергії ковзання від асинхронного двигуна назад у ланку постійного струму. Функціональна схема ЧКЕ на базі автономного інвертора напруги (АІН) зі скалярним алгоритмом керування, що детально зображена на рисунку 2.2, спирається на типові та перевірені рішення систем управління, але додатково включає підпорядкований контур імпульсного регулювання випрямленого струму.

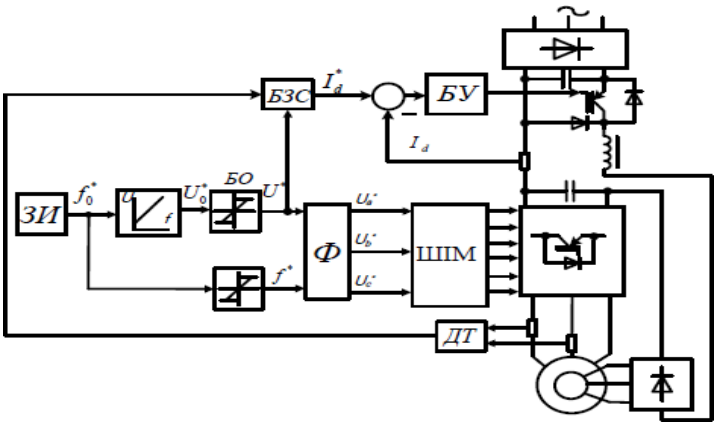
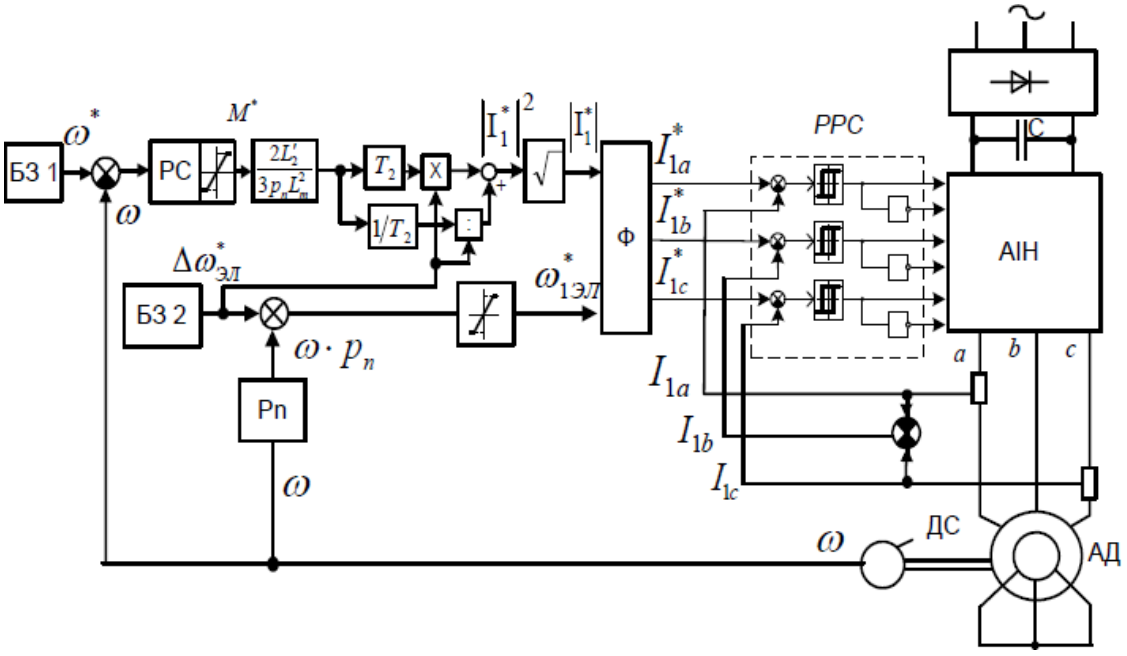


Рисунок 2.2 – Базова функціональна схема частотно-каскадного електроприводу на основі АІН із застосуванням скалярного керування

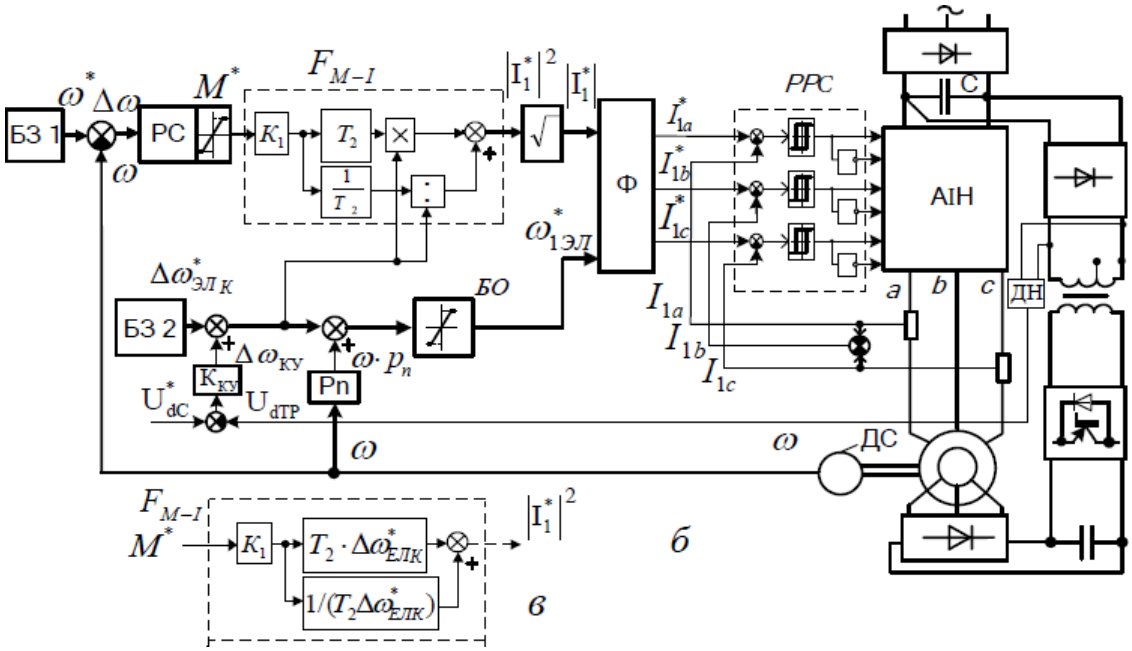
Під час запуску двигуна спеціальний блок завдання струму (БЗС) формує керуючий сигнал для стабілізації струму у випрямленому колі на заданому постійному (пусковому) рівні. Після успішного завершення етапу розгону агрегату, спираючись на фактичні виміри струму статора, цей блок динамічно коригує завдання на випрямлений струм пропорційно до поточного механічного навантаження на валу двигуна. Результати комп'ютерної симуляції динаміки такої системи ЧКЕ наведені у відповідному додатку Г. При цьому варто відверто зауважити, що системи скалярного частотного керування за своїми показниками точності та швидкодії відчутно поступаються комплексам векторного управління.

Специфіка побудови систем ЧКЕ полягає у послідовному енергетичному з'єднанні статорних та роторних обмоток. Через це в таких схемах допускається використання винятково тих асинхронних двигунів з фазним ротором (АДФР), у яких номінальні значення струмів статора і ротора відрізняються не більше ніж на 10%. З огляду на ці жорсткі апаратні обмеження, для подальших наукових розвідок було обрано концепцію ЧКЕ, що базується на принципах частотно-струмового керування АД. За своєю складністю та ефективністю вони посідають оптимальне проміжне місце між найпростішими скалярними та високоточними векторними архітектурами.

У контурах скалярного частотно-струмового керування регулятори фазних струмів можуть реалізовуватися на базі швидкодіючих релейних елементів (РРС), як це показано на рисунку 2.3, або ж із застосуванням більш традиційних ШІМ-контролерів. Для розроблюваної системи ЧКЕ доцільно використовувати частотно-струмове керування, оснащене прецизійним датчиком швидкості (енкодером). Оптимальним рішенням для такого електроприводу є застосування серійного перетворювача частоти на базі АІН, що має двоконтурну підпорядковану систему регулювання: внутрішній контур для швидкого керування фазними струмами та зовнішній контур для точної стабілізації швидкості обертання.



а



а – класичний режим із закороченим ротором; б – інтеграція в структуру ЧКЕ; в – схема лінеаризованого обчислювального блоку $F_{M\text{-}I}$

Рисунок 2.3 – Варіанти функціональних схем систем частотно-струмового керування АДФР

Розглянемо детальніше специфіку математичного синтезу прямого каналу керування струмом в архітектурі частотно-струмового електроприводу.

Регулятор швидкості генерує сигнал завдання електромагнітного моменту M^*, який у подальшому апаратно чи програмно трансформується в сигнал необхідної амплітуди статорного струму $|I^*|$. Аналітичний вираз, що описує

крутний момент в усталеному режимі роботи (з урахуванням постійної часу ротора), має такий вигляд:

$$M = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m^2}{L_2'} \frac{1}{\left[\frac{L_2' \cdot \Delta\omega_{ЭЛ}}{R_2'} + \frac{R_2'}{L_2' \cdot \Delta\omega_{ЭЛ}} \right]} \left| \dot{I}_1 \right|^2 = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m^2}{L_2'} \frac{1}{T_2 \Delta\omega_{ЭЛ} + \frac{1}{T_2 \Delta\omega_{ЭЛ}}} \left| \dot{I}_1 \right|^2 = F_{I-M} \cdot \left| \dot{I}_1 \right|^2 .$$

$$\begin{cases} F_{I-M} = \dfrac{M}{\left| \dot{I}_1 \right|^2} = \dfrac{3}{2} p_n \dfrac{L_m^2}{L_2'} \dfrac{1}{T_2 \Delta\omega_{ЭЛ} + 1/(T_2 \Delta\omega_{ЭЛ})}; \\ F_{M-I} = F_{I-M}^{-1} = \dfrac{\left| \dot{I}_1 \right|^2}{M} = \left(\dfrac{3}{2} p_n \dfrac{L_m^2}{L_2'} \dfrac{1}{T_2 \Delta\omega_{ЭЛ} + 1/(T_2 \Delta\omega_{ЭЛ})} \right)^{-1}. \end{cases}$$

Пряму та обернену математичну залежність між електромагнітним моментом агрегату і квадратом діючого струму найзручніше описувати через спеціальні перехідні функції:

Спираючись на базове рівняння (2.1), можна аналітично визначити необхідний сигнал завдання для квадрата струму статора:

$$\left| \dot{I}_1 \right|^{2^*} = \frac{2}{3} \frac{L_2'}{p_n L_m^2} \left(T_2 \Delta\omega_{ЭЛ}^* + \frac{1}{T_2 \Delta\omega_{ЭЛ}^*} \right) M^* = K_1 \left(T_2 \Delta\omega_{ЭЛ}^* + \frac{1}{T_2 \Delta\omega_{ЭЛ}^*} \right) M^* = F_{M-I} \cdot M^*$$

Кінцевий сигнал завдання струмової амплітуди $|I^*|$ отримується безпосередньо за допомогою математичної операції добування квадратного кореня зі значення, обчисленого за формулою (2.3).

Якщо в алгоритмі частотно-струмового керування АД сигнал $\Delta\omega^*$ підлягає постійному динамічному регулюванню, то в прямому тракті контуру швидкості (див. рисунок 2.3) обов'язково має бути присутня нелінійна ланка $F_{M\text{-}I}$, що включає ресурсоємні операції множення та ділення згідно з виразом (2.2). Однак, якщо конфігурація ЧКЕ дозволяє жорстко стабілізувати величину $\Delta\Delta^* = \text{const}$ на незмінному рівні, це відкриває шлях до суттєвого спрощення системи. У такому випадку застосовується лінеаризована ланка $F_{M\text{-}I}$, яка вже не потребує складних блоків перемноження та ділення (рисунок 2.3, в).

Замкнений контур релейного регулювання фазних струмів статора в комплексі з АІН для спрощення інженерних розрахунків можна в першому наближенні апроксимувати класичною інерційною ланкою першого порядку:

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

де T_μ — еквівалентна постійна часу струмового контуру з РРС.

У разі застосування релейного (гістерезисного) принципу регулювання струму статора, час запізнювання першої гармоніки реального струму відносно ідеальної заданої синусоїди переважно диктується шириною зони нечутливості РРС. На практиці ця величина є вкрай малою і зазвичай не перевищує $t_z = T_\mu$ = 0,001 с. Якщо як регулятор швидкості обрати типовий ПІ-контролер, то, керуючись перевіреними методиками налаштування підпорядкованих контурів на модульний оптимум, його передавальна функція набуде такого вигляду:

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

де k_c — масштабний коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю.

Другий незалежний канал аналізованої системи відповідає за безперервне регулювання частоти статорного струму. Сигнал завдання частоти струму статора в архітектурі ЧКЕ обчислюється наступним чином:

$$\omega_{1ЭЛ}^* = \Delta\omega_{ЭЛК}^* + \Delta\omega_{КУ} + \omega \cdot p_n,$$

де $\Delta\omega^*$ — задане відхилення зведеної частоти обертання ротора відносно кругової частоти магнітного поля статора в умовах роботи ЧКЕ;

$\Delta\omega_{КУ}$ — додатковий адаптивний сигнал корекції.

Спеціалізований апаратно-програмний блок-формувач Ф (зображений на рисунку 2.3) безперервно генерує еталонні сигнали завдання для миттєвих значень фазних струмів статора:

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

Сформовані таким чином сигнали надходять безпосередньо на прямі (позитивні) входи релейних регуляторів струму (РРТ), тоді як на їхні інверсні (негативні) входи безперервно подається інформація зворотного зв'язку від прецизійних датчиків струму статора.

