

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”

Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____Петро ПЛЄШКОВ

“ ____ ” _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **за другим (магістерським) рівнем вищої** **освіти**

на тему

**“ Підвищення енергоефективності роботи тягового
електроприводу в перехідних режимах”**

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-22М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____Кирило МОРОЗОВ

« ____ » _____ 2023 р.

Керівник роботи

к.т.н., доцент

_____Іван САВЕЛЕНКО

« ____ » _____ 2023 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

«_____» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Морозова Кирила Вікторовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Підвищення енергоефективності роботи тягового електродвигуна в перехідних режимах

Improving the energy efficiency of the traction electric drive in transient modes

2. Керівник роботи (проекту) Савеленко Іван Володимирович, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 30.12.2023 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту)

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження електромеханічної системи тягових установок на базі системи ПЧ - СДПМ із застосуванням релейних регуляторів (РР). Обґрунтувати застосування СДПМ для реалізації виконавчих ЕП автономних тягових установок. Визначити вимоги до електродвигуна, що забезпечують сталість параметрів і високі енергетичні характеристики в широкому діапазоні зміни навантажень СДПМ. Розробити математичну модель ПЧ - СДПМ, як ОК, , а також проводити аналітичними і чисельними методами дослідження електромагнітних процесів у досліджуваній ЕМС.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ.</i>	<i>10.10.23</i>	
2	<i>Задача підвищення енергоефективності функціонування тягових установок</i>	<i>16.10.23</i>	
3	<i>Теоретичне дослідження системи автоматичного керування тягових установок.</i>	<i>28.10.23</i>	
4	<i>Імітаційне моделювання систем автоматичного керування тяговою установкою.</i>	<i>16.11.23</i>	
5	<i>Техніко-економічний розрахунок ефективності впровадження</i>	<i>30.11.23</i>	
6	<i>Охорона праці</i>	<i>06.12.23</i>	
7	<i>Висновки</i>	<i>12.12.23</i>	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки та презентації магістерської роботи</i>	<i>25.12.22</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2023 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2023 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Морозов К.В. Підвищення енергоефективності роботи тягового електроприводу в перехідних режимах

Improving the energy efficiency of the traction electric drive in transient modes

Спеціальність 141 - «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». - ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». - Центральноукраїнський національний технічний університет. - м. Кропивницький, 2023 р.

Проведене обґрунтування застосування СДПМ для реалізації виконавчих ЕП автономних тягових установок. Визначено вимоги до електроприводу, що забезпечують сталість параметрів і високі енергетичні характеристики в широкому діапазоні зміни навантажень СДПМ.

Розроблена математична модель ПЧ - СДПМ, як ОК, що дозволяє вирішувати на її основі задачі синтезу РР, а також проводити аналітичними і чисельними методами дослідження електромагнітних процесів у досліджуваних ЕМС;

Результати досліджень, проведених в даній кваліфікаційній роботі, можуть бути використані в гірничій промисловості для підвищення ефективності систем автоматичного керування швидкістю обертання ротора синхронних двигунів з постійними магнітами для зменшення витрат електричної енергії в тягових установках.

СИНХРОННІ ДВИГУНИ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ, СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ, ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ.

ABSTRACT

Morozov K. Improving the energy efficiency of the traction electric drive in transient modes.

Підвищення енергоефективності роботи тягового електроприводу в перехідних режимах.

Specialty 141 - "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". - EPP "Electrical systems of power consumption". - Central Ukrainian National Technical University. - Kropyvnytskyi, 2023

The justification for the application of the Field-Oriented Control (FOC) for implementing the executive Power Units (PU) of autonomous traction installations has been conducted. Requirements for the electric drive ensuring parameter stability and high energy characteristics across a wide range of loads for the Field-Oriented Control have been defined.

A mathematical model of the Power Converter (PC) - Field-Oriented Control as a control object has been developed. This model allows solving tasks of the Regulator (RR) synthesis based on it and conducting analytical and numerical methods to study electromagnetic processes in the investigated Electric Machine System (EMS).

The research results presented in this qualification work can be applied in the mining industry to enhance the efficiency of speed control systems for synchronous motors with permanent magnets, aiming to reduce electrical energy consumption in traction installations.

SYNCHRONOUS MOTORS WITH PERMANENT MAGNETS, FIELD-ORIENTED CONTROL SYSTEMS, ENERGY EFFICIENCY, FREQUENCY CONVERTER.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ЗАДАЧА ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЯГОВИХ УСТАНОВОК.....	8
1.1 Аналіз питання сучасного стану тягових установок	8
1.2 Аналітичний огляд методів та прийомів автоматичного керування тяговими установками	14
1.3 Огляд методик вирішення проблеми створення оптимальних систем автоматичного керування для тягових установок.	18
1.4 Математичний опис тягової системи із синхронним двигуном на постійних магнітах	24
1.5 Втрати електроенергії під час перехідних процесів в електроприводах та методи їх зменшення.....	34
Висновки до розділу	39
2. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ В ТЯГОВИХ УСТАНОВКАХ	40
2.1 Формалізація синтезу системи автоматичного керування в тягових установках	40
2.2 Методологія задачі синтезу системи керування тяговою установкою ...	42
2.3 Математичні моделі динаміки руху тягової установки	45
Висновки до розділу	57
3. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВОЮ УСТАНОВКОЮ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ .	58
3.1 Комп'ютерні моделі САК рухом тягової установки з СДПМ.....	58
3.2 Комп'ютерне моделювання роботи системи автоматичного керування рухом тягових установок.....	61
3.3 Результати комп'ютерного моделювання роботи САК рухом тягової установки на основі СДПМ з пусковими обмотками.....	62

Висновки до розділу	64
4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ РУХОМ ТЯГОВОЇ УСТАНОВКИ	65
Висновки до розділу.	71
5. ОХОРОНА ПРАЦІ	72
5.1 Загальні вимоги безпеки до технологічного устаткування	72
5.2 Захисне відключення	75
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	77

ВСТУП

Актуальність теми. Оптимізація енергетичної ефективності визначається як один з ключових завдань для промисловості України, особливо в галузі видобутку руд, яка відома своєю значною споживаністю енергії. Процес транспортування сировини складає до 30% від загальних витрат [1], що нагадує про важливість скорочення цих витрат через підвищення ефективності тягових установок під час переміщення.

Наразі в Україні працюють понад двадцять родовищ залізних руд, де основним засобом транспортування є електровози, кількість яких перевищує чотири тисячі. Ефективність роботи електрообладнання тягових установок залежить від умов експлуатації, і статистика підтверджує, що термін служби двигунів коливається від 3 до 10 місяців, залежно від типу електродвигуна. Щорічно витрачаються значні кошти на ремонт електрообладнання тягових установок [1-2].

До найпоширеніших типів двигунів у тягових установках належать двигуни постійного струму. Застосування електроприводів змінного струму стримується високою вартістю та складністю систем автоматичного керування, що вимагає використання частотних перетворювачів.

Одним із способів покращення показників енергоефективності тягових установок є вдосконалення їх систем автоматичного керування, орієнтованих на поліпшення динамічних характеристик електроприводу, що призводить до зменшення споживання електроенергії. Ефективніші системи автоматичного керування допомагають скоротити рівень максимальних струмів в обмотках статора за рахунок скорочення тривалості перехідних процесів під час пуску електроприводу.

Проблематика автоматизації робочих режимів електроприводів змінного струму, зокрема, систем, які базуються на синхронних двигунах з постійними магнітами (СДПМ), активно вивчається в різних дослідженнях

Клепікова, І.А. Луценка, Г.Г. Півняка, С. М. Пересади, К.А. Пупкова, Д.Й. Родькіна, Ю.А. Сабініна, А.В. Садового, О.М., О.П. Чорного, та ін.

Запропоновані підходи враховують класичну теорію автоматичного керування. Однак застосування цих підходів для створення САК електроприводів на основі СДПМ середньої та великої потужності не враховує технічних особливостей таких систем, що ускладнює досягнення бажаної швидкодії та точності їх функціонування.

Ураховуючи поточний рівень розвитку мікропроцесорної техніки, пропонується більш вдосконалений підхід до створення САК для тягових електроприводів на базі СДПМ. Цей підхід ґрунтується на ідеях Понтрягіна, які лягли в основу сучасної теорії оптимального керування.

Таким чином, важливим завданням є поліпшення САК для тягових установок з СДПМ з метою підвищення їх енергетичної ефективності, що є актуальним в сучасних умовах.

Мета цього дослідження полягає в підвищенні енергоефективності шахтних електровозів шляхом розробки алгоритмів керування та створення оптимальних систем автоматичного керування для тягових установок.

Об'єктом дослідження є процес керування рухом тягових установок у перехідних режимах, а предметом - системи автоматичного керування для тягових установок.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення ряду задач, таких як вивчення особливостей використання двигунів постійного та змінного струмів у шахтних електровозах, розробка оптимальної САК з урахуванням технічних характеристик СДПМ, імітаційне моделювання оптимальних САК для аналізу роботи установок в різних режимах тощо.

Отримані результати мають практичне значення для підвищення енергоефективності роботи тягових установок, і на їхній основі створено комп'ютерні моделі САК для тягових установок з СДПМ.

1. ЗАДАЧА ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЯГОВИХ УСТАНОВОК

У технологічному процесі видобутку руд на транспортування витрачається до 30% від загальних витрат, що породжує потребу в пошуку способів оптимізації енергетичних показників тягових установок.

У створенні систем автоматичного керування (САК) для тягових установок використовуються ті ж принципи, що і в разі двигунів постійного струму. Проте цей підхід не враховує конструктивних особливостей, притаманних синхронним двигунам з постійними магнітами (СДПМ).

Спроектовані таким чином САК для тягових установок не використовують повною мірою потенціалу СДПМ у сфері енергоефективності. Таким чином, одним із способів підвищення енергоефективності тягових установок є вдосконалення їхніх систем автоматичного керування.