Силова конфігурація системи ЧКЕ (рисунок 2.3, б) передбачає наявність специфічного каскадного модуля, побудованого за схемою «випрямляч – інвертор – узгоджувальний трансформатор – випрямляч». Цей потужний модуль створює необхідний енергетичний міст між роторною обмоткою та ланкою постійного струму основного ПЧ, причому він підключається зустрічно-паралельно до головного енергетичного тракту приводу. Подібна конфігурація управління ЧКЕ є чудовим прикладом гібридної системи, в якій органічно та ефективно поєднуються алгоритми частотно-струмового та каскадного принципів регулювання. Каскадний блок бере на себе надважливу функцію ефективної рекуперації тієї частини електромагнітної енергії (енергії ковзання), яка інакше була б просто розсіяна у вигляді тепла в роторному колі, та повертає її в ланку постійного струму ПЧ. Додатковою перевагою є те, що примусове введення в коло ротора додаткової напруги (яка є просторовою векторною величиною і спрямована, згідно з базовими рівняннями, назустріч вектору струму ротора) створює відчутний стабілізуючий ефект на всю нестабільно схильну систему електроприводу зі скалярним управлінням.

Зустрічно-паралельне включення рекуперуючого каскадного блоку відносно основного каналу електроприводу (рисунок 2.3, б) відкриває унікальну можливість застосовувати в цій схемі ЧКЕ абсолютно будь-які моделі АДФР, незалежно від їхнього заводського коефіцієнта трансформації. Завдяки такому передовому топологічному рішенню кола статора і ротора надійно розв'язані гальванічно за допомогою силового узгоджувального трансформатора. Вбудований конденсатор у каскадному блоці виконує життєво

важливу функцію згладжування пульсацій випрямленої вихідної напруги ротора. Еквівалентна схема заміщення АДФР, що функціонує в режимі ЧКЕ (де всі електромагнітні змінні коректно зведені до статорної обмотки для зручності розрахунків), наведена на рисунку 2.4.

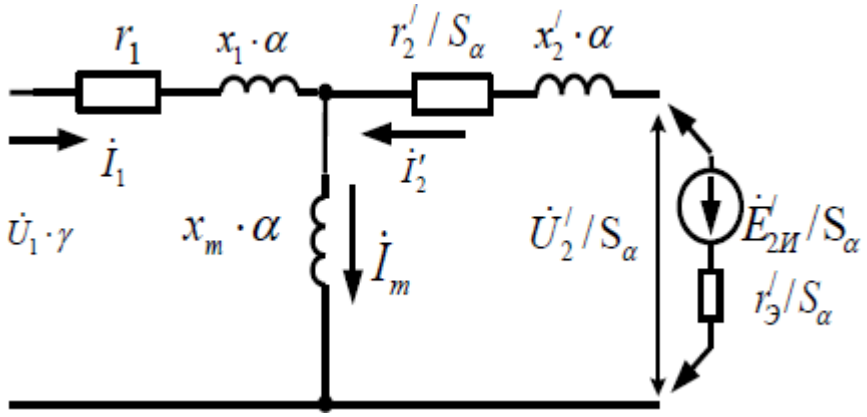


Рисунок 2.4 – Еквівалентна схема заміщення АДФР з інтегрованим каскадним модулем у роторному колі

У процесі комплексного регулювання частоти та амплітуди живильної напруги статора АДФР, електрорушійна сила (ЕРС) загальмованого нерухомого ротора виступає складною функцією від параметрів керування γ та α:

$$E_{2к\alpha} = E_{2к} \cdot \gamma \cdot \alpha ,$$

де E_{2k} — фіксоване значення ЕРС нерухомого ротора за умови його живлення струмом номінальної частоти f_{1n}.

У реальній динаміці, коли ротор обертається, наведена в ньому ЕРС $E_{2\alpha}$ стає залежною не лише від керівних коефіцієнтів γ, α, але й від змінного поточного ковзання S_α. Індуктивний опір обертового ротора $x_{2\alpha}$ та еквівалентний опір контуру намагнічування $x_{2\alpha}$ розраховуються за такими функціональними залежностями:

$$E_{2\alpha} = E_{2к\alpha} \cdot S_\alpha = E_{2к\alpha} \cdot \frac{\Delta\omega_{ЭЛ}}{\omega_{1ЭЛ}} = E_{2к} \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot S_\alpha = E_{2к} \cdot \gamma \frac{\Delta\omega_{ЭЛ}}{\omega_{0ЭЛ}} .$$

$$x_{2\alpha} = x_2 \cdot \alpha \cdot s_\alpha .$$

$$x_{m\alpha} = x_m \cdot \alpha$$

Абсолютне значення (модуль) просторового вектора додаткової напруги U_2 у структурі ЧКЕ суворо та автоматично утримується в ідеальній протифазі до вектора струму ротора I_2. Середні випрямлені значення ЕРС та струму в роторному контурі можна з достатньою для практики точністю обчислити, використовуючи такі вирази:

$$\begin{cases} E_{2d\alpha} = E_{2\alpha} \cdot K_U; \\ I_{2d} = \dfrac{E_{2d\alpha} - E_{Id}}{R_{d\Sigma}}, \end{cases}$$

де $E_{2d\alpha}$ — випрямлена електрорушійна сила ротора; E_{Id} — випрямлена проти-ЕРС інвертора; $R_{d\Sigma}$ — сумарний активний опір роторного кола, еквівалентно зведений до ланки постійного струму.

Своєю чергою, комплексний опір $R_{d\Sigma}$ містить низку складових: R_{TP} — зведений активний опір трансформаторних обмоток; x_{TP} — зведений індуктивний опір розсіювання узгоджувального трансформатора; $R_{B\Sigma}$ — еквівалентний опір, що враховує неминуче падіння напруги на відкритих напівпровідникових вентилях силової схеми; $k_U = \sqrt{6}/3\pi$ — розрахунковий коефіцієнт пропорційності між діючим значенням змінної напруги та середнім значенням випрямленої.

Випрямлений роторний струм спочатку проходить через процес високочастотного інвертування, а потім спрямовується в обмотку низької напруги узгоджувального трансформатора (який характеризується паспортним коефіцієнтом трансформації K_{TP}). Це закономірно призводить до наведення відповідної електромагнітної ЕРС у його обмотках. Змінна напруга, яка знімається з високовольтної обмотки трансформатора, знову піддається випрямленню діодним мостом. Щоб забезпечити фізичну можливість протікання рекуперованої енергії (струму) через обмотку високої напруги,

середня напруга на виході випрямляча каскадного блоку повинна гарантовано і хоча б на мінімальну величину перевищувати напругу на згладжувальному конденсаторі головного ПЧ. Оскільки рівень напруги на цьому ємнісному накопичувачі підтримується системою практично незмінним, у коло ротора АДФР фактично безперервно транслюється стабільна проти-ЕРС інвертора ($E_{Id} \approx const$). Згідно з електричним балансом, власна ЕРС ротора АД має

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

компенсувати цю проти-ЕРС інвертора і розраховується як:

Спільне алгебраїчне розв'язання системи рівнянь (2.9) та (2.14) дозволяє обчислити ключовий параметр $\Delta\omega_{элк}$ для каскадної схеми, який однозначно визначає режим роботи АДФР за умови дотримання стабільності $E_{Id} \approx const$. В ідеалізованому теоретичному режимі холостого ходу, коли роторний струм повністю падає до нуля, це рівняння максимально спрощується:

$$\Delta\omega_{ЭЛ\,К} = \frac{(E_{Id} + I_{2d} \cdot R_{d\Sigma})\omega_{0ЭЛ}}{K_U \cdot E_{2к} \cdot \gamma} .$$

Необхідне конструктивне значення коефіцієнта трансформації $K_{ТР}$ можна заздалегідь знайти з такого інженерного виразу:

$$E_{2d\alpha} = E_{Id} = U_{Cd} / K_{ТР} .$$

Включення в роботу каскадного рекуперуючого блоку продукує додаткове відчутне збільшення швидкості обертання на величину $\delta\omega_{элк}$, якщо напряму порівнювати з механічними характеристиками електроприводу, ротор якого просто замкнений накоротко:

$$\Delta\omega_{ЭЛ0\,К} = \frac{(E_{Id})\omega_{0ЭЛ}}{K_U \cdot E_{2к} \cdot \gamma} = \frac{(U_{Cd} / K_{ТР})\omega_{0ЭЛ}}{K_U \cdot E_{2к} \cdot \gamma} .$$

У процесі пусконалагодження алгоритмів частотно-струмового керування розрахункове значення $\delta\omega_{элк}$, отримане з виразу (2.17), жорстко та безповоротно задається відповідним програмним блоком завдання частоти струму ротора (БЗ2). Глибокий аналіз рівнянь (2.16) – (2.18) свідчить про те, що

будь-яка оперативна зміна сигналу завдання $\Delta\omega_{эл0к}$ вимагає обов'язкової і строго пропорційної корекції фізичного коефіцієнта трансформації $K_{ТР}$. Саме для реалізації цієї критичної вимоги в апаратній частині схеми ЧКЕ (рисунок 2.3) високовольтна обмотка узгоджувального трансформатора проєктується зі спеціальними відпайками для ступінчастого перемикання.

При математичному моделюванні ЧКЕ з одночасним регулюванням частоти і напруги статора, побудова сімейства механічних характеристик двигуна традиційно здійснюється за відомою формулою Клосса:

$$K_{TP} = \frac{U_{Cd} \cdot \omega_{0ЭЛ}}{\Delta\omega_{ЭЛ0\ K} \cdot K_U \cdot E_{2к} \cdot \gamma}.$$

Згідно з раніше наведеним виразом, поточна ЕРС ротора $E_{2\alpha}$ є багатовимірною функцією не лише від частоти й амплітуди статорної напруги, але й від відносного електромагнітного ковзання. Базова формула моменту, виведена теоретично для короткозамкненого двигуна, зберігає свою абсолютну справедливість і для архітектури ЧКЕ, але виключно за умови жорсткої стабілізації параметра $\delta\omega_{элк}$ системою автоматики. Головна концептуальна відмінність ЧКЕ полягає в тому, що цей параметр $\delta\omega_{элк}$ має динамічно обчислюватися за формулою (2.18) і є прямо залежним від величини додаткової інверторної ЕРС, примусово та контрольовано введеної в роторний контур.

Каскадний модуль, що відповідає за повернення енергії ковзання в ланку постійного струму ПЧ, може мати як компактне однофазне (рисунок 2.3, б), так і повноцінне трифазне виконання, залежно від номінальної встановленої потужності електроприводу. Промислова практика показує, що для відносно малопотужних приводів (до 30 кВт) економічно цілком виправдано застосовувати спрощені однофазні каскадні блоки. Натомість для значно потужніших кранових механізмів оптимальним та надійним вибором стає трифазна конфігурація. Структурна схема силової частини ЧКЕ з інтегрованим трифазним каскадним модулем на базі АІН наведена на рисунку 2.5.

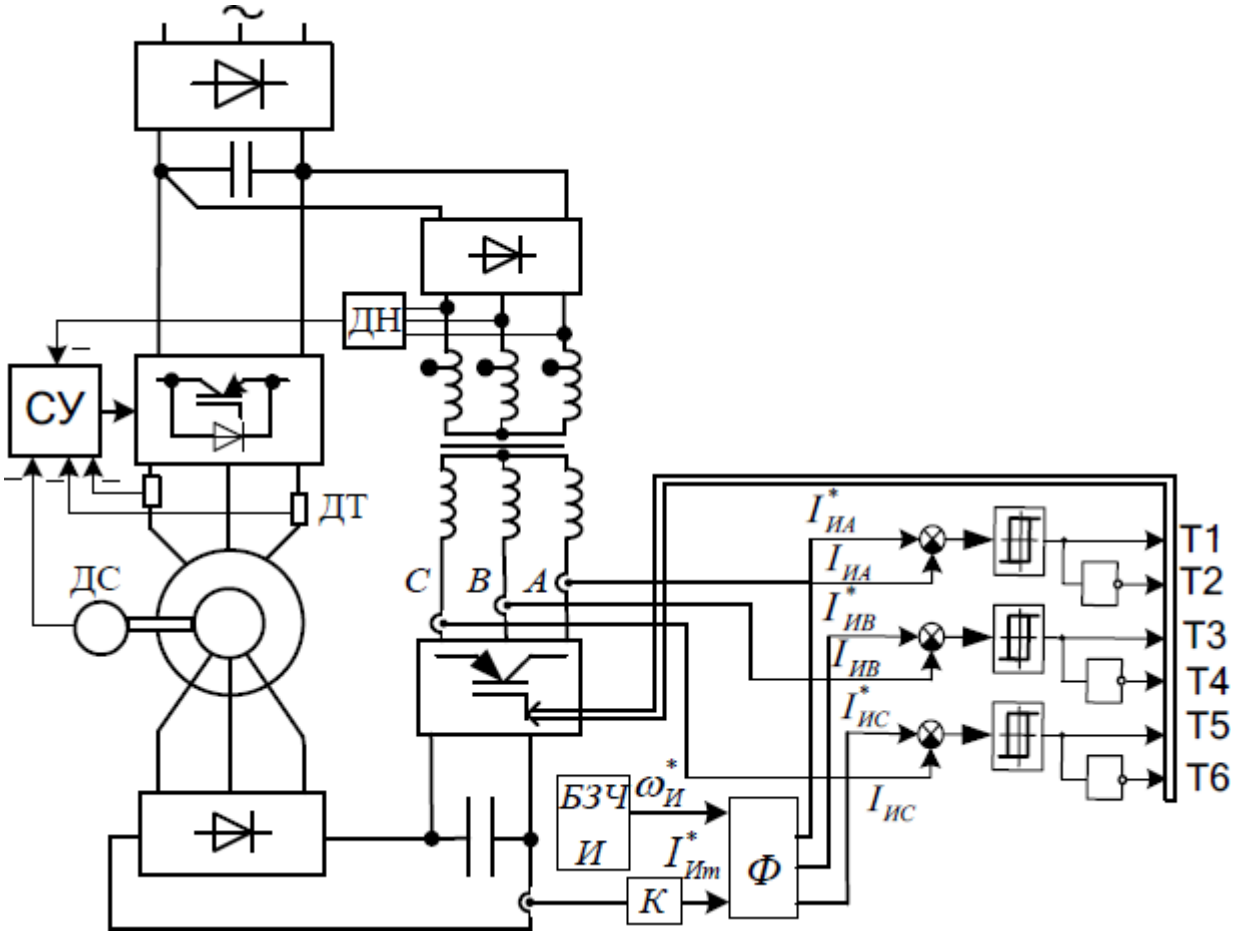


Рисунок 2.5 – Силова конфігурація ЧКЕ на основі АІН із застосуванням трифазного релейного каскадного блоку

Інверторний каскад може гнучко налаштовуватися на генерацію різної вихідної частоти. Підвищення цієї частоти понад стандартні 50 Гц дозволяє суттєво (іноді в рази) зменшити масогабаритні показники узгоджувального трансформатора, проте це неодмінно вимагатиме виготовлення специфічного нестандартного магнітопровода з високочастотних сплавів. При проєктуванні трифазного каскадного модуля інженери вважають за доцільне використовувати АІН із системою управління, побудованою на базі надійних релейних регуляторів струму (РРС). За такого підходу трансформатор працюватиме з напругою стандартної промислової частоти 50 Гц, яку легко та без перегріву генерує АІН при звичайній частоті комутації IGBT-транзисторів (до 2,5 кГц). При цьому абсолютно ключовою вимогою до алгоритму роботи інвертора є стовідсоткове забезпечення безперервності струму в індуктивних обмотках ротора АДФР.

У розглянутій конфігурації ЧКЕ (рисунок 2.3) вибір оптимального рівня керуючого сигналу завдання на кругову частоту роторної ЕРС $\Delta\omega_{эл0к}^* = \omega 2\alpha$ напряму залежить від фактичної амплітуди ЕРС ротора $E_{2\alpha}$, стабільність якої є найкритичнішою умовою для успішного та безвідмовного пуску двигуна. На етапі важкого пуску струм ротора досягає свого пікового значення I_{2max}. Щоб процес перекачування енергії з роторного кола назад у статорне відбувався коректно та без збоїв, під час частотного регулювання величина генерованої ЕРС ротора повинна завжди і з надійним запасом перевищувати сумарне

$$\delta\Delta\omega_{эл\ к} = \frac{E_{и\,d}\,\omega_{0эл}}{K_U \cdot E_{2к} \cdot \gamma}.$$

падіння напруги на комплексному внутрішньому опорі Z_2 самої обмотки ротора. Мінімально допустима діюча напруга на виході інвертора наближено розраховується за такою формулою:

де $K_П$ — емпіричний поправочний коефіцієнт, що наближено враховує сумарні теплові втрати напруги в міді ротора та на напівпровідникових вентилях силової схеми при заданому струмовому навантаженні.

Водночас, середня випрямлена напруга на виході трансформатора має за будь-яких умов бути не нижчою за напругу випрямленої мережі живлення:

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

де $K_{ТР}$ — коефіцієнт трансформації трифазного узгоджувального трансформатора; K — розрахунковий перевідний коефіцієнт зведення змінної інверторної напруги до ланки постійного струму (його значення залежить від фазності каскаду); Uc — діюча лінійна напруга живильної мережі.

З метою високоточного та безперервного узгодження випрямленої напруги трансформатора та програмного завдання частоти роторного струму $\Delta\omega_{эл}^* = \omega_2^*$ у вдосконалених системах ЧКЕ (що зображені на рисунках 2.3, б та 2.5) імплементовано інтелектуальний контур корекції завдання $\Delta\omega_{эл}^*$. Цей контур працює за класичним принципом негативного зворотного зв'язку по напрузі

U_{d2TP} (задіюючи швидкодіючі датчики напруги та мікропроцесорний розрахунковий блок) і миттєво реагує на будь-які відхилення випрямленої

$$U_{И\min} = \left|\dot{E}_{2\alpha} - \dot{I}_{2\max} \cdot \dot{Z}_2\right| \approx \frac{E_{2\alpha}}{K_П},$$

напруги від еталонного математичного значення. Сигнал корекції, зважаючи на раніше виведене рівняння (2.17), обчислюється як:

де $K_{ку}$ — налаштувальний коефіцієнт передачі пропорційної коригувальної ланки ($K_{ку} = \omega_0 / (K_U \cdot E_{2k} \cdot \gamma)$, точне значення якого ретельно підбирається на етапі пусконалагоджувальних робіт на реальному об'єкті.

Впровадження такого інтелектуального контуру корекції повністю унеможливлює виникнення аварійних режимів роботи каскадного блоку, пов'язаних із критичним просіданням вихідної напруги, коли струм циркулює винятково по низьковольтній обмотці трансформатора, спричиняючи її перегрів.

У схемі ЧКЕ, що представлена на рисунку 2.5, застосовано каскадний модуль із надзвичайно надійним релейним принципом керування струмами. Математичний апарат, що детально описує функціонування РРС у системі управління інвертором, систематизовано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Математичні моделі релейних регуляторів струму (РРС) у структурі каскадного блоку

Сигнали	Формули	Номер формули
Сигнали на виході вузлів порівняння	$\begin{cases} \Delta I_{Иa} = I^*_{Иa} - I_{Иa}; \\ \Delta I_{Иb} = I^*_{Иb} - I_{Иb}; \\ \Delta_{Иc} = I^*_{Иc} - I_{Иc}. \end{cases}$	(2.24)
Стан сигналів на виході РРС	$\begin{cases} \text{Якщо } \Delta I_и \le -\frac{\tau}{2}, \text{ на виході стан (0);} \\ \text{Якщо } \Delta I_и \ge -\frac{\tau}{2}, \text{ на виході стан (1).} \end{cases}$	(2.25)
Величина гістерезису	$\tau = \frac{\left\|\dot{I}^*_{Иm}\right\|_{\max}}{100}.$	(2.26)

Базове значення сигналу завдання амплітуди фазного струму інвертора математично та жорстко пов'язане із середнім значенням випрямленого струму ротора АД через пропорцію:

$$\left|\dot{I}^{*}_{Им}\right| = \sqrt{2} I_{2d} \cdot K_I .$$

де $K_I = \sqrt{6}/\pi$ — стандартний перевідний коефіцієнт для класичної трифазної мостової схеми, який узгоджує діюче значення змінного струму з його випрямленим постійним еквівалентом.

Програмний формувач Ф отримує на свої входи еталонний сигнал частоти $\omega_И^*$ та розраховане амплітудне завдання $|I_{Им}^*|$, після чого синтезує точні поточні завдання для миттєвих значень фазних струмів інвертора.

Архітектура комплексного управління ЧКЕ може будуватися і за більш досконалим векторним принципом (як проілюстровано на рисунку 2.6). Цей перспективний підхід є еволюційним розвитком існуючих векторних систем для короткозамкнених АД, але додатково оснащується контуром динамічної корекції поздовжньої (намагнічувальної) складової статорного струму.

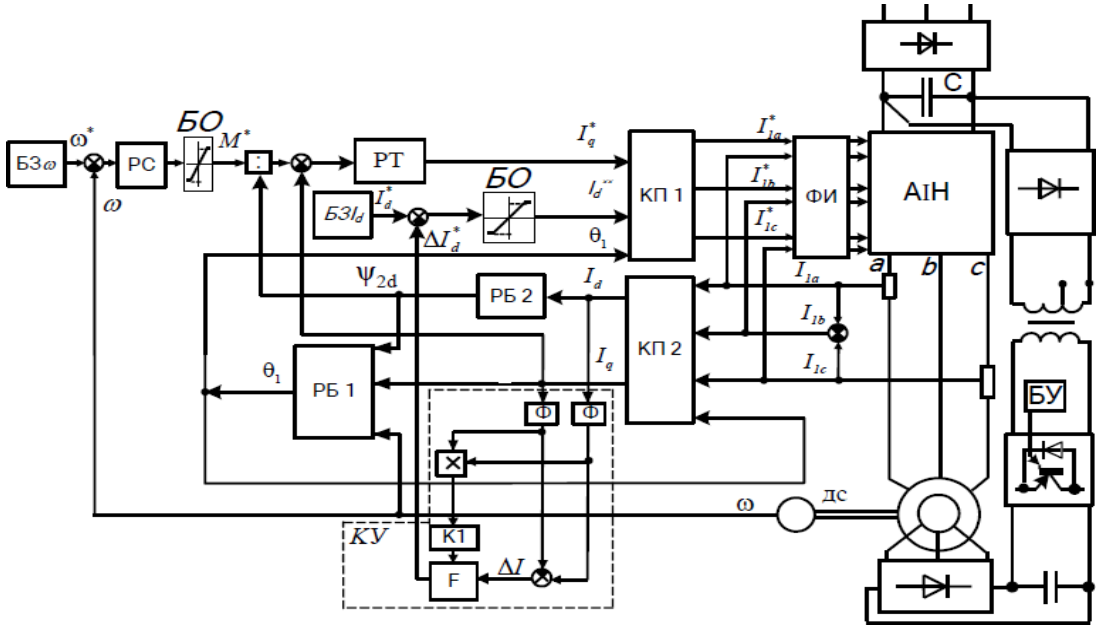


Рисунок 2.6 – Структурна схема частотно-каскадного електроприводу з алгоритмом векторного керування та динамічною компенсацією поздовжньої складової струму статора

Варто об'єктивно визнати, що апаратна та алгоритмічна реалізація векторної системи керування для ЧКЕ є на порядки складнішою порівняно з перевіреним частотно-струмовим підходом (рисунок 2.3, б). Специфіка полягає в тому, що програмний блок компенсації поздовжньої складової струму активується лише після повного завершення важкого перехідного пускового процесу електроприводу. Саме тому для типових кранових підйомно-транспортних механізмів, які характеризуються екстремальними повторно-короткочасними режимами роботи з постійними пусками та гальмуваннями, технічно та економічно доцільнішим залишається використання саме ЧКЕ з підпорядкованим частотно-струмовим управлінням.

Альтернативним і вельми цікавим варіантом виконання каскадного модуля в системі ЧКЕ є використання трифазного паралельного резонансного інвертора струму. Така силова конфігурація підкуповує своєю апаратною простотою та феноменальною легкістю налаштування, при цьому вона здатна природним чином генерувати криву миттєвих значень струму, яка дуже близька до ідеальної гладкої синусоїди. Резонансний інвертор струму функціонує на жорстко заданій вихідній частоті, яка повністю і безумовно визначається фізичними параметрами внутрішнього резонансного контуру (утвореного еквівалентною індуктивністю трансформаторних обмоток та ємністю спеціальних комутувальних конденсаторів). Завдяки цьому каскадний блок стає абсолютно автономним пристроєм і не потребує складних мікропроцесорних систем керування імпульсами. Єдиним експлуатаційним нюансом є необхідність попереднього примусового заряджання батареї комутувальних конденсаторів перед кожним повноцінним пуском приводу.

Подібні високоефективні трифазні резонансні інвертори також знаходять успішне застосування в суміжних схемах частотно-параметричного електроприводу. У таких специфічних випадках конденсаторна батарея зазвичай збирається з шести потужних елементів і підключається до комплексного активно-індуктивного навантаження.

Протягом усього технологічного циклу роботи в системі ЧКЕ автоматично підтримується відносно стабільний рівень ЕРС ротора. Це означає, що при

використанні резонансного інвертора в ролі каскадного рекуперуючого блоку відпадає будь-яка потреба у формуванні додаткових зовнішніх керуючих впливів. Цей модуль ефективно та непомітно транслює в ланку постійного струму ПЧ надлишкову потужність ковзання, яка при номінальних механічних навантаженнях зазвичай не перевищує 10–15% від загальної споживаної потужності.

Проведені лабораторні стендові та глибокі комп'ютерні дослідження однодвигунної конфігурації ЧКЕ із зустрічно-паралельним каскадним модулем безапеляційно засвідчили її високу енергетичну ефективність. Встановлено, що максимальна чиста економія електроенергії (споживання з мережі) під час циклу розгону зі стабілізованим абсолютним ковзанням β_{α}= 0,15) сягає приблизно 4% порівняно з класичним частотним пуском аналогічного АДФР із закороченим ротором. Зважаючи на такі переконливі енергетичні показники, інтеграція каскадного блоку розкриває свій максимальний технічний потенціал саме в потужних дводвигунних системах ЧКЕ механізмів пересування мостів, де він може виконувати додаткову, надзвичайно важливу та складну функцію — жорстку електромеханічну синхронізацію швидкостей обох тягових двигунів.

2.2 Математичний опис та основні властивості двомасової ЕМС з дводвигунним електроприводом

Електромеханічні комплекси, які забезпечують переміщення козлових та мостових кранових установок, традиційно комплектуються системами дводвигунного, а в окремих випадках і чотирьохдвигунного електроприводу. З точки зору динаміки та теорії автоматичного керування, такі механізми розглядаються як складні нелінійні багатомасові об'єкти, що характеризуються наявністю пружних механічних зв'язків між окремими елементами конструкції.

Вибір розрахункової схеми для дослідження таких об'єктів напряму залежить від поставленої наукової чи інженерної задачі. Наприклад, якщо головною метою аналізу є вивчення процесів маятникового розгойдування підвішеного вантажу під час руху кранового моста, дослідники застосовують

детальну тримасову динамічну модель. У тому ж випадку, коли фокус уваги зміщується виключно на дослідження пружних деформацій самої металевої ферми моста (особливо це актуально для режимів руху крана без корисного навантаження або з вантажем незначної маси), електромеханічну систему цілком коректно представляти у вигляді спрощеної двомасової дводвигунної розрахункової моделі. Саме такий еквівалентний кінематичний підхід проілюстровано на рисунку 2.5.