Для підвищення енергетичних характеристик тягових установок на основі СДПМ необхідно обґрунтувати вдосконалення методів автоматизації управління цими приводами та розробити відповідний математичний апарат.

1.1 Аналіз питання сучасного стану тягових установок

У вітчизняній промисловості в основному використовуються тягові установки з двигунами постійного струму (ДПС) або асинхронними двигунами (АД). Широке застосування ДПС обумовлене їхніми розширеними регулювальними можливостями. Проте, у ДПС є кілька недоліків:

- складність виробництва та обслуговування;

- обмежені динамічні характеристики через максимальний момент при комутації ДПС;
- великі розміри та вага.

Асинхронні двигуни є більш економічними та надійними, порівняно з ДПС, та мають вищі характеристики експлуатації. Також АД володіють кращою динамікою, обумовленою меншим моментом інерції та відсутністю обмежень на максимальний момент при колекторній комутації. Проте, АД мають свої недоліки:

- обмежений діапазон регулювання швидкості;
- необхідність використання складних законів частотного керування, що ускладнює структуру САК;
- низький коефіцієнт корисної дії при малих завантаженнях.

На сучасний момент синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ) визнаються найбільш перспективними та ефективними для використання [1-4,6]. Це обумовлено їхньою простотою конструкції, кращими параметрами розмірів та ваги, а також високими експлуатаційними характеристиками.

СДПМ, з точки зору регульовальних характеристик, не поступаються ДПС, а за деякими показниками навіть перевершують їх. Важливо зазначити, що СДПМ, аналогічно до ДПС, мають менші розміри та вагу, високу надійність та регульовальні можливості порівняно з АД. Завдяки відсутності колекторних вузлів, конструкція СДПМ є спрощеною та більш надійною у порівнянні з ДПС. Крім високої динаміки, широкого діапазону регулювання та кращої надійності та підвищеного коефіцієнту корисної дії, СДПМ володіють високою ефективністю в режимі гальмування.

Переваги синхронних двигунів з постійними магнітами (СДПМ), як вказано, визначають області їх застосування, що відображено на рис. 1.1.

Серед цих областей можна визначити електроприводи електромобілів, металообробні верстати, а також тягові установки [5-12]. Це, в свою чергу, встановлює ключові вимоги до цієї категорії електричних машин: необхідність забезпечення мінімальних витрат при максимальній надійності [7,13].



Рис. 1.1. Класифікація областей застосування електроприводів на основі СДПМ

У теперішній період у численних країнах проводяться наукові дослідження з удосконалення синхронних двигунів з постійними магнітами (СДПМ) з метою покращення їхніх параметрів запуску та робочих характеристик, зменшення вартості та підвищення технологічності конструкцій. Особливості тягових установок вимагають розробки автоматизованих систем управління із заданими критеріями якості [6, 8, 11,

12, 14-16]. Основними показниками, які оцінюють якість процесу управління при інженерних розрахунках, є час затухання перехідних процесів, ступінь перерегулювання, ступінь коливань перехідних процесів та ступінь стійкості системи [20].

Під час розробки систем управління великий інтерес представляють інтегральні оцінки якості перехідних процесів [3-12], які визначають загальну ефективність згасання та розмаху змін величин, що регулюються. Однак, інтегральна оцінка має обмежене застосування тільки до систем з монотонними процесами, у той час як для систем із знакозмінними процесами більш доцільною є квадратична інтегральна оцінка.

Граничні значення параметрів якості системи автоматичного керування (САК) визначаються обмеженою потужністю джерела живлення, мінімізацією втрат, максимізацією коефіцієнта корисної дії та якістю виконання динамічних процесів. Для досягнення цих цілей ефективним рішенням є використання частотно-регульованих електроприводів із широким діапазоном регулювання швидкості [17-22].

Робота виконавчого двигуна, який призначений для використання в частотно-регульованому електроприводі тягової установки, має свої особливості [17-22], перш за все, залежні від діапазону зміни швидкості руху. Динамічні процеси роботи тягових установок, зокрема пускові процеси, є найбільш важкими та енергоємними. Як критерій енергетичної ефективності шахтної тягової установки, зазвичай використовується показник питомої витрати електричної енергії при транспортуванні руди на експлуатаційному горизонті [20].

Питома витрата електричної енергії на один рейс обчислюється за формулою, кВт·год/т·км:

$$a = \frac{(W_{\text{т}} + W_{\text{вп}})}{Q_{\text{в}}}, \quad (1.1)$$

де W_T – витрата електроенергії на рух електровозу на експлуатаційному горизонті, кВт·год;

$W_{\text{вп}}$ – витрата електроенергії на власні потреби кВт·год; $W_{\text{вп}} \approx 0,02W_T$;

Q_B – продуктивність одного рейсу на експлуатаційному горизонті, т·км.

Споживання електроенергії для переміщення транспортного засобу на робочому рівні розраховується за допомогою спеціальної математичної виразу, кВт·год:

$$W_T = \frac{U_K \sum_{i=1}^n (I_e \Delta t)_i}{1000 \cdot 60}, \quad (1.2)$$

де U_K – розрахункова напруга контактної мережі, В;

I_e – середньоінтервальна тривалість Δt значення струму тягового двигуна на розрахунковій ділянці;

Δt – інтервал часу за який в двигуні протікає струм I_e , с.

Продуктивність одного рейсу електровозу на експлуатаційному горизонті:

$$Q_B = n_B m_3 S_3 + n_B m_{\Pi} S_{\Pi} + m_e (S_3 + S_{\Pi}), \quad (1.3)$$

де n_B – кількість вагонеток у рухомому складі, шт.;

m_3, m_{Π} – маса відповідно завантаженої, незавантаженої вагонетки, т;

S_3, S_{Π} – довжина ділянки, яку електровоз проходить відповідно в завантаженому та порожньому стані, м;

m_e – маса тягового електровозу, т.

Однак, параметр (1.1) питомого споживання електроенергії не в повній мірі враховує специфічні технологічні властивості експлуатаційного процесу тягової установки, такі як підвищений знос ізоляції внаслідок перегріву від пускових струмів та посилення зносу підшипникових вузлів та інші.

У наукових дослідженнях [8,22] було висунуто критерій ефективності, що дозволяє врахувати зазначені технологічні особливості роботи тягової установки та сприяє визначенню максимального економічного ефекту при виконанні технологічних операцій.

Відповідно до викладеної у роботі [8] теорії, критерій ефективності управління рухом тягової установки E можна розрахувати за наступною формулою:

$$E = \frac{(PE - RE_e + RE_{зп} + RE_{зо} + RE_{зк})^2 T_1^2}{(RE_e + RE_{зп} + RE_{зо} + RE_{зк}) PE \cdot T_{оп}^2}, \quad (1.4)$$

де PE – кількісний показник, який характеризує отриману сировину, грн.;

RE_e – вартість електричної енергії, спожитої на транспортування руди, грн;

$RE_{зп}$, $RE_{зо}$, $RE_{зк}$ – кількісні показники, що виражають зміну стану технологічного обладнання у підшипникових вузлах, обмотках двигуна та колісних парах відповідно, грн;

T_1 – інтервал часу, для оцінки потенціального ефекту досліджуваної операції в технологічному процесі, год.;

$T_{оп}$ – тривалість виконання технологічної операції, год.

Як зазначалося раніше, одним з методів покращення роботи тягових установок є вдосконалення їх систем автоматичного керування (САК). Ці

САК мають враховувати особливості режимів роботи тягових установок. Таким чином, важливо ретельно проаналізувати існуючі методи та прийоми автоматизованого управління тяговими установками на основі синхронних двигунів з постійними магнітами (СДПМ), зокрема для виявлення можливих недоліків.

1.2 Аналітичний огляд методів та прийомів автоматичного керування тяговими установками

У процесі формування систем автоматичного керування (САК) для тягових установок на основі синхронних двигунів з постійними магнітами (СДПМ), використовуються ті ж загальні принципи, що й у випадку двигунів постійного струму (ДПС). Однак цей підхід не враховує ряд конструктивних особливостей, властивих СДПМ. Створені таким чином САК для руху тягових установок не вповні використовують потенціал СДПМ у сфері енергоефективності. Припущення, які лягли в основу математичних моделей тягових електроприводів, призводять до наявності дестабілізуючих впливів, що спричиняють похибки в роботі САК. Параметри електромеханічних систем визначають розмір і характер похибок САК та їх вплив на динамічні та статичні характеристики тягових установок.

Залежно від впливу на сигнал керування, САК для тягових установок розділяються на розімкнені та замкнені системи. В розімкнених системах відсутній зворотній зв'язок, що призводить до того, що при відхиленні вихідної змінної від заданого значення, викликаного збуреннями, сигнал керування залишається незмінним [10-14].

У випадку одноконтурних систем збільшення коефіцієнта підсилення понад критичне значення може призвести до втрати стійкості. Теорія синтезу

структур, стійких при необмеженому зростанні коефіцієнта підсилення, представлена в роботі [15]. Згідно з цією теорією, ефект стійкості при необмежено високому коефіцієнті підсилення досягається в багатоконтурних системах, що задовольняють певні структурні умови якості.

Багатоконтурні системи розподіляються на системи з незалежним та підлеглим регулюванням. Незалежне регулювання може призводити до ускладнення системи через введення перемикального пристрою, а також збільшення складнощів у обробці сигналів при визначенні проміжних координат.

Розгляд структури багатоконтурних систем підтвердив, що найбільш поширеними є системи підлеглого регулювання, які вирізняються:

- простотою в розрахунках та налаштуваннях;
- зручністю обмеження максимальних значень проміжних координат системи.

У випадку систем автоматичного керування (САК) для тягових установок, оснований на лінійних регуляторах, які отримали найбільше поширення, спостерігається кілька недоліків [16]:

- висока статика контуру регулювання струму (зокрема при використанні пропорційних та пропорційно-диференційних регуляторів);
- значні коливання швидкості обертання в перехідних режимах.