Для побудови адекватної математичної моделі та спрощення наступних розрахунків вводиться низка класичних фізичних припущень. Зокрема, трансмісійні вали, які передають крутний момент від тягових електродвигунів до ходових коліс, вважаються абсолютно жорсткими. Крім того, при складанні рівнянь нехтують можливими технологічними зазорами та люфтами у зубчастих передачах редукторів, що дозволяє уникнути надмірної ускладненості математичної моделі нелінійностями.

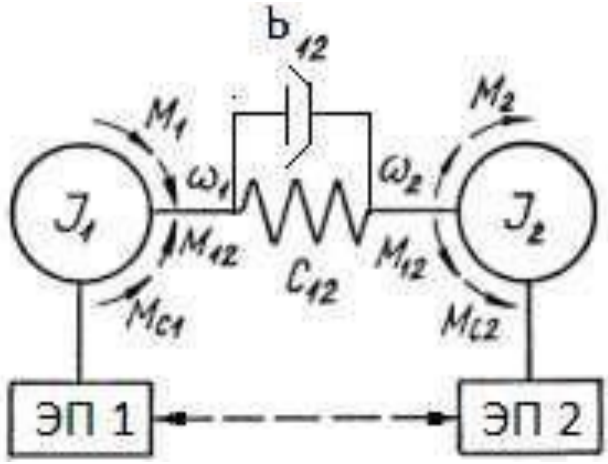


Рисунок 2.5 - Еквівалентна кінематична розрахункова модель дводвигунної системи з двома зосередженими масами

З метою зведення всіх рухів системи до єдиної розрахункової осі (зазвичай до валу двигуна) застосовується стандартна методика кінематичного зведення мас, що рухаються поступально. Цей процес базується на використанні спеціального коефіцієнта зведення, який функціонально залежить від геометричного радіуса ходового колеса та загального передавального коефіцієнта всіх елементів кінематичного ланцюга. Завдяки цій методиці, реальні маси елементів крана, що здійснюють поступальний рух, еквівалентно

замінюються на приведені моменти інерції уявних обертових мас. Аналогічним чином і сили опору, що діють на тіла під час поступального руху, математично перераховуються у відповідні наведені статичні моменти на валах приводних двигунів.

Динамічна поведінка наведеної двомасової дводвигунної системи вичерпно описується системою диференціальних рівнянь руху. Ця модель відображає фундаментальний фізичний баланс крутних моментів в електромеханічній системі. Рівняння враховують електромагнітні моменти, що генеруються обома двигунами, пружний момент механічної взаємодії між двома виділеними масами, а також моменти інерції наведених обертових мас. Важливими параметрами цих диференціальних рівнянь є коефіцієнт жорсткості пружного механічного зв'язку та коефіцієнт в'язкого тертя, який відповідає за дисипацію (природне розсіювання) енергії та поступове демпфування коливальних процесів.

Для подальшого синтезу систем автоматичного керування отримана система диференціальних рівнянь зазвичай перетворюється за допомогою перетворення Лапласа і подається в зручній операторній формі. У такій інтерпретації самі тягові електродвигуни можна описати відповідними передавальними функціями. Якщо свідомо знехтувати дуже швидкими електромагнітними перехідними процесами в статорних та роторних обмотках (оскільки вони протікають на порядки швидше за електромеханічні перехідні процеси масивних механізмів крана), то динамічні властивості двигунів наближено дорівнюватимуть жорсткості їхніх статичних механічних характеристик.

З метою додаткового спрощення математичного опису та полегшення аналізу приймається умова жорсткої сталості показників механічних характеристик обох двигунів протягом усього робочого циклу. Додатково вводиться теоретичне припущення про абсолютну рівність їхніх швидкостей ідеального холостого ходу. Впровадження цих допущень дозволяє суттєво оптимізувати операторні рівняння, звівши їх до лаконічної форми, яка ідеально підходить для побудови структурних схем.

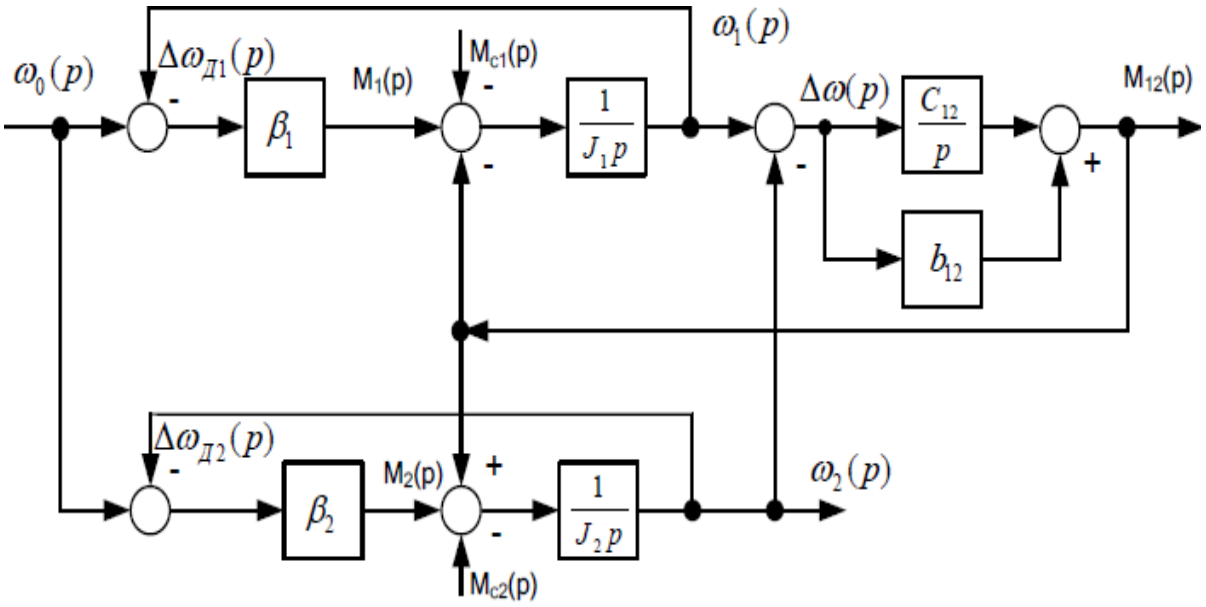


Рисунок 2.6 - Блок-схема взаємозв'язків у пружній двомасовій дводвигунній системі керування

Побудована за цими оптимізованими рівняннями структурна схема пружної системи демонструє доволі складний багатоконтурний характер внутрішніх взаємодій. Для безпомилкового знаходження шуканих еквівалентних передавальних функцій у такій багатоконтурній перетвореній системі найдоцільніше застосовувати відоме топологічне правило Мейсона. Якщо як базовий вхідний керівний вплив розглядати операторне подання швидкості ідеального холостого ходу приводних двигунів, то алгоритм Мейсона дозволяє чітко виокремити прямі шляхи та замкнені контури системи. Зведені дані щодо цих структурних блоків систематизовано в таблиці нижче.

Фінальний аналіз складених передавальних функцій дозволяє сформувати загальне характеристичне рівняння досліджуваної електромеханічної системи. Математичні перетворення показують, що знаменник еквівалентної передавальної функції, який і формує характеристичне рівняння, має третій порядок.

Таблиця 2.3

Аналітичний опис структурних компонентів моделі без застосування коригувальних контурів

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 торкаються прямого шляху $W_1(p)$	$-\beta_1\frac{1}{J_1 p}$
Контур, що не торкаються прямого шляху $W_2(p)$	$-\beta_2\frac{1}{J_2 p}$

З позицій класичної теорії автоматичного керування, наявність характеристичного полінома третього ступеня безпосередньо вказує на те, що двомасова електромеханічна система, керована дводвигунним електроприводом, є яскраво вираженою коливальною системою. Цю фундаментальну властивість необхідно в обов'язковому порядку враховувати інженерам при розробці та налаштуванні алгоритмів компенсації динамічних навантажень мостових кранів.

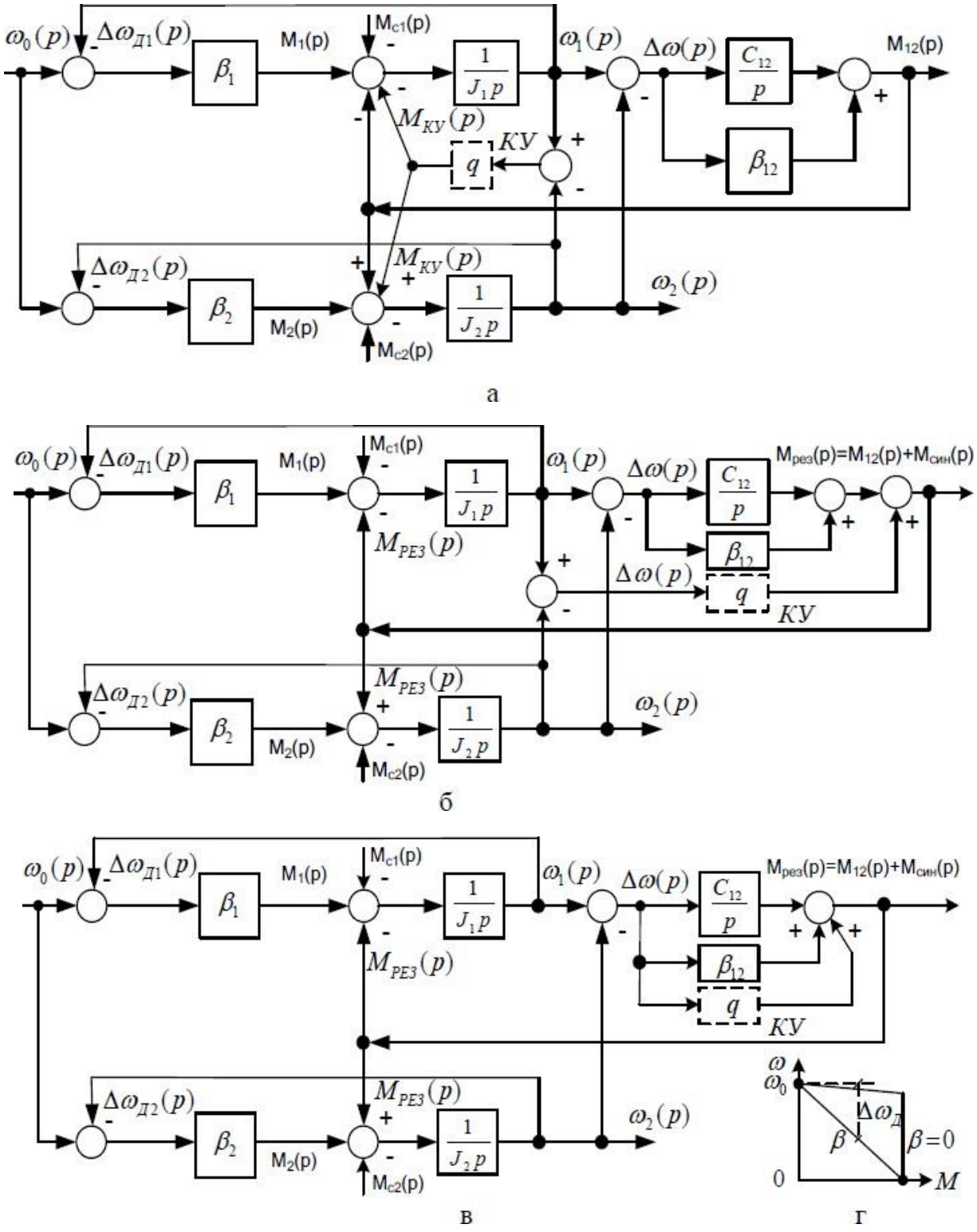
2.3 Корекція динамічних характеристик двомасової ЕМС з дводвигунним електроприводом

Здатність замкнених систем регульованого електроприводу ефективно демпфувати (гасити) небажані механічні коливання визначається двома основними чинниками: природною жорсткістю статичної механічної характеристики тягових агрегатів та наявністю спеціалізованих коригувальних контурів зворотного зв'язку. У конфігурації дводвигунного приводу, за умови оснащення валів обох машин надійними датчиками швидкості, з'являється

технічна можливість реалізувати перехресну корекцію крутних моментів. Головна ідея такого підходу полягає у штучному генеруванні синхронізувального моменту, який в автоматичному режимі додає тягового зусилля тому двигуну, що відстає, і пропорційно пригальмовує той, що випереджає графік руху.

Математично роботу такого коригувального пристрою можна описати цілком лінійною залежністю. Величина формованого синхронізувального моменту приймається прямо пропорційною до поточної різниці кутових швидкостей першого та другого двигунів, помноженої на встановлений коефіцієнт передачі пропорційної коригувальної ланки.

На рисунку 2.7 (варіант «а») наочно проілюстрована початкова структурна схема досліджуваної пружної двомасової електромеханічної системи. Її ключовою відмінністю є інтеграція негативного зворотного зв'язку за різницею швидкостей (позначимо його як НЗ Δω), що реалізується окремим апаратно-програмним модулем. Для зручності сприйняття розподіл знаків у вузлах порівняння виконано з робочим припущенням, що другий двигун наразі обертається швидше за перший. Шляхом застосування класичних правил еквівалентних перетворень структурних схем автоматики, цю початкову модель можна поетапно спростити спочатку до проміжного стану (рисунок 2.7, б), а згодом — до фінального оптимізованого вигляду (рисунок 2.7, в). Детальний аналіз кінцевої розрахункової схеми дозволяє зробити фундаментальний висновок: після всіх алгебраїчних маніпуляцій ланка штучної корекції опиняється включеною строго паралельно до ланки, що відповідає за природне в'язке тертя в металоконструкції. Це означає, що запровадження алгоритму НЗ Δω радикально підсилює сумарний демпфувальний ефект, спрямований на придушення коливального процесу.



а - початкова конфігурація з контуром НЗ Δω; б - проміжна стадія еквівалентних перетворень; в - кінцева оптимізована структурна схема; г - графічне подання механічних характеристик приводів.

Рисунок 2.7 - Етапи перетворення структурної моделі двомасової дводвигунної електромеханічної системи

За своєю фізичною природою згенерований керувальною системою синхронізувальний вплив є абсолютно тотожним до дії реальних дисипативних сил в'язкого тертя, які виникають у матеріалі пружного механічного зв'язку (прогоновій балці крана) під час її деформації. Цей факт знаходить своє беззаперечне аналітичне підтвердження при застосуванні правила Мейсона до початкового багатоконтурного графа (рисунок 2.7, а). Відповідні математичні вирази для всіх виявлених прямих шляхів та ізольованих контурів були виведені та систематизовані в таблиці 2.4, ставши основою для подальшого аналізу.

Таблиця 2.4

Компоненти структурної моделі (рисунок 2.7, а) за наявності алгоритму корекції НЗ $\Delta\omega$

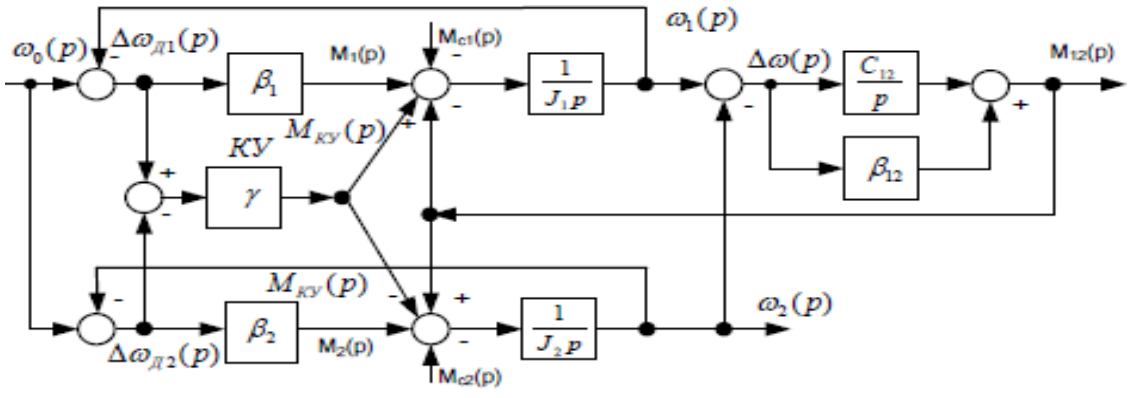
Структурні блоки	Аналітичний опис компонентів
Прямий шлях передачі	Математичний вираз еквівалентної передавальної функції головного каналу
Замкнені контури	Аналітичні залежності для кожного індивідуального зворотного зв'язку
Несуміжні пари контурів	Алгебраїчні добутки контурів, що не мають спільних вузлів
Контури, незалежні від шляху 1	Передавальні функції ізольованих ділянок відносно першого каналу
Контури, незалежні від шляху 2	Передавальні функції ізольованих ділянок відносно другого каналу

У результаті зведення всіх структурних елементів формується головне характеристичне рівняння замкненої системи. Воно являє собою поліном третього порядку. Найважливішою ознакою цього рівняння є те, що фізичний коефіцієнт внутрішнього тертя пружного зв'язку та коефіцієнт підсилення штучної корекції математично виступають як проста алгебраїчна сума. Відповідно, якщо програмно відключити систему корекції (прирівнявши її коефіцієнт до нуля), рівняння миттєво набуває свого базового вигляду, характерного для нескоригованої системи кранового приводу.

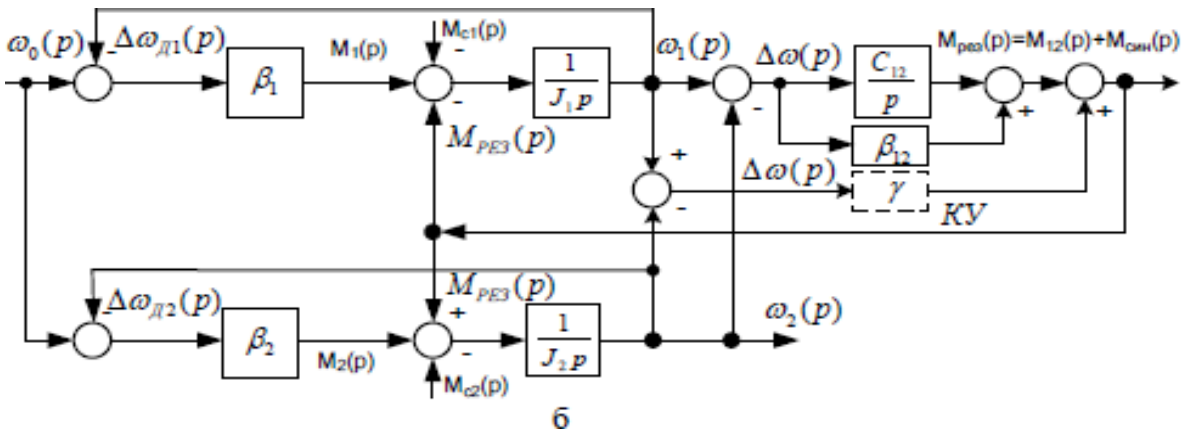
При проєктуванні дводвигунних систем на базі асинхронних двигунів з фазним ротором (АДФР) варто враховувати їхню специфіку: напруги на роторних кільцях визначаються електрорушійною силою (ЕРС), яка жорстко

пропорційна ковзанню — тобто відхиленню фактичної швидкості ротора від швидкості обертання магнітного поля статора. Оскільки частота живильної мережі для обох статорів ідентична, їхні поля обертаються з однаковою швидкістю ідеального холостого ходу. Саме тому для АДФР технічно та алгоритмічно доцільніше застосовувати дещо інший різновид корекції — негативний зворотний зв'язок за різницею відхилень швидкостей машин від їхньої ідеальної швидкості холостого ходу (назвемо його НЗ $\Delta\omega_\gamma$).

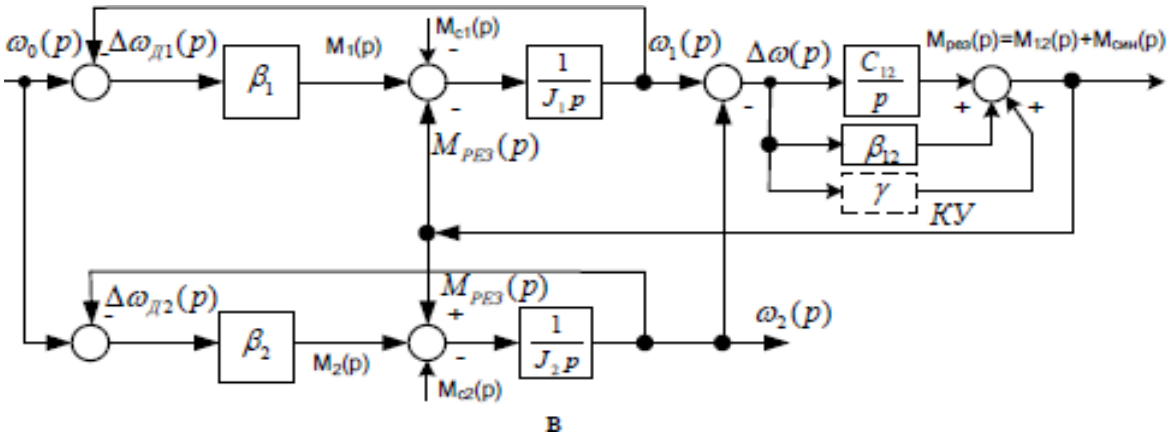
Для теоретичної оцінки ефективності такого підходу в базову структурну модель системи інтегрується додаткова пропорційна ланка з певним коефіцієнтом передачі, яка фізично реалізує алгоритм НЗ $\Delta\omega_\gamma$ (рисунок 2.8, а). Коригувальний вплив у цьому випадку розраховується як добуток згаданого коефіцієнта передачі на різницю швидкісних відхилень обох машин. Виконуючи вже знайому процедуру перенесення вузлів порівняння та спрощення контурів, вихідна схема (рисунок 2.8, а) трансформується у проміжну (рисунок 2.8, б), а потім набуває лаконічного кінцевого вигляду (рисунок 2.8, в). Оскільки дія НЗ $\Delta\omega_\gamma$ одночасно втручається у формування моментів обох двигунів, її ефект також цілком ідентичний впровадженню віртуального пружного вала, який примусово підтягує швидкість відстаючого механізму за рахунок гальмування лідера.



а



б



а - базова конфігурація з контуром НЗ $\Delta\omega_\gamma$; б - проміжна трансформація графа; в - остаточна розрахункова схема

Рисунок 2.8 - Еволюція структурної моделі двомасової дводвигунної системи з корекцією швидкісних відхилень

Для отримання результуючої передавальної функції, що пов'язує вихідний пружний момент із вхідним керувальним сигналом (за умови відсутності зовнішніх статичних збурень), а також для виведення характеристичного полінома, знову задіюється топологічний метод Мейсона. Всі необхідні для цього проміжні математичні вирази елементів графа зведені до таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

Елементи графа передач для структурної схеми (рисунок 2.8, а) з алгоритмом корекції НЗ $\Delta\omega_\gamma$

Структурні блоки	Аналітичний опис компонентів
Прямий шлях передачі	Математичний опис головного вектора проходження сигналу
Замкнені контури	Аналітичні залежності локальних зворотних зв'язків
Несуміжні пари контурів	Добутки передавальних функцій незалежних петель
Контури, незалежні від шляху 1	Вирази для контурів, що не мають спільних вузлів із першим каналом
Контури, незалежні від шляху 2	Вирази для контурів, що не мають спільних вузлів із другим каналом

Співставляючи характеристичні рівняння системи без корекції та моделей, оснащених контурами НЗ $\Delta\omega$ або НЗ $\Delta\omega_\gamma$, можна сформулювати низку важливих теоретичних висновків. По-перше, жоден із цих алгоритмів не змінює загального порядку диференціального рівняння системи (воно залишається

рівнянням третього порядку). По-друге, введення корекції математично проявляється у збільшенні числових значень коефіцієнтів при першому та другому ступенях оператора Лапласа, тоді як вільний член та старший коефіцієнт залишаються недоторканими. Згідно з класичними критеріями стійкості систем автоматичного керування, таке зростання середніх коефіцієнтів прямо свідчить про суттєве розширення запасу динамічної стійкості комплексу. У підсумку, обидва алгоритми (НЗ $\Delta\omega$ або НЗ $\Delta\omega_\gamma$) гарантують ідентичний позитивний результат — глибоке та надійне демпфування коливань у дводвигунному крановому приводі.

Особливий інтерес становить дослідження динаміки системи під час важкого пуску за ідеально "м'якими" механічними характеристиками, коли їхня власна жорсткість дорівнює нулю. Відповідна структурна модель без систем зовнішньої корекції подана на рисунку 2.9. У такому специфічному режимі передавальна функція від керувального впливу до моменту у пружному зв'язку суттєво спрощується. Корені отриманого характеристичного рівняння завжди лежать у лівій півплощині комплексної площини (мають негативну дійсну частину). З огляду на те, що власна частота вільних коливань металевого моста крана зазвичай становить від 5 до 10 радіан за секунду, наявність від'ємної дійсної частини коренів гарантує, що навіть за відсутності електромагнітного демпфування коливання неминуче згаснуть завдяки внутрішньому мікротертю в металі.

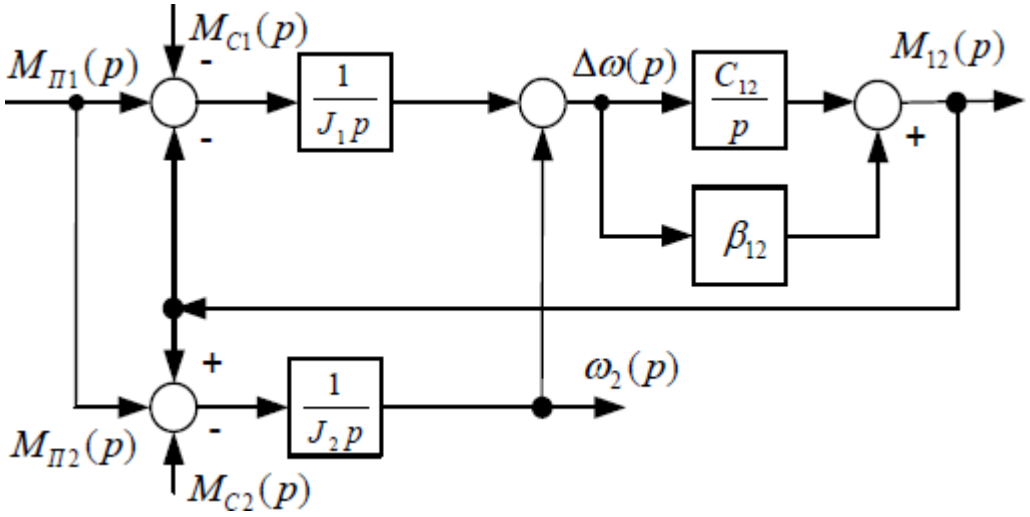


Рисунок 2.9 - Базова структурна схема двомасової дводвигунної системи під час пуску за ідеально "м'якими" характеристиками без зовнішньої корекції

Для кількісної оцінки впливу зворотного зв'язку НЗ $\Delta\omega_\gamma$ на процес гасіння коливань, інтегруємо його в розрахункову модель режиму пуску за "м'якими" характеристиками (як це показано на рисунку 2.10). За нульової жорсткості характеристик обох машин передавальна функція системи набуває специфічного вигляду, а її знаменник утворює нове характеристичне рівняння.