Це ускладнює застосування традиційних багатоконтурних систем керування для тягових установок, які потребують точного та стабільного регулювання швидкості. Усунення недоліків таких систем можливе за допомогою створення системи керування, що еквівалентна лінійній САК з нескінченно великим коефіцієнтом підсилення.

Згідно з [19, 20, 16], збільшення коефіцієнта підсилення системи призводить до зменшення усталеної похибки. Також відомо, що динамічні властивості систем суттєво залежать від величини коефіцієнта підсилення. З цієї причини бажано варіювати коефіцієнт підсилення в широких межах,

включаючи необмежене збільшення його без порушення стійкості системи.

Цей підхід в сфері лінійного керування дозволяє значно зменшити чутливість системи до зовнішніх збурень і забезпечити ефективну компенсацію параметричних відхилень [11]. Використання ковзних режимів нелінійних елементів [10, 13, 15] для реалізації нескінченно великих коефіцієнтів підсилення дозволяє певних умовах забезпечити нульову чутливість систем керування до параметричних і координатних збурень.

У роботі [10] відзначено, що системи автоматичного керування (САК) з нескінченно великим коефіцієнтом підсилення виявляють ряд унікальних характеристик. Перш за все, це властивість інваріантності до зовнішніх збурень.

Для системи, зображеної на рис. 1.2, передаточна функція (1.5) під впливом збурення при $k_{\Pi} \rightarrow \infty$ стає рівною нулю, якщо замкнена система є стійкою.

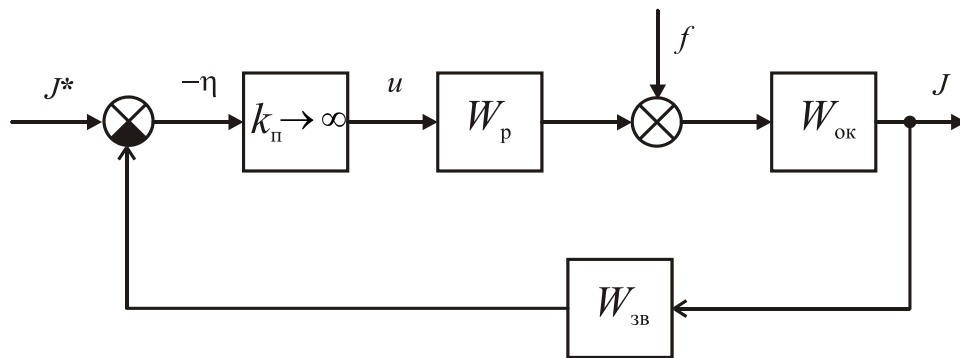


Рис. 1.2. Структурна схема САК

$$W_3(p) = \frac{J(p)}{f(p)} = \frac{W_{ок}(p)}{1 + W_{ок}(p)W_{зв}(p)W_p(p)k_{\Pi}}; \quad \lim_{k_{\Pi} \rightarrow \infty} W_3(p) \rightarrow 0. \quad (1.5)$$

В той же час передаточна функція за керуючим впливом у випадку

нерівності нулю практично не залежить від параметрів $W_p(p)$, $W_{ок}(p)$ при $k_{п} \rightarrow \infty$ за умови, що замкнена система є стійкою:

$$W_k(p) = \frac{J(p)}{J^*(p)} = \frac{W_p(p)W_{ок}(p)k_{п}}{1 + W_{зв}(p)W_p(p)W_{ок}(p)k_{п}}; \lim_{k_{п} \rightarrow \infty} W_k(p) \rightarrow \frac{1}{W_{зв}(p)} \quad (1.6)$$

У лінійних системах автоматичного керування важко досягти нескінченно великого коефіцієнта підсилення через конфлікт між стійкістю та точністю. Тим не менше, створення систем управління із теоретично нескінченно великим коефіцієнтом підсилення є можливим за умови використання результатів досліджень, представлених у роботах [19]. У зазначених дослідах була доведена еквівалентність між релейною системою (рис. 1.3), яка функціонує в режимі ковзання, та лінійною системою із нескінченно великим коефіцієнтом підсилення.

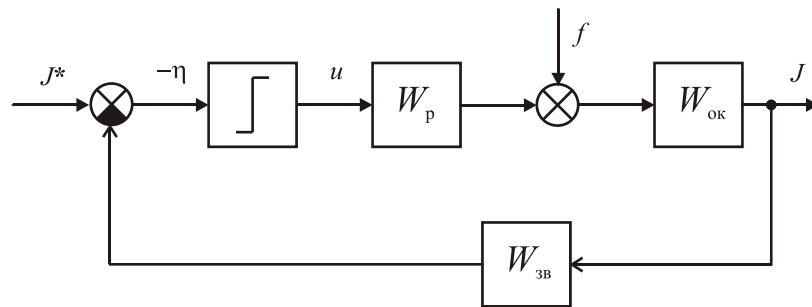


Рис. 1.3. Структурна схема САК релейного типу

Крім того, такі системи володіють рядом характеристик, включаючи зменшення порядку диференціального рівняння системи та можливість створення слідкуючих і високоточних систем [15,16].

Введення кількох реле в систему [10, 11] та налаштування для кожного з них ковзного режиму шляхом зворотного зв'язку з кожним вузлом лінійної

частини дозволяє усунути вплив більшості параметрів на динамічні характеристики і отримати бажаний перехідний процес. Такі системи керування володіють властивостями робастності, оскільки зберігають свої характеристики при зміні параметрів об'єкта керування (параметричні збурення) і зовнішніх впливах.

Релейні системи керування можуть забезпечити нульову статичну помилку, що становить їхню беззаперечну перевагу. Завдяки простоті реалізації кодованих режимів синтез релейних систем керування представляє собою найбільш простий спосіб досягнення інваріантності до зовнішніх збурень і низької чутливості до параметрів.

Отже, створення оптимальних релейних регуляторів, що діють у кодованому режимі, є однією з перспективних стратегій для розробки високоякісних систем керування тяговими установками на основі СДПМ. Для виконання синтезу релейних САК необхідно провести аналіз методів вирішення завдань синтезу оптимальних релейних САК тяговими установками на основі СДПМ.

1.3 Огляд методик вирішення проблеми створення оптимальних систем автоматичного керування для тягових установок.

Завдання визначення оптимального управління відноситься до варіаційного обчислення. Однак у зв'язку із наявністю обмежень при формулюванні цієї задачі, класичне варіаційне обчислення не завжди забезпечує можливість визначити оптимальне управління та траєкторію руху системи [19]. Метод синтезу оптимального управління, ґрунтований на принципі максимуму Понтрягіна, є варіаційним методом з високим потенціалом. Розглянемо послідовність розв'язання задачі синтезу оптимального управління.

Нехай математичний опис об'єкта управління задається рівнянням у вигляді:

$$\dot{x}_i = F_i(\mathbf{X}, \mathbf{U}), \quad (1.7)$$

де $\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_i]$ – вектор станів системи;

$\mathbf{U} = [u_1(t), \dots, u_k(t)]$ – вектор сигналів керування, обмежений наступною нерівністю:

$$|u_k(t)| \leq u_{k \max} \quad (k = \overline{1, m}), \quad (1.8)$$

де $u_{k \max}$ – максимальне значення керуючого впливу.

З множини допустимих керувань, що переводять об'єкт (1.7) з початкового стану $x(t_0)$ в заданий $x(t_1)$ необхідно знайти таке керування для якого функціонал, що наведений нижче, прийме найменше значення:

$$I = \int_{t_0}^{t_1} f(\mathbf{X}, \mathbf{U}) dt \rightarrow \min, \quad (1.9)$$

Дослідження літературних джерел [11, 19] вказує на основний недолік методу синтезу оптимальних керувань, що базується на принципі максимуму Понтрягіна - його висока обчислювальна складність.

Динамічне програмування, у порівнянні з принципом максимуму, є основним математичним методом [19], який використовується для визначення оптимального керування. На відміну від принципу максимуму, орієнтованого на визначення оптимального керування у формі оптимальної

програми, динамічне програмування зорієнтоване на визначення оптимального керування у вигляді синтезуючої функції.

Застосування динамічного програмування обґрунтоване для дискретних процесів, проте його використання для безперервних процесів не завжди є можливим. Це пояснюється тим, що при виведенні функціонального рівняння Беллмана доводиться робити ряд припущень, які безпосередньо перевірити за рівняннями руху та функціоналами неможливо. У разі виконання умови безперервної диференційованості функції керування можливий синтез оптимального управління з використанням методу динамічного програмування Беллмана.

Відповідно до цього методу, запропонованого Р. Беллманом, оптимальне управління $U(X)$, яке забезпечує мінімізацію функціоналу на траєкторіях руху об'єкта керування при врахуванні введених обмежень, повинно задовольняти розв'язку основного функціонального рівняння Беллмана в часткових похідних.

$$\min_U \left[\sum_{i=1}^n \frac{\partial V(X)}{\partial x_i} F_i(X, U) + F_0(X, U) \right] = 0, \quad (1.10)$$

де $V(X)$ – функція Беллмана;

$F_0(X, U)$ – інтегрант критерію;

$F_i(X, U)$ – функції правих частин об'єкту керування, математична модель якого представлена у вигляді:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = F_i(X, U); \\ F_i(X, U) = a_i x_i + \sum_{j=1}^m b_{ij} u_j; \\ i = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (1.11)$$

Умови розв'язання вказаної задачі формулюються за допомогою теореми оптимальної стабілізації [18,19].

Якщо припустити, що матриця вагових коефіцієнтів для критерію (1.9) є діагональною, то з рівнянь (1.10) – (1.11) можна вивести характеристику оптимального керування для внутрішніх точок області.

$$u_j = -r_j^2 \sum_{k=1}^n b_{kj} \frac{\partial V(\mathbf{X})}{\partial x_k}. \quad (1.12)$$

Оскільки для випуклих квадратичних функціоналів екстремум розташований або у внутрішній області, або на її межі, формула для оптимального керування може бути виражена так:

$$u_j = -\text{sat} \left(r_j^2 \sum_{k=1}^n b_{kj} \frac{\partial V(\mathbf{X})}{\partial x_k} \right). \quad (1.13)$$

При необмеженому збільшенні коефіцієнту підсилення, рівняння (1.13) приймає форму закону оптимального релейного керування за точністю. Рівняння (1.12) – (1.13) є ключовими у методі Льотова-Калмана для розв'язання задачі АКОР. Основним недоліком підходу, що базується на теорії динамічного програмування Беллмана, є складність знаходження функції Ляпунова, отриманої як розв'язок матричного алгебраїчного рівняння типу Ріккаті.

Труднощі при розв'язанні рівняння (1.13) частково вирішуються шляхом використання методу аналітичного конструювання оптимальних регуляторів за критерієм узагальненої роботи [20]. Цей метод є найбільш

придатним для вирішення завдань оптимізації керування в лінійних системах.

Більш вдосконалим підходом до синтезу оптимальних регуляторів є використання властивостей функцій перемикання оптимальних керувань, що описано в роботах [14, 21]. Для отримання основного функціонального рівняння щодо функції перемикання для релейного закону керування за критерієм (1.9), визначається проекція вектору відносної швидкості відображаючої точки на нормаль до перетину поверхонь перемикання $\psi = 0$ з урахуванням рівняння об'єкту (1.11):

$$\dot{\Psi} = \mathbf{G} \cdot \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{GA} + \mathbf{GBU}. \quad (1.14)$$

де $\Psi = [\psi_1(\mathbf{X}), \psi_2(\mathbf{X}), \dots, \psi_m(\mathbf{X})]^T$ – вектор функцій перемикання закону керування; $\mathbf{A}$ – матриця станів; $\mathbf{B}$ – матриця керування; $\mathbf{G}$ – матриця розміром $m \times n$, рядки якої є градієнтом функцій $\psi_i(\mathbf{X})$.

Строки матриці $\mathbf{G}$ з кроком $m \times n$ представляють собою градієнт функцій перемикання $\psi_i(\mathbf{X})$.

Варто відзначити, що згідно з [10, 14] можна сформулювати m функціональних рівнянь (1.14) для об'єкта керування (1.11), що відкриває можливість розкладу багатовимірної задачі на m однотипних завдань.

Отже, з вихідного функціонального рівняння (1.14) стосовно функцій перемикання впливає:

$$\dot{\psi}(\mathbf{X}) = \mathbf{G} \cdot \dot{\mathbf{X}} = f(\mathbf{X}, \mathbf{U}) + \phi(\mathbf{X}) \cdot u. \quad (1.15)$$

Навіть у випадку, коли використовуються методи синтезу оптимальних керуючих впливів, що базуються на принципі максимуму Понтрягіна або динамічного програмування Беллмана, форма закону оптимального

керування може бути виражена використовуючи властивості функцій перемикавання:

$$\mathbf{U} = -\text{sign}[\Psi(\mathbf{X})]. \quad (1.16)$$

Рівняння (1.15) та (1.16) встановлюють множину припустимих законів керування, які дозволяють об'єкту рухатися з будь-якого початкового стану в простір, наближений до точки $\Psi(\mathbf{X}) = 0$.

Для вибору законів керування, що відповідають визначеним критеріям якості, необхідно розглянути певні характеристики функцій перемикавання оптимального керування (1.16).

Для того, щоб керування (1.15) для об'єкта (1.11) було оптимальним відповідно до критерію (1.9) при умові обмеження (1.8), необхідно, щоб функція перемикавання задовольняла лінійному диференційному рівнянню першого порядку зі змінними коефіцієнтами та , які залежать від координат вектору стану об'єкта. Важливо відзначити, що оптимальне керування об'єктом (1.11) за критерієм (1.9) визначається виключно функцією перемикавання (1.16).

Згідно з формулою (1.16), для досягнення оптимального управління об'єктом (1.11) за інтегральним квадратичним критерієм точності (1.9) при умові обмеження (1.8) необхідним є використання релейного закону керування. За таким підходом, розв'язання задачі синтезу оптимальних релейних регуляторів зводиться до визначення форми функції перемикавання шляхом алгебраїчних перетворень рівнянь динаміки руху об'єкта керування. Цей метод має перевагу в порівнянні із попередніми, оскільки його обчислювальна простота полегшує вирішення завдань, зокрема, за рахунок відсутності потреби у розв'язанні матричного алгебраїчного рівняння типу Ріккати.

Для здійснення синтезу САК тягової установки на основі СДПМ необхідно мати її математичний опис.

1.4 Математичний опис тягової системи із синхронним двигуном на постійних магнітах

Шахтний електровозний транспорт представляє собою універсальну систему перевезення, яка призначена для переміщення видобутих копалин, порожньої породи, допоміжних матеріалів та працівників [1-5]. У рудних шахтах перевезення руди виконується за допомогою контактних електровозів із зчіпною масою 7-14 т.

На Інгульській шахті Державного підприємства "Східний гірничозбагачувальний комбінат" шахтні електровози типу 7КА (див. рис. 1.4) є найпоширенішим підземним типом.

Робота електровозу характеризується двома режимами: режимом тяги та режимом холостого ходу. У режимі холостого ходу (режим вибігу) тяговий привід електровозу не активний, і транспортний засіб рухається за рахунок інерції. Таким чином, цей режим не розглядається в роботі.



Рис. 1.4. Вид контактного електровозу типу 7КА

Режим тяги залежить від загального завантаження та швидкості руху тягової установки. Отже, для моделювання процесу руху тягової установки слід розглянути механічну та електричну компоненти її моделі.

1.4.1. Математичний опис механічної частини електровозу.
Рівняння руху електровозу визначаються у диференціальній формі, встановлюючи зв'язок між швидкістю руху v , часом t і відстанню, пройденою електровозом, що дозволяє визначити характер його руху $v(t)$. На рис. 1.5 подано загальну кінематичну схему шахтного електровозу.

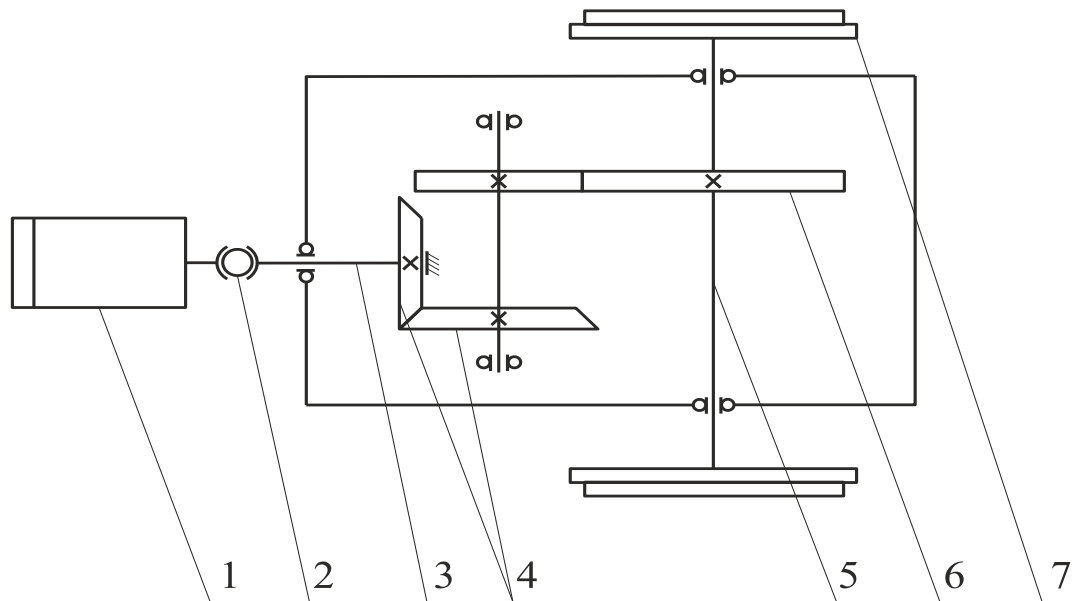


Рисунок 1.5. Кінематична схема тягового електровозу

На рис. 1.5 представлено наступні елементи: 1 – тяговий електричний двигун; 2 – гнучка муфта; 3 – вал провідної конічної шестірні; 4 – пара конічних шестірень; 5 – вісь колісної пари; 6 – пара циліндричних шестірень; 7 – колеса електровозу. Для полегшення математичного опису динаміки руху електровозу використовуються наступні припущення:

- кочення коліс по рейках відбувається як по абсолютно твердому тілу без деформації матеріалу й проковзування;
- тип зубчастої передачі — прямозубий;
- шестерня та зубчасте колесо твердо закріплені відповідно на валу тягового двигуна та на вісі колісної пари;
- не враховується інерційність якоря двигуна, зубчастої передачі та колісної пари електровозу;
- не враховується перерозподіл навантажень між рушійними осями, а також динамічні навантаження від коливань обресорених мас;
- не враховується розсіювання енергії дисипативними силами. Згідно з [16], відомо, що зміна кінетичної енергії тіла відповідає виконаній роботі

прикладеними силами, звідки динаміка руху електровозу, з урахуванням вжитих припущень, буде описуватися рівнянням:

$$m_{\phi} \cdot (1 + \gamma_e) \cdot \frac{dv}{dt} = F_d - W_k. \quad (1.17)$$

де m_{ϕ} – маса електровозу і вагонеток, т;

v – швидкість руху тягового електровозу, км/год;

F_d – дотична до сили, що викликає рух електровозу, Н;

W_k – сила тертя коліс електровозу, Н;

$(1 + \gamma_e)$ – численне значення коефіцієнту інерції.