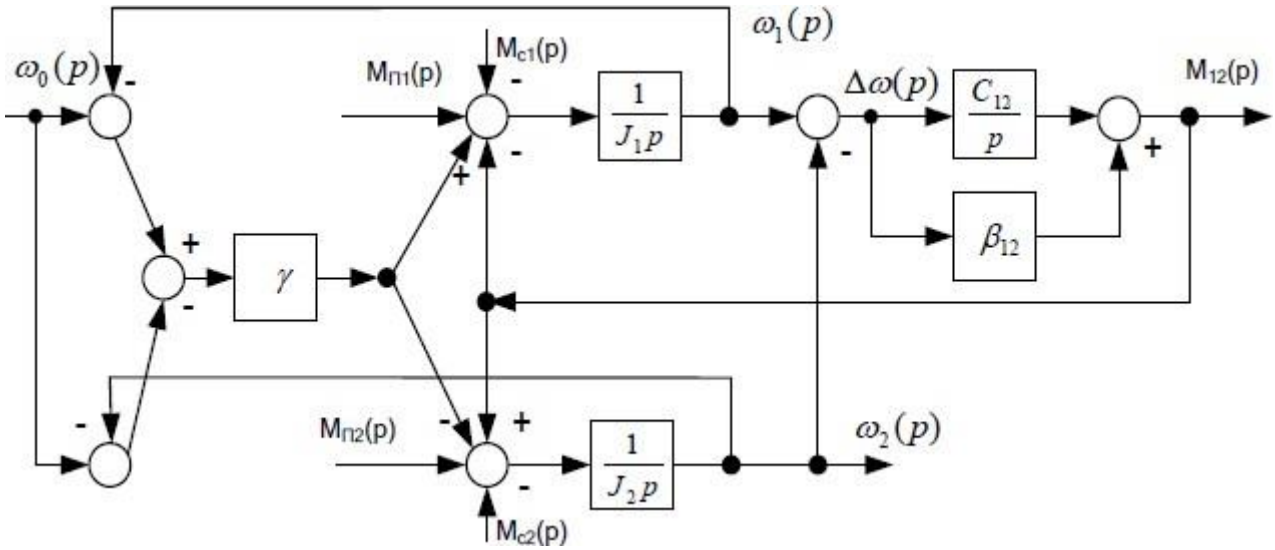


Рисунок 2.10 - Модифікована структурна модель системи під час пуску за "м'якими" характеристиками із залученням контуру корекції НЗ $\Delta\omega_\gamma$

Шляхом алгебраїчних перетворень це рівняння можна легко звести до класичної канонічної форми запису, яка описує типову коливальну ланку другого порядку. З такого канонічного вигляду безпосередньо виводяться формули для розрахунку еквівалентної електроміханічної постійної часу та безрозмірного коефіцієнта загасання. Аналітичні викладки неспростовно доводять, що результувальний коефіцієнт загасання має сувору лінійну залежність від суми двох складових: фізичного коефіцієнта внутрішнього в'язкого тертя пружної балки та коефіцієнта підсилення введеної системи корекції. Звідси випливає аксіома: активація програмного контуру НЗ $\Delta\omega_\gamma$ завжди призводить до підвищення загального показника загасання коливань.

Отже, незалежно від обраної архітектури (чи то НЗ $\Delta\omega$, чи НЗ $\Delta\omega_\gamma$), коригувальні пристрої здійснюють на систему вплив, який математично та фізично тотожний збільшенню жорсткості та в'язкості самого металу конструкції, гарантуючи плавність ходу механізму.

Проте під час реальної багаторічної експлуатації мостових кранів виникає додатковий збурювальний фактор — нерівномірне стирання реборд та бандажів ходових коліс, що призводить до різниці в їхніх геометричних діаметрах. Щоб врахувати це в математичній моделі, до структурної схеми додається спеціальна масштабувальна ланка, яка пропорційна відношенню діаметрів провідних коліс різних бортів.

Практичні розрахунки переконують, що мікроскопічна різниця в діаметрах (у межах до 1%) жодним чином не деформує картину швидкісних високочастотних динамічних процесів, навіть за активної роботи систем перехресної корекції. Лінійне переміщення кожної з опор кранового моста можна точно розрахувати як інтеграл за часом від кутової швидкості відповідного приводного двигуна, помножений на еквівалентний радіус кінематичного зведення лінійного руху до обертального.

Однак, з цих кінематичних залежностей випливає одна вкрай важлива експлуатаційна закономірність. Якщо мостовий кран має реальну асиметрію діаметрів коліс і виконує тривалий рейс уздовж цеху, жорстка примусова синхронізація кутових швидкостей двигунів завдасть більше шкоди, ніж користі. Обертаючись з однаковою швидкістю, колеса різних діаметрів проходитимуть різний лінійний шлях, що призведе до небезпечного накопичення перекосу моста відносно підкранових колій. Тому в системах керування передбачається жорстке правило: алгоритми синхронізації швидкостей є критично важливими під час інтенсивних розгонів та гальмувань для гасіння пружних коливань, але під час тривалого стабільного руху на великі відстані цей контур корекції має бути автоматично відключений.

Висновки до розділу 2

У другому розділі кваліфікаційної роботи проведено комплексне дослідження та аналіз динамічних властивостей електромеханічної системи (ЕМС) механізмів пересування мостових кранів. Для точного опису фізичних процесів, зокрема пружних деформацій металевої ферми моста під час руху, сформовано математичні моделі у вигляді еквівалентних двомасових систем з

однодвигунним та дводвигунним електроприводами. Шляхом застосування кінематичного зведення мас та структурних перетворень доведено, що такі механізми є складними нелінійними коливальними об'єктами, природної демпфуючої здатності яких (внутрішнього тертя металу) часто буває недостатньо для стабільного і плавного функціонування.

З метою зниження динамічних навантажень та ефективного пригнічення пружних коливань, особливо в інтенсивних перехідних режимах пуску і гальмування, досліджено методи корекції динамічних характеристик дводвигунного електроприводу. Обґрунтовано високу ефективність впровадження спеціалізованих коригувальних контурів, таких як негативний зворотний зв'язок за різницею швидкостей двигунів або за різницею їх відхилень від швидкості ідеального холостого ходу. Встановлено, що ці алгоритми автоматично генерують синхронізувальний момент, дія якого фізично еквівалентна посиленню внутрішніх дисипативних сил в'язкого тертя в матеріалі моста. Завдяки цьому суттєво підвищується загальний коефіцієнт загасання системи, нівелюються динамічні удари та значно покращується плавність ходу крана.

Окремо проаналізовано вплив експлуатаційних збурюючих факторів на роботу двомасової ЕМС, головним з яких є проблема нерівномірного зношування бандажів та відповідної різниці діаметрів ходових коліс. Встановлено, що при тривалих лінійних переміщеннях крана вздовж цеху робота алгоритмів жорсткої синхронізації кутових швидкостей може призвести до проходження колесами різного шляху, що неминуче викликає небезпечне накопичення перекосу моста відносно підкранових колій. З огляду на це, сформульовано важливу експлуатаційну вимогу: для безпечної та надійної роботи обладнання контури перехресної корекції швидкостей повинні бути активними виключно на етапах розгону та гальмування для швидкого гасіння коливань, але їх необхідно автоматично відключати під час тривалого усталеного руху.

РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ОДНОДВИГУННОГО ТА ДВОДВИГУННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

З метою всебічної практичної перевірки та експериментального підтвердження ефективності роботи системи корекції, яка використовує загальний вентильно-резисторний модуль для цілеспрямованої зміни механічних характеристик тягових двигунів, було спроєктовано та змонтовано спеціалізований лабораторний експериментальний комплекс. Його електромеханічна база складається з двох абсолютно ідентичних досліджуваних асинхронних машин з фазним ротором (позначені як АД1 та АД2, тип МТ 012-6, з номінальною потужністю $P_н$ = 2.2 кВт). Для імітації реальних умов експлуатації та створення керованого опору на валах, з ними механічно з'єднані дві однакові навантажувальні машини постійного струму з незалежним збудженням (позначені як НМ1 та НМ2, тип ДП 12, з номінальною потужністю $P_н$ = 3 кВт). Принципова електрична схема цього стенду детально проілюстрована на рисунку 3.1. Під час проведення дослідів випробовувані машини (ВМ) функціонують в активному руховому режимі, перетворюючи електричну енергію на механічну, тоді як навантажувальні машини (НМ) переведені в режим електродинамічного гальмування. Величина механічного навантаження для першого агрегату регулюється оператором вручну шляхом зміни активного опору в колі якоря першого навантажувального двигуна із застосуванням прецизійного лабораторного реостата R_y. Величина гальмівного моменту, що генерується навантажувальною машиною, розраховується за класичною аналітичною залежністю:

$$M = c \cdot \Phi_n \cdot I$$

де c — конструктивна стала навантажувальної машини постійного струму;

Φ_n — номінальний магнітний потік незалежного збудження НМ;

I — фактична сила струму в колі якоря НМ.

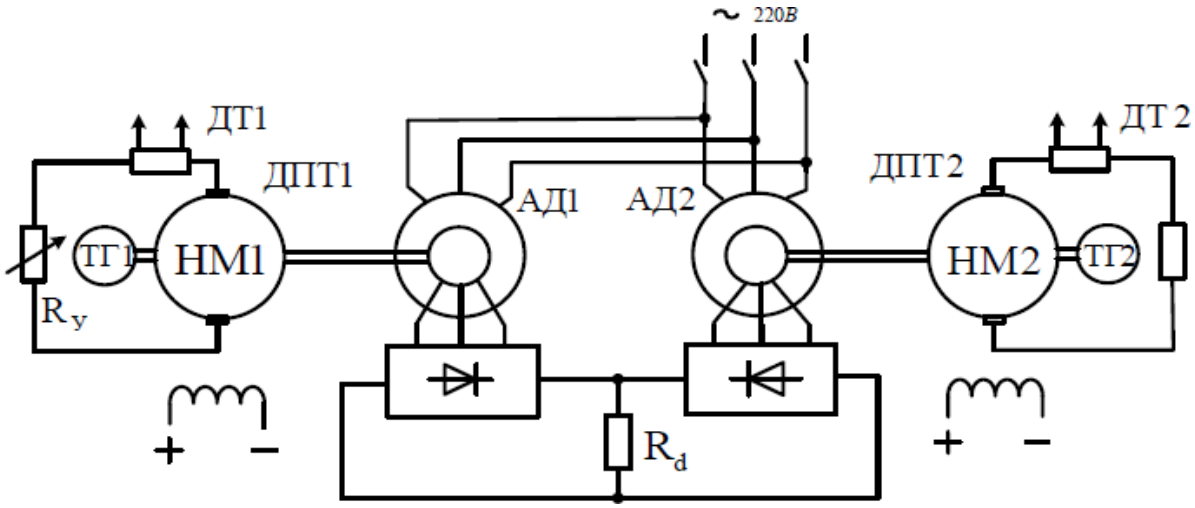


Рисунок 3.1 – Принципова електрична схема експериментального стенду

Для забезпечення оптимальних умов експерименту та узгодження крутних моментів досліджуваних двигунів із можливостями навантажувальних машин, на статорні обмотки асинхронних агрегатів подавалося знижене лінійна напруга живлення, рівень якої становив $U_{1Л}$ = 220 В. Таке рішення дозволило системі генерувати необхідний гальмівний момент без перевантаження обладнання. Експериментально зняті статичні механічні характеристики електромеханічних агрегатів графічно відображені на рисунку 3.2. У базовому (вихідному) стані системи обидві випробовувані машини ($ВМ_1$ та $ВМ_2$) оберталися з практично ідентичними кутовими швидкостями, долаючи симетричні механічні навантаження на своїх валах, які створювалися відповідними навантажувальними машинами ($НМ_1$ та $НМ_2$).

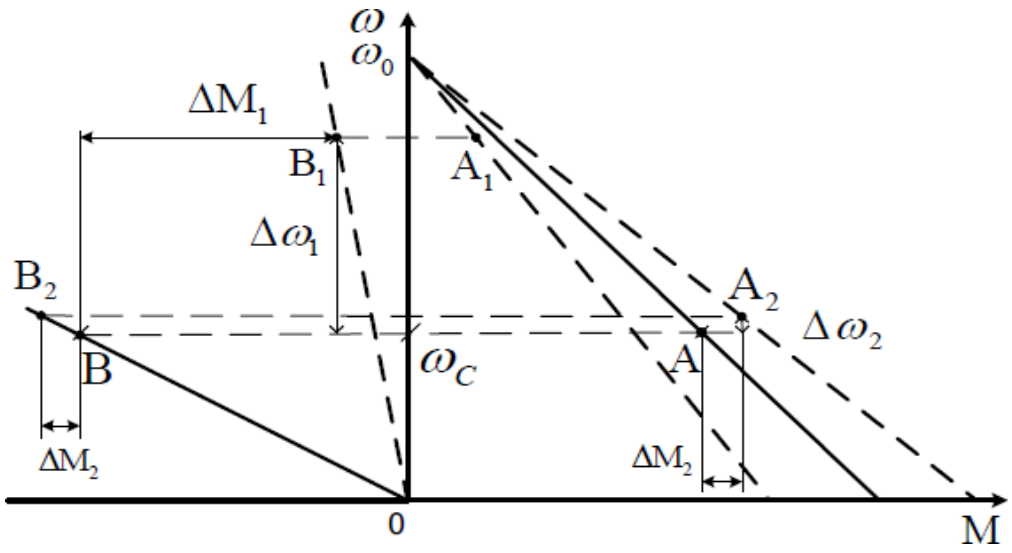


Рисунок 3.2 – Графіки статичних механічних характеристик досліджуваних електромеханічних агрегатів

Аналізуючи графіки на рисунку 3.2, можна простежити початковий рівноважний стан системи, за якого агрегати $ВМ_1$ та $ВМ_2$ стабільно функціонували в робочій точці А, тоді як машини $НМ_1$ та $НМ_2$ знаходилися в точці В. У момент штучного внесення збурення — різкого дискретного зменшення або збільшення опору в якірному колі першої навантажувальної машини (НМ1) — її робоча точка миттєво зсувається в положення В1. Як наслідок, перша випробовувана машина $ВМ_1$ змушена перейти в нову координату А1. При цьому, завдяки наявності активного електричного зв'язку між роторами, механічна характеристика ВМ1 стає відчутно «м'якшою». У гіпотетичній ситуації, якби гальванічний зв'язок між роторними колами був відсутній, другий двомашинний агрегат жодним чином не відреагував би на збурення і залишився б у своїй початковій точці на площині координат. Проте фізична наявність об'єднаного кола роторів призводить до перерозподілу енергії ковзання, через що механічна характеристика другої машини (ВМ2) автоматично стає значно «жорсткішою». Це змушує ВМ2 переміститися в нову робочу точку А2, а відповідну їй навантажувальну машину НМ2 — в точку В2.