Знаходження розв'язку рівняння руху електровозу (1.17) дозволяє встановити взаємозв'язок між швидкістю, масою та силою тяги електровозу. Для зручності обчислень визначимо вагу рухомого складу шахтного електровозу через його фактичну масу електровозу і вагонеток:

$$m_{\phi} = \frac{1000 \cdot G}{g}; \quad (1.18)$$

звідки:

$$G = \frac{m_{\phi} \cdot g}{1000} \approx \frac{m_{\phi}}{102},$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

Для повного опису динаміки руху електровозу необхідно розрахувати моменти інерції обертаючих частин. Числове значення коефіцієнта інерції можна знайти, використовуючи рівняння для еквівалентної маси електровозу.

На рис.1.6. наведено схему моментів інерції, які впливають на механічну систему електровозу.

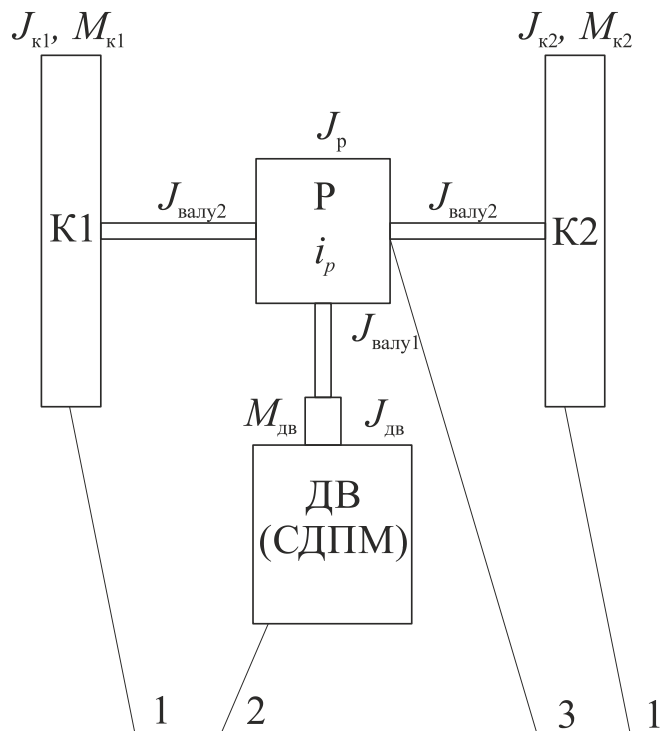


Рис.1.6. Схема моментів інерцій, що діють на механічну систему електровозу:

1 – приводні колісні пари; 2 – якорь двигуна; 3 – вали редуктора.

Еквівалентне значення маси електровозу визначається:

$$m_e = \sum \frac{J_k}{R_k^2} + \sum \frac{J_p}{R_p^2} + \sum i_p^2 \frac{J_{дв}}{R_{дв}^2}; \quad (1.19)$$

де $R_k, R_p, R_{дв}$ – радіуси коліс, редукторів, якоря двигуна відповідно;

$J_k, J_p, J_{дв}$ – моменти інерцій відповідно; коліс, редукторів та якоря двигуна.

Момент інерції механізму, що обертається, визначається:

$$J = m_r \rho^2; \quad (1.20)$$

де m_r – маса рухомої частини;

ρ – радіус інерції обертючих частин.

З рівняння (1.16) враховуючи залежність між еквівалентною та фізичною масою тягового електровозу $m_e = \gamma_e m_\phi$ можна визначити еквівалентну масу електровозу:

$$\gamma_e m_\phi = \sum m_k \frac{\rho_k^2}{R_k^2} + \sum m_p \frac{\rho_p^2}{R_p^2} + \sum m_{дв} i_p^2 \frac{\rho_{дв}^2}{R_{дв}^2}, \quad (1.21)$$

де m_k , m_p , $m_{дв}$ – фізичні маси рухомих частин електровозу включають колеса, редуктор та якір двигуна. Ці частини електровозу мають циліндричну форму, що призводить до стабільних відношень радіусів інерції до фізичних радіусів R обертаючих механізмів.

Коефіцієнт інерції на практиці визначається експериментально відповідно до даних з [16]. Математична модель синхронного двигуна з постійними магнітами.

Узагальнена функціональна схема електроприводу шахтного електровозу на основі СДПМ зображена на рис. 1.7.

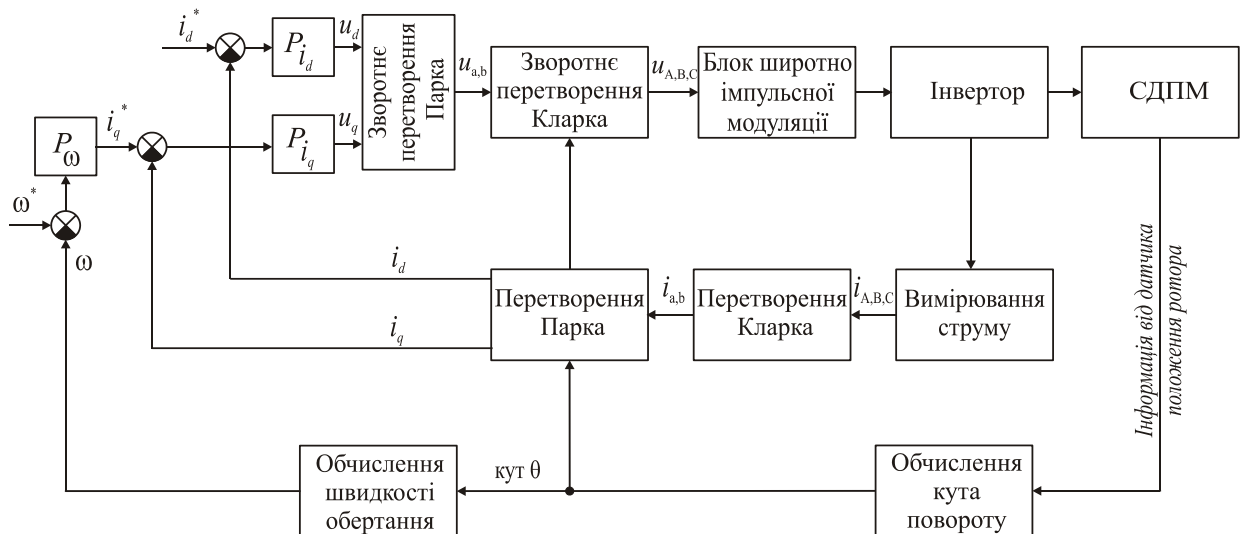


Рис. 1.7. Функціональна схема тягової установки на основі СДПМ

Оскільки постійні часу СДПМ значно вищі, ніж у інших елементів (датчиків струму, швидкості, кута повороту, перетворювачів Парка і Кларка, а також інвертора), для аналізу роботи електроприводу на основі СДПМ необхідно спершу розглянути математичний опис двигуна.

СДПМ виявляє ті ж режими роботи, що і синхронні двигуни з електромагнітним збудженням [15]. Синхронний режим характерний для нормальної експлуатації (номінальний режим СПДМ), а асинхронний режим роботи виникає під час перехідних процесів (при пуску СДПМ, при втягуванні його в синхронізм тощо).

Урахування всіх факторів, що впливають на електромеханічні процеси СДПМ, представляє складне завдання. З метою спрощення аналітичних досліджень розглядається ідеалізована модель СДПМ, яка характеризується наступними припущеннями [10-15]:

1. Симетрична обмотка статора. СДПМ включений в мережу нескінченно великої потужності. Напруга в мережі синусоїдальна і симетрична.

2. Відсутність насичення сталі, гістерезису і вихрових струмів. Параметри СДПМ залишаються сталими в межах режимів, які розглядаються.

3. Розглядаються тільки основні гармоніки просторового розподілу магніторушійної сили і індукції в повітряному зазорі СДПМ.

4. Ротор СДПМ є неявнополюсним і симетричним відносно поздовжньої осі d і поперечної осі q . Пускова обмотка ротора має довільну кількість короткозамкнених контурів, розташованих по осям d і q .

5. Постійний магніт є стабілізованим. Точка відходу прямої повернення на діаграмі магніту в режимах роботи СДПМ, які розглядаються, не змінює свого положення.

На рис. 1.8 зображена схема трьохфазного двохполюсного СДПМ з врахуванням зазначених допущень.

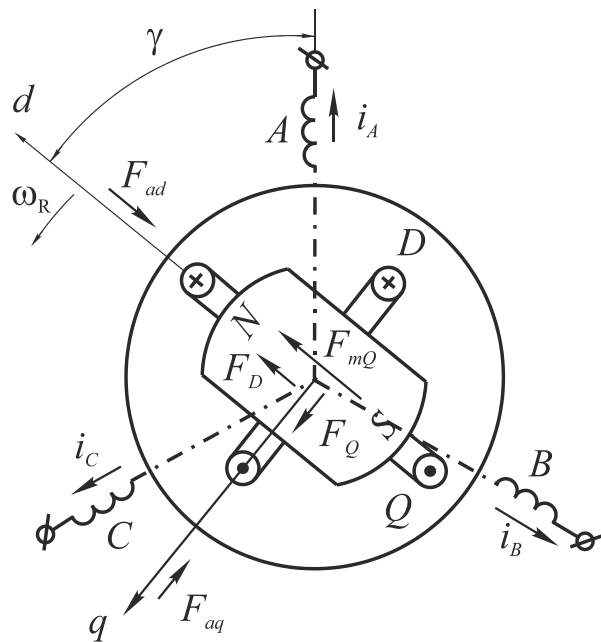


Рис. 1.8. Схема ідеалізованого трьохфазного двохполюсного СДПМ

На рисунку 1.8 прийняті наступні позначення величин:

i_A, i_B, i_C – струми фаз статора А, В та С, А;

ω_R – кутова швидкість поля в статорі, рад⁻¹;

F_{m0} – магніторушійна сила від постійного магніту СДПМ, А;

F_D, F_Q – складові магніторушійної сили від постійного магніту СДПМ по осям d, q , А.

F_{ad}, F_{aq} – проекції магніторушійної сили у фазі А на осі d, q , А.

γ – кут відставання магнітної системи ротору від магнітного поля СДПМ.

Рівняння Парка-Горєва [7-9], записані в простій системі координат ω_k , Загальна інформація, необхідна для вирішення завдань керування, міститься в зазначених даних, і через прості трансформації їх можна привести до будь-якої системи координат. Таким чином, для аналізу робочих режимів СДПМ

ми будемо використовувати рівняння динаміки, записані в рухомій системі координат, що пов'язана з ротором СДПМ (д-кільцеві координати) [5-6]. Рівняння рівноваги напруг для обмотки статора в д-кільцевих координатах виглядають так:

$$\begin{cases} u_d = p\psi_d + i_d r_s - \omega_R \psi_q; \\ u_q = p\psi_q + i_q r_s + \omega_R \psi_d, \end{cases} \quad (1.22)$$

де u_d, u_q – проекції напруги обмоток статора на осі d, q , В;

i_d, i_q – проекції струму обмоток статора на осі d, q , А;

r_s – активний опір обмотки статора СДПМ, Ом;

ψ_d, ψ_q – проекції потокозчеплення статора на осі d, q , В·с;

У зв'язку з вже зазначеними припущеннями математичної моделі СДПМ, можна замінити постійні магніти еквівалентною обмоткою збудження, яка ввімкнена до джерела струму без електричних втрат [6]. Відповідно, рівняння рівноваги напруг для цих еквівалентних стартових обмоток мають такий вигляд:

$$\begin{cases} 0 = p\psi_D + i_D r_D; \\ 0 = p\psi_Q + i_Q r_Q, \end{cases} \quad (1.23)$$

де ψ_D, ψ_Q – проекції потокозчеплення еквівалентної пускової обмотки на осі d, q , В·с; i_D, i_Q – проекції струму еквівалентної пускової обмотки на осі d, q , А; r_D, r_Q – проекції активного опору еквівалентної пускової обмотки на осі d, q , Ом.

Для заміни електромагнітних зв'язків між обмотками статора і ротора на електричні, необхідно привести параметри ротора до параметрів статора. Ефективним методом цього перетворення є використання методики, яка детально описана в [5-8], і полягає у визначенні коефіцієнтів приведення параметрів до статорної обмотки.

Вивчення режимів роботи СДПМ може бути суттєво спрощене, якщо перейти від системи абсолютних одиниць до системи відносних одиниць. За методиками, які представлені в [5-8], ми отримуємо систему диференціальних рівнянь СДПМ у відносних одиницях.

$$\left\{ \begin{array}{l} u_d = p\psi_d + i_d r_s - \omega_R \psi_q; \\ u_q = p\psi_q + i_q r_s + \omega_R \psi_d; \\ \psi_d = x_d i_d + x_{dD} i_D + x_{dM} I_{M0}; \\ \psi_q = x_q i_q + x_{qQ} i_Q; \\ 0 = p\psi_D + i_D r_D; \\ 0 = p\psi_Q + i_Q r_Q; \\ \psi_D = x_D i_D + x_{dD} i_d + x_{DM} I_{M0}; \\ \psi_Q = x_Q i_Q + x_{qQ} i_q; \\ H p \omega_R = \psi_d i_q - \psi_q i_d - M_3; \\ I_{M0} = \text{const.} \end{array} \right. \quad (1.24)$$

де $x_d = L_d / L_6$; $x_q = L_q / L_6$; $x_{dM} = M'_{dM} / L_6$; $x_{dD} = M'_{dD} / L_6$; $x_{qQ} = M'_{qQ} / L_6$;
 $x_{DM} = M'_{DM} / L_6$; $x_D = L'_D / L_6$; $x_Q = L'_Q / L_6$; $r_s = r_s / z_6$; $r_D = r'_D / z_6$; $r_Q = r'_Q / z_6$;
 $\omega_R = \omega_R / \omega_1$; $H = J \omega_1^2 / (p M_6)$.

Для спрощення запису в системі рівнянь (1.24) і далі в роботі нижній індекс «*» і верхній індекс «'» опускаються.

Параметри синхронного двигуна з ПМ типу Оріон-18-2-01П з пусковими обмотками, наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2. Параметри двигуна типу Оріон-18-2-01П

Тип	$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, В	r_s , Ом	x_d , Ом	x_q , Ом	r_D , Ом	x_D , Ом	x_Q , Ом	x_{dD} , Ом	x_{qQ} , Ом	Φ_0 , Вб	J_B , кг·м ²	P
Оріон-18-2-01П	35	250	0,97	0,0053	0,0023	0,24	206,1	103,2	0,0113	0,0052	0,183	0,013	4

1.5 Втрати електроенергії під час перехідних процесів в електроприводах та методи їх зменшення

У сучасній українській системі електротранспорту переважно використовуються електроприводи із двигунами постійного струму послідовного та змішаного збудження. Основною перевагою таких двигунів є забезпечення природніми характеристиками двигунів тягової характеристики, що означає характеристику із постійним віддачею потужності ($P_n = M \cdot \omega$). Для управління такими двигунами застосовують тиристорно-імпульсні системи управління.

Серед переваг тиристорно-імпульсної системи управління слід відзначити економію електроенергії, плавне безступінчасте регулювання швидкості, електричне гальмування практично до зупинки та високу керованість транспортного засобу. Однак значним недоліком таких електроприводів є наявність тягових двигунів з колекторами та необхідність переключення силового кола при переході від тягового до гальмівного режиму.

Найбільш перспективним для електротранспорту є використання електроприводів з імпульсним керуванням двигунами змінного струму. Прогрес у напівпровідниковій техніці, мікроелектроніці, цифрових системах

управління створив реальну основу для впровадження у електротранспорт керованого електропривода змінного струму.

Сучасні промислові частотні перетворювачі для живлення асинхронних і синхронних двигунів із скалярним і векторним утворенням вихідних напруг дозволяють досягти високих енергетичних і масогабаритних показників електропривода, формувати механічні характеристики з широким діапазоном регулювання швидкості під час регулювання частоти вихідної напруги живлення двигуна, як вверх, так і вниз від номінальної.

Завдання формування тягових механічних характеристик таких електроприводів можна вирішити системою управління.

У відомих системах керування транспортними електроприводами [1-3], оператор визначає керуючі впливи у вигляді сигналів задання частоти або напруги живлення привідного двигуна. У частотно-керованому тяговому електроприводі визначають три основні режими стабілізації параметрів двигунів: моменту, потужності та напруги. Система автоматичного регулювання забезпечує ці режими роботи електропривода та реалізує характеристики з максимальною та частковою віддачею потужності.

Система з паралельним вмиканням регуляторів може забезпечити одночасне регулювання кількох параметрів. Дослідження показників керованості електропривода з двигуном постійного струму послідовного збудження, який живиться від тиристорного широтно-імпульсного перетворювача з паралельно ввімкненими регуляторами струму та швидкості, показали, що така система забезпечує регулювання швидкості з характеристиками, близькими до тягових на робочих позиціях, стабілізацію швидкості в зоні маневрових швидкостей, із одночасним обмеженням моментів у динамічних режимах пуску, гальмування та обмеження перевантажень.

Для частотно-регульованого асинхронного електропривода також пропонується використовувати систему регулювання з паралельно

увімкненими регуляторами швидкості, моменту, а для отримання характеристик з постійною віддачею потужності - доповнити систему регулювання ще й регулятором потужності. Така система забезпечить необхідні характеристики без значного ускладнення алгоритмів керування частотного перетворювача за допомогою введення функціональних перетворювачів.

Перетворювачі частотно-керованих синхронних тягових електроприводів, як правило, реалізують задане співвідношення U/f та обмеження вихідного струму інвертора у разі перевищення його допустимого значення для двигуна.

Система керування електроприводом повинна реалізувати вимоги формування характеристик з регульованою віддачею потужності, регульованим максимальним моментом та стабілізацією повзучих швидкостей. У роботах [1,11] запропоновано використовувати систему керування з паралельним увімкненням регуляторів для цих цілей.

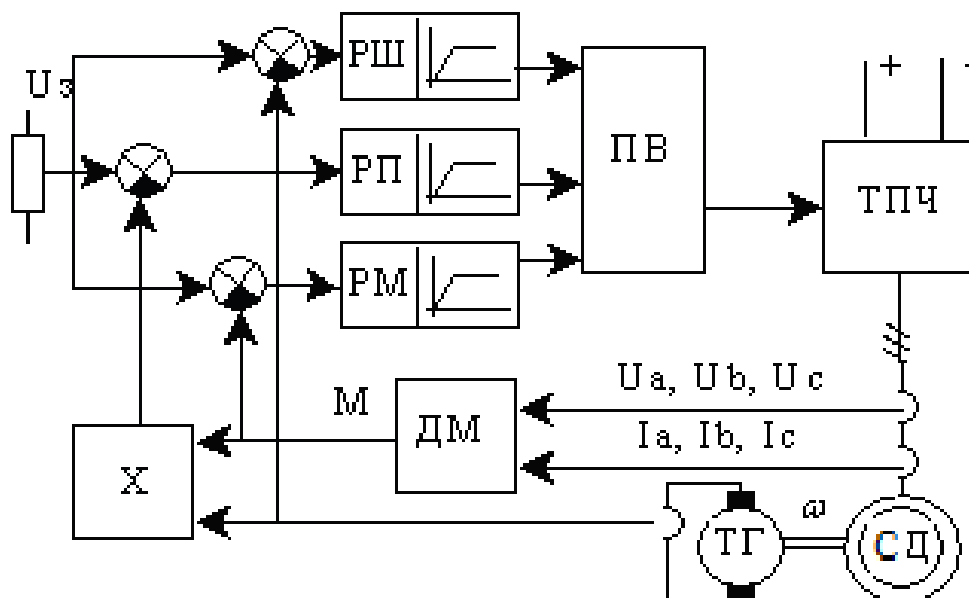


Рис. 1.8. Структурна схема керування електроприводом

У даному дослідженні висвітлено аналіз регулювальних властивостей електропривода, що керується за допомогою частотного регулятора, із використанням системи, в якій регулятори потужності, моменту і швидкості працюють паралельно.