Під час протікання інтенсивних перехідних режимів, будь-яка флуктуація статичного навантаження на валу однієї з випробовуваних машин неминуче викликає перехідний процес зміни її кутової швидкості та крутного моменту. Завдяки електричній інтеграції виключно через роторні кола АДФР, ці кінематичні зміни миттєво транслюються на другий двомашинний агрегат, синхронно змінюючи його швидкісні та силові параметри. Детальні осцилограми, що фіксують динамічні характеристики переходів обох агрегатів зі сталих режимів (відмічених точками А і В) у нові стани збурення (точки А1, В1 та А2, В2), а також процеси зворотного повернення системи до початкового балансу, наочно представлені на рисунку Е.3 у додатку Е.

Для забезпечення високої точності вимірювань, аналогові сигнали, що пропорційні струмам у якірних колах навантажувальних машин постійного струму, фіксувалися за допомогою прецизійних вимірювальних шунтів і безперервно передавалися на вхідні канали багатоканального реєстратора (самописного приладу марки Н-237-5). Оскільки під час дослідів магнітний

потік збудження навантажувальних машин підтримувався на суворо незмінному рівні, зафіксований струм якоря виступав прямим лінійним еквівалентом крутного моменту. Паралельно з цим, інформація про поточну швидкість обертання знімалася з тахогенераторів, які були жорстко закріплені на валах тягових двигунів. Ці швидкісні сигнали також заводилися на самописець Н-237-5, що дозволило отримати синхронізовані часові розгортки швидкостей обох приводів. Методика проведення експерименту передбачала плавне, циклічне збільшення та подальше зменшення величини додаткового опору в колі якоря першої навантажувальної машини. Результуючі графічні залежності зведені на рисунку І.3 у додатку І. На цих хронограмах чітко видно тимчасові профілі струмів якорів (які є аналогами механічних моментів) та кутових швидкостей обох електромеханічних агрегатів. Отримані динамічні тренди ідеально корелюють із теоретично обґрунтованими статичними закономірностями, що були проаналізовані на рисунку 3.2.

Підсумовуючи результати лабораторних випробувань, можна констатувати наступний фундаментальний факт: запровадження загального електричного зв'язку між двигунами виключно по колу ротора створює ефект саморегуляції. Той двигун, що намагається обігнати інший (випереджаючий), автоматично отримує більш «м'яку» характеристику і скидає тягу, тоді як двигун, що відстає, набуває більш «жорсткої» характеристики, збільшуючи свій крутний момент. З погляду фізики процесів, така поведінка є абсолютно еквівалентною штучному генеруванню потужного синхронізуючого моменту між двома незалежними асинхронними машинами з фазним ротором.

Варто також відзначити, що для успішної реалізації процесу вирівнювання швидкостей роторів АДФР у структурі дводвигунного приводу, загальним вузлом-приймачем електричної енергії ковзання від обох агрегатів може виступати не лише класичний активний резистор. З метою радикального покращення енергетичних показників та загального коефіцієнта корисної дії комплексу, доцільно застосовувати сучасні напівпровідникові рішення, такі як керований інвертор, навантажений на частотно-залежний індуктивно-активний опір, або спеціалізований енергоощадний каскадний рекуперативний блок.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі проведено комплексний аналіз та дослідження автоматизованих систем керування електроприводом на базі асинхронних двигунів з фазним ротором (АДФР). За результатами теоретичних та експериментальних досліджень доведено, що система частотно-каскадного електроприводу (ЧКЕ), побудована на базі автономного інвертора напруги (АІН), характеризується значно кращими енергетичними показниками порівняно з традиційним частотним приводом, де АДФР працює із закороченим ротором. Підвищення енергоефективності досягається завдяки цілеспрямованій передачі енергії ковзання в проміжну ланку постійного струму перетворювача частоти, що дозволяє знизити споживання електроенергії з промислової мережі до 4%.

Крім того, конфігурація ЧКЕ із зустрічно-паралельно включеним каскадним вентильно-трансформаторним блоком, який надійно зв'язує кола статора та ротора під управлінням скалярної системи частотно-струмового керування, гарантує оптимальні пускові характеристики. Це забезпечує необхідну для підйомно-транспортних машин стабілізацію пускового моменту та максимально плавний вихід механізму на робочу ділянку механічної характеристики.

Особливу увагу приділено системам дводвигунного електроприводу, в яких реалізовано загальну ланку постійного струму в колах роторів АДФР. Встановлено, що такі архітектури наділені унікальною властивістю автоматичної самосинхронізації швидкостей обертання двигунів у разі виникнення їх неузгодженості. При цьому в якості ефективного приймача енергії ковзання у загальній ланці можуть успішно застосовуватися різні технічні рішення: класичний резистор, інвертор з індуктивно-активним опором на виході або ж спеціалізований рекуперативний каскадний блок.

Практичне впровадження системи дводвигунного електроприводу із загальною роторною ланкою постійного струму радикально підвищує загальну демпфуючу здатність усього електромеханічного комплексу. За наявності податливого пружного механічного зв'язку між агрегатами (металоконструкції

моста крана) розроблена система ефективно пригнічує шкідливі коливання. Як наслідок, пікові значення максимальних динамічних навантажень у пружних елементах конструкції знижуються в середньому на 25–30%, що суттєво зменшує знос обладнання, запобігає перекосам та продовжує термін безпечної експлуатації крана.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Організація та ергономіка робочого місця розробника системи

Охорона праці являє собою комплексну систему законодавчих актів, а також соціально-економічних, організаційних, технічних, гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, головною метою яких є забезпечення безпеки, збереження здоров'я та високої працездатності людини безпосередньо в процесі її трудової діяльності. Стрімкий науково-технічний прогрес вніс серйозні корективи в умови виробничої діяльності, особливо для працівників розумової праці, таких як інженери та програмісти. Їхня праця стала значно інтенсивнішою та напруженішою, що вимагає колосальних витрат розумової, емоційної та фізичної енергії. Це, своєю чергою, потребує глибокого і комплексного розв'язання проблем ергономіки, гігієни, правильної організації праці, а також суворої регламентації режимів роботи і відпочинку. Охорона здоров'я працівників, гарантування безпечних умов праці, запобігання професійним захворюванням та ліквідація виробничого травматизму сьогодні є одними з найголовніших пріоритетів сучасного суспільства. Особлива увага приділяється необхідності широкого впровадження прогресивних форм наукової організації праці, мінімізації ручної рутинної роботи та створенню максимально комфортної обстановки.

Робоче місце розробника — це чітко визначена частина простору, в якому інженер здійснює свою професійну діяльність і де він проводить переважну більшість свого робочого часу. Робоче місце, яке добре пристосоване до специфіки трудової діяльності, доцільно та правильно організоване з погляду простору, форми і розмірів, здатне забезпечити працівнику зручне положення тіла та високу продуктивність праці при найменшому фізичному і психічному напруженні. Дослідження підтверджують, що при грамотній організації робочого простору продуктивність праці інженера-програміста об'єктивно зростає на 8–20 відсотків. Згідно з вимогами державного стандарту ГОСТ 12.2.032-78, конструкція робочого місця та взаємне просторове розташування

всіх його технічних елементів повинні суворо відповідати антропометричним, фізичним та психологічним потребам людини. При організації робочого простору для роботи з комп'ютерною технікою необхідно дотримуватися базових умов: забезпечити оптимальне розміщення обладнання, виділити достатній робочий простір для вільного здійснення необхідних рухів, гарантувати якісне природне та штучне освітлення, а також контролювати рівень акустичного шуму, який не повинен перевищувати встановлених санітарних норм.

Основними елементами робочого місця програміста є письмовий стіл та спеціалізоване крісло, оскільки головним робочим положенням є поза сидячи. Саме така поза викликає мінімальне фізіологічне стомлення за умови її правильної підтримки. Раціональне планування передбачає постійний порядок і чітке зонування: інструменти та документи, які потрібні найчастіше, розміщуються в зоні легкої досяжності. Для оцінки простору використовується поняття моторного поля — простору, в якому здійснюються рухові дії. Виділяють максимальну зону досяжності (обмежену дугами витягнутих рук) та оптимальну зону (обмежену рухами передпліч при відносно нерухомому плечі). При проєктуванні столу необхідно враховувати висоту для зручної посадки з опорою на підлокітники, достатній вільний простір для ніг під стільницею та матове антиблікове покриття робочої поверхні. Конструкція робочого крісла повинна фізіологічно правильно підтримувати тіло, допускати вільну зміну поз, мати механізми регулювання висоти (у межах від 400 до 550 мм), злегка увігнуту поверхню сидіння та невеликий анатомічний нахил спинки назад. Додатково естетичне оформлення приміщення (наприклад, використання спокійних, малонасичених відтінків холодного зеленого чи блакитного кольорів) сприяє зниженню нервової напруги та позитивно впливає на загальний настрій і працездатність.

4.2. Забезпечення оптимальних параметрів світлового середовища

Раціональне освітлення робочого місця є одним із найбільш критичних факторів, що безпосередньо впливають на ефективність розумової та зорової

діяльності людини, одночасно відіграючи ключову роль у попередженні травматизму та розвитку специфічних професійних захворювань. Правильно організоване світлове середовище створює комфортні та безпечні умови праці, підвищуючи загальну працездатність інженера. Специфіка роботи за екраном монітора вимагає такого освітлення, за якого працівник міг би без надмірного напруження зору розпізнавати інформацію як на дисплеї, так і на паперових носіях. Стомлюваність органів зору зазвичай провокується трьома основними причинами: недостатністю рівня освітленості, надмірною (сліпучою) яскравістю та неправильним просторовим напрямком світлових потоків. Недостатність світла змушує м'язи ока постійно напружуватися, що швидко послаблює увагу та призводить до ранньої втоми. Водночас надмірно яскраве освітлення діє сліпуче, викликаючи фізіологічне роздратування та різь в очах. Неправильний напрямок джерел світла породжує різкі контрастні тіні та відблиски на екрані, що дезорієнтує працівника і суттєво погіршує сприйняття інформації. Усі ці негативні фактори здатні призвести до нещасних випадків або зниження гостроти зору, тому правильний інженерний розрахунок освітлювальних установок є життєво необхідним.

Штучне освітлення у робочих кабінетах найчастіше реалізується за допомогою електричних джерел світла, серед яких на сьогодні найпопулярнішими є сучасні люмінесцентні та світлодіодні лампи. Застосування газорозрядних люмінесцентних ламп порівняно з традиційними лампами розжарювання має низку беззаперечних переваг: за своїм спектральним складом вони максимально наближені до природного денного світла, володіють значно вищим коефіцієнтом корисної дії (у 1,5–2 рази), характеризуються підвищеною світловіддачею (у 3–4 рази вищою) та мають набагато довший експлуатаційний термін служби. Для проєктування системи освітлення в кабінеті розробника зазвичай застосовують інженерний метод коефіцієнта використання світлового потоку.

Зокрема, розрахунок необхідного освітлення для типової кімнати площею 15 квадратних метрів (з шириною 3,5 метра та висотою стелі 4 метри) базується на визначенні загального світлового потоку. Цей потік розраховується як

добуток нормованої мінімальної освітленості (яка для точних зорових робіт програміста становить 300 люксів), площі приміщення, коефіцієнта нерівномірності освітлення (який приймається на рівні 1,1–1,2) та коефіцієнта запасу (для компенсації забруднення ламп з часом, зазвичай 1,5), поділений на коефіцієнт використання світлового потоку світильником. Проведення таких розрахунків гарантує створення нормативного світлового фону, який захистить зір працівника від передчасної деградації.

4.3. Безпека життєдіяльності та дії в умовах надзвичайних ситуацій

Небезпека в контексті виробничого середовища визначається як сукупність явищ, процесів, об'єктів, інформації або навіть дій самих людей, що здатні викликати небажані наслідки, спричинити погіршення стану здоров'я чи смерть людини, а також завдати серйозної шкоди навколишньому середовищу та майну. Життєвий та виробничий досвід переконливо доводить, що будь-яка людська діяльність є потенційно небезпечною. Джерелами загроз можуть виступати природні катаклізми, складна техногенна інфраструктура (наприклад, електричні мережі та електронне обладнання) і безпосередньо людський фактор (помилки оператора). Потенційна небезпека зазвичай має прихований характер і трансформується у реальну загрозу лише за одночасного збігу трьох умов: сама небезпека об'єктивно існує в просторі; людина опиняється в зоні дії цієї небезпеки; працівник не має у своєму розпорядженні ефективних засобів захисту або ж знехтував правилами їх використання. Якщо ці фактори збігаються, формується небезпечна ситуація, яка за певних критичних умов може перерости в надзвичайну. Основними критеріями класифікації події як надзвичайної ситуації є реальна загроза загибелі людей, суттєве погіршення умов їхнього життя, заподіяння значних економічних збитків або катастрофічний вплив на стан довкілля.