На зображеннях 1.9 і 1.10 представлені характеристичні графіки перехідних процесів для моменту $M(t)$, швидкості $\omega(t)$ і потужності $P(t)$ при стрибкоподібному зміні напругових вхідних сигналів у систему електропривода, а також при зміні моменту навантаження $M_c(t)$.

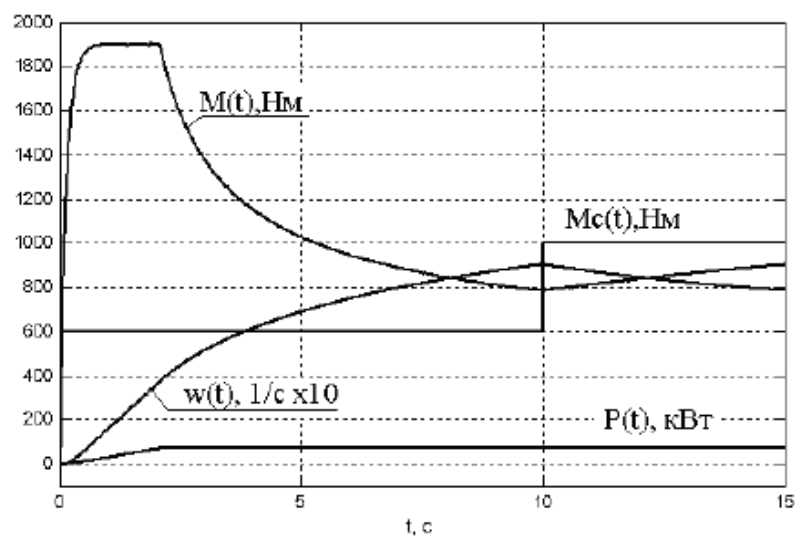


Рис. 1.9. Графіки динамічних процесів в електропривода

Зниження сигналу управління до рівня, що відповідає віддачі потужності 45 кВт, супроводжується зниженням обмеження моменту до 0,95 кН, а також скороченням кутового прискорення двигуна і лінійного прискорення електровозу до 5 1/c^2 і $0,3 \text{ м/c}^2$ відповідно.

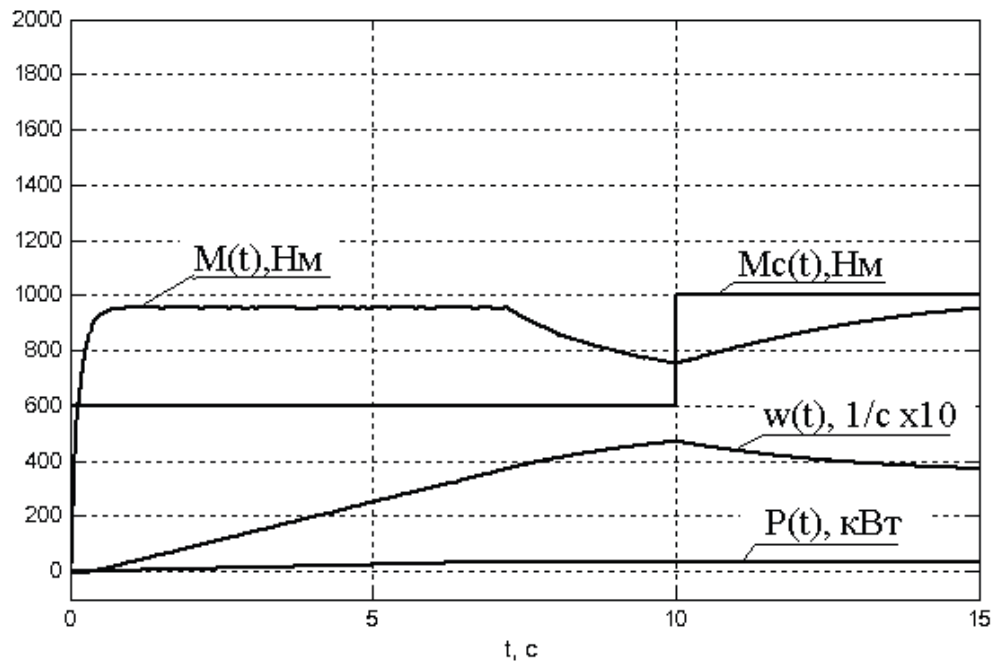


Рис. 1.10. Графік перебігу перехідного процесу в електропривода

Аналіз осцилограм вказує, що при введенні сигналу управління, що відповідає віддачі потужності 45 кВт (див. рис. 1.9), система електроприводу формує максимальний тяговий момент привідного двигуна на рівні 1,9 кН. Цей тяговий момент забезпечує прискорення вала тягового двигуна до 18 1/s^2 або $1,1 \text{ м/с}^2$ для електровозу.

У обох сценаріях рівень віддачі потужності залишається незмінним при зміні моменту M_c навантаження. Таким чином, ця система електроприводу демонструє необхідні властивості для тягового електроприводу, зокрема, регулювання швидкості і прискорення.

Висновки до розділу

1. Проведений аналіз використання двигунів постійного та змінного струмів виявив конструктивні недоліки та низьку енергоефективність, які притаманні двигунам, що використовуються в шахтних електровозах. Для підвищення ефективності тягових установок пропонується використовувати СДПМ, які здатні компенсувати ці недоліки.

2. Огляд відомих методів автоматичного керування тяговими установками із СДПМ підтвердив перспективність застосування оптимальних релейних регуляторів, які працюють в ковзному режимі, для створення високоякісних систем керування тяговими установками.

3. В результаті аналізу методів синтезу САК для тягових установок із СДПМ було встановлено, що найбільш доцільним підходом до синтезу оптимальних релейних регуляторів є використання властивостей функцій перемикання оптимальних керувань.

4. Визначено ключові напрямки підвищення енергоефективності функціонування тягових установок при впровадженні автоматизації керування рухом електровозу.

РОЗДІЛ 2

2. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ В ТЯГОВИХ УСТАНОВКАХ

Для проведення теоретичного аналізу систем автоматичного керування тяговими установками в перехідних режимах з використанням СДПМ вирішення завдань дослідження вимагає виконання наступних етапів:

1. Сформулювати завдання синтезу системи автоматичного керування для тягових установок на основі СДПМ в перехідних режимах.
2. Розробити математичні моделі тягових установок, які базуються на СДПМ, спрямовані на аналіз перехідних режимів.
3. Отримати аналітичні вирази для сигналів оптимальних релейних керуючих впливів в системах автоматичного керування тяговими установками, використовуючи обрану методологію синтезу, яка базується на властивостях функцій перемикання.

2.1 Формалізація синтезу системи автоматичного керування в тягових установках

В основі синтезу САК лежить поняття про математичну модель керованого процесу, або об'єкту керування. Така модель повинна відображати властивості реального об'єкту в межах точності, необхідної для здійснення процесу керування.

Аналіз математичних моделей електроприводу тягових установок дає змогу стверджувати, що з урахуванням припущень, наведених в п. 1.4.2 роботи, їх можна представити у вигляді системи лінійних диференціальних рівнянь [17]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t); \\ \mathbf{Y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t) + \mathbf{D}\mathbf{U}(t), \end{cases} \quad (2.1)$$

де $\mathbf{X}$ – вектор станів в динамічній системі;

$\mathbf{U}$ – вектор сигналів керування в динамічній системі;

$\mathbf{A}$ – матриця станів в динамічній системі;

$\mathbf{B}$ – матриця керування положенням ротора.

$\mathbf{C}$ – матриця керуючих сигналів контролю швидкості.

$\mathbf{D}$ – матриця прямого зв'язку положень ротора.

Матриця прямого зв'язку $\mathbf{D}=\mathbf{0}$, що вказує на відсутність зв'язку.

Вектор керування в загальному випадку визначається з множини:

$$\mathbf{U}^m = \left\{ u_p : u_p(t) \in [-U_{p\max}, U_{p\max}], p = 1, 2, \dots, m \right\}, \quad (2.2)$$

Зважаючи, що керуючий вплив виконується нормовано, тому $U_{p\max} = 1$.

При вирішенні задачі синтезу оптимальних керувань велике розповсюдження мають інтегральні квадратичні функціонали контролю якості САК :

$$I_0 = \frac{1}{2} \int_0^{t=\infty} (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{U}^T \mathbf{R} \mathbf{U}) dt \rightarrow \min, \quad (2.3)$$

де $\mathbf{Q}$ – симетрична матриця вагових коефіцієнтів розмірності $n \times n$;

$\mathbf{R}$ – симетрична матриця коефіцієнтів розмірності $m \times m$.

Характерною особливістю квадратичних критеріїв якості у формі (2.3) є можливість необмеженого збільшення коефіцієнтів підсилення САК (при $\mathbf{R}=\mathbf{0}$), при цьому не виникає втрати стійкості. У цьому випадку критерій якості набуває наступного вигляду:

$$I_0 = \frac{1}{2} \int_0^{t=\infty} (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X}) dt \rightarrow \min. \quad (2.4)$$

Найточніше оптимальне керування для САК [19] відповідає критерію (2.4), забезпечуючи при цьому швидкі та плавні перехідні процеси.

Задача оптимального керування для тягової установки, що описується системою рівнянь (2.1) і використовує критерій (2.4), сформульована так: на множині допустимих керувань потрібно знайти закон зворотного зв'язку, що разом з об'єктом (2.1) утворює стійку замкнену систему.

Ця система гарантує мінімізацію функціоналу якості (2.4) при переході об'єкта керування від будь-якого початкового положення до кінцевого нульового.