Під час повсякденної експлуатації електронно-обчислювальних машин та розробки програмно-апаратних комплексів можуть виникати різноманітні позаштатні ситуації техногенного характеру: локальні пожежі, прориви систем опалення чи водопостачання, а також небезпека ураження персоналу

електричним струмом. Само обчислювальне обладнання, маючи складну електричну схему та блоки живлення, може виступати першоджерелом загоряння або електротравми. У разі появи перших ознак аварійної ситуації працівник зобов'язаний негайно припинити роботу, безпечно знеструмити апаратуру та доповісти про інцидент керівництву. Критичними сигналами для зупинки роботи є: виявлення механічних пошкоджень ізоляції чи корпусів приладів, нетиповий підвищений шум або вібрація під час роботи техніки, різке і надмірне теплове випромінювання від блоків, постійне мерехтіння чи спотворення зображення на моніторі, а особливо — поява специфічного запаху горілої ізоляції або диму. Повертатися до виконання обов'язків категорично заборонено до повного усунення виявлених технічних несправностей кваліфікованим персоналом.

Алгоритм дій персоналу під час виникнення реальної надзвичайної ситуації чітко регламентований нормативними інструкціями. У випадку виявлення відкритого полум'я або масштабної пожежі співробітники повинні миттєво припинити роботу, повнісю відключити живлення всього електрообладнання, викликати підрозділи пожежної охорони, сповістити керівника робіт і лише після цього, переконавшись у власній безпеці, розпочати локалізацію осередку займання за допомогою наявних первинних засобів пожежогасіння (наприклад, вуглекислотних вогнегасників, які підходять для електромереж). У ситуації аварії на водопроводі чи тепломережі першочерговим завданням є виклик аварійної сантехнічної служби та евакуація чутливого електронного обладнання і реактивів у безпечне місце для запобігання їх псуванню водою чи замиканням. Якщо ж на робочому місці стався нещасний випадок і працівник отримав травму (наприклад, ураження струмом), найголовніше правило — максимально швидко і безпечно звільнити потерпілого від дії травмувального фактора. Відразу після цього необхідно викликати швидку медичну допомогу, надати першу долікарську допомогу на місці та зробити все можливе, щоб зберегти обставини інциденту незмінними до початку офіційного розслідування причин аварії спеціальною комісією.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи розглянуто ключові аспекти охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, які є невід'ємною складовою професійної діяльності інженера-розробника. Доведено, що правильна організація робочого місця та дотримання вимог ергономіки відіграють вирішальну роль у збереженні здоров'я працівника та підвищенні його продуктивності. Забезпечення раціонального планування простору, використання спеціалізованих меблів, що підтримують фізіологічно правильну позу, та врахування антропометричних даних дозволяють суттєво знизити фізичне і психологічне напруження під час тривалої роботи за комп'ютером.

Окрема увага приділена оптимізації світлового середовища, оскільки якісне освітлення є критично важливим для зорової безпеки та комфорту програміста. Обґрунтовано необхідність застосування сучасних джерел світла, таких як люмінесцентні та світлодіодні лампи, які забезпечують нормований рівень освітленості без сліпучої дії, різких тіней чи відблисків на екрані монітора. Виконання відповідних інженерних розрахунків систем освітлення гарантує створення безпечного зорового фону, що запобігає передчасній втомлюваності та зниженню гостроти зору.

Крім того, детально проаналізовано потенційні виробничі небезпеки та алгоритми дій персоналу в умовах надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Визначено чіткі інструкції щодо реагування на випадки локальних пожеж, аварій систем водопостачання та загрози ураження електричним струмом. Суворе дотримання правил техніки безпеки, своєчасне виявлення несправностей електронно-обчислювального обладнання та вміння правильно діяти в екстремальних умовах є головною запорукою збереження життя і здоров'я працівників, а також надійного захисту матеріальних цінностей підприємства.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання, що полягає у підвищенні енергоефективності та покращенні динамічних показників механізмів пересування мостових кранів шляхом розробки адаптивної системи автоматичного керування дводвигунним електроприводом. На основі аналізу існуючих рішень встановлено, що традиційні електромеханічні системи (ЕМС) кранів характеризуються значною масою, наявністю пружних зв'язків та використанням застарілих контакторно-реостатних систем керування асинхронними двигунами з фазним ротором (АДФР). Це призводить до виникнення значних динамічних навантажень, перекосу металоконструкції моста під час руху та високих невиправданих втрат електроенергії (енергії ковзання) у пуско-гальмівних режимах. З огляду на це, обґрунтовано доцільність переходу до сучасних систем регульованого електроприводу, зокрема гібридних частотно-каскадних комплексів.

Для детального дослідження фізичних процесів розроблено математичну модель механізму пересування крана у вигляді двомасової дводвигунної пружної системи. Аналіз передавальних функцій та характеристичних рівнянь підтвердив яскраво виражений коливальний характер такої системи. Доведено, що природного демпфування (внутрішнього тертя металу) недостатньо для стабільної роботи. З метою зниження динамічних навантажень запропоновано та досліджено алгоритми перехресної корекції — введення негативного зворотного зв'язку за різницею швидкостей двигунів або їх відхилень від швидкості ідеального холостого ходу. Теоретично підтверджено, що такі коригувальні контури генерують синхронізувальний момент, який значно підвищує загальний коефіцієнт загасання системи, ефективно пригнічуючи пружні коливання в перехідних режимах.

Практична реалізація запропонованих алгоритмів здійснена шляхом синтезу системи частотно-каскадного електроприводу (ЧКЕ) на базі автономного інвертора напруги (АІН). Ключовим інноваційним рішенням стало застосування зустрічно-паралельного каскадного вентильно-

трансформаторного блоку, який об'єднує роторні кола дводвигунного приводу через спільну ланку постійного струму. Це дозволило вирішити одразу дві проблеми: по-перше, забезпечити корисну рекуперацію енергії ковзання в систему (що дає економію електроенергії до 4%), а по-друге, реалізувати жорстку електромеханічну синхронізацію швидкостей тягових двигунів.

Результати фізичного моделювання на розробленому лабораторному експериментальному стенді повністю підтвердили адекватність теоретичних положень. Експерименти з використанням вентильно-резисторної системи вирівнювання ЕРС довели, що наявність електричного зв'язку по колу роторів створює ефект саморегуляції: система автоматично перерозподіляє навантаження, роблячи характеристику випереджаючого двигуна «м'якшою», а відстаючого — «жорсткішою». Це знижує пікові динамічні навантаження у пружних елементах конструкції на 25–30% та запобігає перекосу крана.

Крім того, в рамках роботи розроблено комплекс заходів з охорони праці та безпеки життєдіяльності для інженера-розробника систем автоматизації. Розраховано оптимальні параметри освітленості та ергономіки робочого місця, а також регламентовано алгоритми дій в умовах надзвичайних ситуацій (пожежі, проблеми з електроживленням), що гарантує безпечні умови для виконання професійних завдань.

У підсумку, впровадження розробленої адаптивної системи автоматичного керування дозволяє комплексно модернізувати механізми пересування мостових кранів, забезпечуючи високу плавність ходу, надійну синхронізацію, суттєве зниження зносу механічного обладнання та відчутну економію енергоресурсів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Теорія електропривода / [Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовий О.С.]: Підручник. — Кременчук: 2006. — 274 с.
2. Автоматизований електропривод / [Пересада С.М., Ковбаса С.М., Бовкунович В.С.]: Навчальний посібник. — Київ: 2015. — 430 с.
3. Електромеханічні системи з пружними зв'язками / [Клепіков В.Б.]: Монографія. — Харків: 2008. — 265 с.
4. Динаміка електроприводів кранових механізмів / [Лозинський О.А., Маранчак В.М.]: Навчальний посібник. — Львів: 2012. — 310 с.
5. Адаптивне керування асинхронними електроприводами / [Михальський В.М.]: Монографія. — Київ: 2010. — 380 с.
6. Енергоефективне керування електроприводами підйомно-транспортних машин / [Загірняк М.В., Чорний О.П.]: Монографія— Кременчук: 2011.— 220 с.
7. Control of Electrical Drives / [Leonhard W.]: Springer. — Berlin: 2001. — 460 p.
8. Векторне керування асинхронними двигунами / [Пересада С.М.]: Підручник. — Київ: 2007. — 240 с.
9. Математичне моделювання електромеханічних систем у MATLAB / [Шматок С.О., Петренко А.Б.]: Навчальний посібник. — Дніпро: 2016. — 215 с.
10. Modern Power Electronics and AC Drives / [Bose B.K.]: Prentice Hall. — London: 2002. — 710 p.
11. Частотно-регульований асинхронний електропривод / [Волков А.В.]: Монографія. — Харків: 2014. — 340 с.
12. Динаміка мостових кранів / [Григоров О.В., Петренко Н.О.]: Навчально-методичний посібник. — Харків: 2007. — 185 с.
13. Автоматизація підйомно-транспортних механізмів / [Козаченко В.Ф.]: Підручник. — Одеса: 2013. — 290 с.
14. Control of Induction Motors / [Kazmierkowski M.P., Tunia H.]: Academic Press. — Warsaw: 1994. — 530 p.
15. Двомасові електромеханічні системи: моделювання та синтез / [Садовий О.С.]: Монографія. — Кам'янське: 2018. — 195 с.

16. Системи керування електроприводами / [Попович М.Г., Ковальчук О.В.]: Підручник. — Київ: 2003. — 320 с.
17. Електроприводи змінного струму з фазним ротором / [Мокін Б.І.]: Монографія. — Вінниця: 2009. — 210 с.
18. Sensorless Vector and Direct Torque Control / [Holtz J.]: Oxford University Press. — Oxford: 2002. — 340 p.
19. Частотно-каскадні електроприводи: теорія та практика / [Осадчий В.В.]: Монографія. — Мелітополь: 2011. — 275 с.
20. Оптимальне керування в електромеханічних системах / [Куценко В.Ф.]: Навчальний посібник. — Харків: 2015. — 250 с.
21. Демпфування коливань у багатомасових системах / [Бурєнніков Ю.А.]: Монографія. — Вінниця: 2017. — 190 с.
22. Асинхронні електроприводи з частотним керуванням / [Колб А.А.]: Підручник. — Дніпропетровськ: 2006. — 365 с.
23. Electric Drives: Design and Application / [Boldea I., Nasar S.A.]: CRC Press. — London: 2005. — 504 p.
24. Теорія автоматичного керування / [Іванов А.О.]: Підручник. — Київ: 2010. — 420 с.
25. Енергоощадні технології в електроприводах / [Радимов І.М.]: Монографія. — Одеса: 2012. — 230 с.
26. Математичні моделі асинхронних двигунів / [Островерх О.О.]: Навчальний посібник. — Київ: 2014. — 160 с.
27. Підйомно-транспортні машини / [Ромасевич Ю.О.]: Підручник. — Київ: 2016. — 410 с.
28. Modeling and Control of AC Machine using MATLAB/SIMULINK / [Mourad E.]: Elsevier. — Paris: 2010. — 210 p.
29. Адаптивні системи керування: теорія і застосування / [Кухтенко В.І.]: Монографія. — Харків: 2009. — 285 с.
30. Динаміка електроприводів з пружними зв'язками / [Печеник М.В., Бур'ян С.О.]: Навчальний посібник. — Київ: 2015. — 175 с.
31. Системи синхронізації дводвигунних електроприводів / [Терехов В.М.]:

Монографія. — Запоріжжя: 2018. — 225 с.

32. Advanced Electrical Drives / [De Doncker R.]: Springer. — Dordrecht: 2011. — 460 p.

33. Експериментальні дослідження електромеханічних систем / [Томашевський О.В.]: Навчальний посібник. — Львів: 2013. — 190 с.

34. Теорія і практика частотно-регульованого електропривода / [Клімаш В.С.]: Монографія. — Дніпро: 2017. — 315 с.

35. Енергоефективність мостових кранів / [Маляр А.В.]: Монографія. — Львів: 2010. — 180 с.

36. Induction Motor Control Design / [Sira-Ramirez H.]: Springer. — London: 2006. — 380 p.

37. Багаторухові електроприводи кранових механізмів / [Гречка А.М.]: Навчально-методичний посібник. — Харків: 2014. — 145 с.

38. Ідентифікація параметрів асинхронних двигунів / [Ковбаса С.М.]: Монографія. — Київ: 2019. — 210 с.

39. Системи векторного керування з датчиками і без / [Соколов О.А.]: Підручник. — Харків: 2011. — 330 с.

40. AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications / [Kwang H.N.]: CRC Press. — Rome: 2013. — 420 p.

41. Пристрої силової електроніки в електроприводі / [Жемчугов О.В.]: Навчальний посібник. — Одеса: 2016. — 260 с.

42. Математичне моделювання динамічних систем / [Степаненко О.С.]: Підручник. — Тернопіль: 2012. — 310 с.

43. Мікропроцесорні системи керування електроприводами / [Борисенко В.П.]: Монографія. — Суми: 2015. — 280 с.

44. Applied Control of Electrical Drives / [Duco W.J.]: Springer. — Berlin: 2015. — 350 p.

45. Синтез регуляторів для електромеханічних систем / [Чермалих О.В.]: Навчальний посібник. — Київ: 2008. — 195 с.

46. Динаміка та керування вантажопідйомними кранами / [Любченко В.М.]: Монографія. — Харків: 2020. — 240 с.

47. Основи охорони праці / [Гандзюк М.П., Желібо Є.П.]: Підручник. — Київ: 2011. — 415 с.

48. Охорона праці в галузі комп'ютерних технологій / [Ткачук К.Н.]: Навчальний посібник. — Львів: 2014. — 220 с.

49. Безпека життєдіяльності та охорона праці / [Яремко З.М.]: Підручник. — Київ: 2015. — 310 с.

50. Ергономіка робочих місць операторів ЕОМ / [Бойко В.В.]: Монографія. — Харків: 2017. — 185 с.

51. Safety and Health in the Workplace / [Holt A.]: Routledge. — London: 2012. — 290 p.

52. Гігієна праці розробників систем автоматизації / [Коваленко В.І.]: Навчальний посібник. — Одеса: 2019. — 160 с.