2.2 Методологія задачі синтезу системи керування тяговою установкою

Оптимальне керування, задачею якого є мінімізація інтегрального критерію якості (2.4) при обмеженнях $|\mathbf{U}_i(t)| \leq 1$ можна визначити так:

$$U = -\text{sign}[\psi(\mathbf{X})], \quad (2.5)$$

де $\psi(\mathbf{X}) = [\psi_1(\mathbf{X}), \psi_2(\mathbf{X}), \dots, \psi_m(\mathbf{X})]^T$ – транспоновані значення вектору функцій перемикавання.

Для визначення форми функції перемикавання необхідно розглянути основне функціональне рівняння щодо цієї функції. З метою отримання основного функціонального рівняння для керування (2.5), яке є оптимальним за критерієм (2.4), ми записуємо вираз для проекції вектора відносної

швидкості зображувальної точки на нормаль до перерізу поверхонь перемикання [16]. Це враховує диференціальні рівняння об'єкту керування (2.1):

$$\dot{\psi} = \mathbf{G}\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{G}\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{B}\mathbf{U}, \quad (2.6)$$

де $\mathbf{G}$ – матриця $m \times n$, строки якої є градієнтом функцій $\psi_i(\mathbf{X})$:

$$\mathbf{G} = \left\{ \frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{X}} \right\}. \quad (2.7)$$

Рівняння (2.6) становить основне функціональне рівняння, яке враховує характеристики об'єкта керування (2.1) та його керуючі канали. Це рівняння можна використовувати для визначення функції перемикання і, таким чином, оптимального керування. Його використання дозволяє провести декомпозицію задачі, представивши функціональне рівняння для функцій перемикання кожного керуючого впливу.

З рівняння (2.6) для поверхні перемикання i -го керуючого впливу можна записати:

$$\dot{\psi}_i(\mathbf{X}) = \mathbf{G}_i\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{G}_i\mathbf{B}\mathbf{U}_i' + \mathbf{G}_i\mathbf{B}\mathbf{U}_i''u_i, \quad (2.7)$$

де

$$\mathbf{G}_i = [\text{grad}(\psi_i)]^T, \quad (2.8)$$

$$\mathbf{U}_i' = [u_1, u_2, \dots, u_i = 0, \dots, u_m]^T, \quad (2.9)$$

$$\mathbf{U}_i'' = [0, 0, \dots, u_i = 1, \dots, 0]^T. \quad (2.10)$$

Виразимо рівняння (2.7) у відношенні до i -го керування:

$$\dot{\psi}_i(\mathbf{X}) = \mathbf{G}_i \dot{\mathbf{X}} = f_i(\mathbf{X}, \mathbf{U}_i') + \varphi_i(\mathbf{X})u_i, \quad (2.11)$$

де

$$f_i(\mathbf{X}, \mathbf{U}_i') = \mathbf{G}_i(\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{U}_i'), \quad (2.12)$$

$$\varphi_i(\mathbf{X}) = \mathbf{G}_i \mathbf{B} \mathbf{U}_i'', \quad (2.13)$$

$$u_i = -\text{sign}[\psi_i(\mathbf{X})]. \quad (2.14)$$

Згідно отриманого функціонального рівняння (2.11), якщо похідна i -ї функції перемикання рівна швидкості проникнення i -ї поверхні перемикання, то саму i -ту функцію перемикання можна визначити через лінійне диференціальне рівняння першого порядку відносно функції перемикання зі змінними коефіцієнтами. Для об'єкту керування (2.1) можна записати m функціональних рівнянь (2.11) відносно функцій перемикання.

Відповідно до властивостей функціонального рівняння та функцій перемикання, робота [14] формулює такий висновок: для того, щоб керування об'єктом керування (2.1) було оптимальним за критерієм (2.4) при та обмеженнях, необхідно і достатньо визначити матрицю коефіцієнтів (2.8), або, що те саме, необхідно і достатньо визначити структуру складових та основного функціонального рівняння (2.11).

Очевидно, що дослідження рівняння (2.11) і отримання закону i -го оптимального керування (2.14) значно спрощується, порівняно з

розв'язанням крайової задачі порядку , або вирішенням диференційного рівняння Беллмана в частинних похідних.

Для того, щоб перейти до вирішення задачі синтезу оптимального керування, необхідно створити математичну модель електроприводу на основі СДПМ.

2.3 Математичні моделі динаміки руху тягової установки

Щоб скористатись вищезгаданою методикою синтезу оптимальних керувань тяговими установками на основі СДПМ, необхідно привести диференційні рівняння динаміки руху СДПМ для кожного з розглянутих в роботі варіантів їх конструктивного виконання до стандартної форми вигляду Коші.

Математична модель динаміки руху тягової установки на основі СДПМ з пусковими обмотками. Для перетворення системи диференційних рівнянь (1.24) до стандартного вигляду, виконаємо алгебраїчні перетворення системи (1.24), підставивши значення потокозчеплення статорної та пускової обмоток СДПМ в інші рівняння системи. Важливо врахувати умову, що $p x_{dm} I_{m0} = 0$:

$$\begin{cases} u_d = i_d r_s + x_d p i_d + x_{dD} p i_D - \omega_R x_q i_q - \omega_R x_{qQ} i_Q; \\ 0 = i_D r_D + x_D p i_D + x_{dD} p i_d; \\ u_q = i_q r_s + x_q p i_q + x_{qQ} p i_Q + \omega_R x_d i_d + \omega_R x_{dD} i_D + \omega_R x_{dm} I_{m0}; \\ 0 = i_Q r_Q + x_Q p i_Q + x_{qQ} p i_q; \\ J p \omega_R = i_q (x_d i_d + x_{dD} i_D + x_{dm} I_{m0}) - i_d (x_q i_q + x_{qQ} i_Q) - M_3. \end{cases} \quad (2.15)$$

Розкривши компоненти, що визначають взаємозв'язки та зовнішні впливи у системі рівнянь (2.15) і перейшовши до відхилених рівнянь, отримуємо систему рівнянь (2.16):

$$\begin{cases} u_d = i_d r_s + x_d p i_d + x_{dD} p i_D + f_1; \\ 0 = i_D r_D + x_D p i_D + x_{dD} p i_d; \\ u_q = i_q r_s + x_q p i_q + x_{qQ} p i_Q + \omega_R x_{dM} I_{M0} + f_3; \\ 0 = i_Q r_Q + x_Q p i_Q + x_{qQ} p i_q; \\ J p \omega_R = i_q x_{dM} I_{M0} + f_5. \end{cases} \quad (2.16)$$

де f_1, f_3 та f_5 – збурення в САК, які описуються:

$$\begin{cases} f_1 = -\omega_R x_q i_q - \omega_R x_{qQ} i_Q = -\omega_R (x_q i_q + x_{qQ} i_Q); \\ f_3 = \omega_R (x_d i_d + x_{dD} i_D); \\ f_5 = i_q (x_d i_d + x_{dD} i_D) - i_d (x_q i_q + x_{qQ} i_Q) - M_3. \end{cases} \quad (2.17)$$

Траєкторію бажаного руху індексом «*» необхідно дати позначення і параметрам руху без впливів, такі як $u_d^*, u_q^*, i_d^*, i_D^*, i_q^*, i_Q^*, \omega_R^*$. Звідки дані позначення введемо в рівняння нові змінні: $\eta_1 = I_d = i_d - i_d^*$; $\eta_2 = I_D = i_D - i_D^*$; $\eta_3 = I_q = i_q - i_q^*$; $\eta_4 = I_Q = i_Q - i_Q^*$; $\eta_5 = \Omega_R = \omega_R - \omega_R^*$.

Система диференціальних рівнянь руху без зовнішніх впливів прийме вигляд:

$$\begin{cases} U_1 = \eta_1(r_s + px_d) + \eta_2 px_{dD}; \\ 0 = \eta_1 px_{dD} + \eta_2(r_D + px_D); \\ U_3 = \eta_3(r_s + px_q) + \eta_4 px_{qQ} + \eta_5 x_{dM} I_{M0}; \\ 0 = \eta_3 px_{qQ} + \eta_4(r_Q + px_Q); \\ 0 = \eta_3 x_{dM} I_{M0} - \eta_5 pJ. \end{cases} \quad (2.18)$$

У даній системі рівнянь позначення $U_1 = u_d - u_d^*$ та $U_3 = u_q - u_q^*$ є виразами керування струмами в ортогональній системі d-q, U^* керування, що забезпечує рух $i_d = i_d^*$, $i_D = i_D^*$, $i_q = i_q^*$, $i_Q = i_Q^*$, $\omega = \omega^*$ незалежно від наданого відхилення.

За цією концепцією вектор управління U повинен формуватися як функція вектору відхилення η . Іншими словами, регулятор не розрізняє відхилення, які виникають внаслідок зміни положення об'єкта керування, від тих, що викликані перешкодами в електричних ланцюгах і механічними навантаженнями.

Вектор відхилення істинного руху від заданої траєкторії відповідно до системи рівнянь (2.18):

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_1 \\ \eta_1 \\ \eta_1 \end{bmatrix}$$

Представимо систему рівнянь (2.18) СДПМ в матричному виді:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} r_s + px_d & px_{dD} & 0 & 0 & 0 \\ px_{dD} & r_D + px_D & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s + px_q & px_{qQ} & 0 \\ 0 & 0 & px_{qQ} & r_Q + px_Q & 0 \\ 0 & 0 & x_{dM} I_{M0} & 0 & pJ \end{bmatrix}$$

Звідки вектор управління $\mathbf{U}$:

$$\mathbf{U} = \boldsymbol{\eta} \cdot \mathbf{P} = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_1 \\ \eta_1 \\ \eta_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_s + px_d & px_{dD} & 0 & 0 & 0 \\ px_{dD} & r_D + px_D & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s + px_q & px_{qQ} & 0 \\ 0 & 0 & px_{qQ} & r_Q + px_Q & 0 \\ 0 & 0 & x_{dM} I_{M0} & 0 & pJ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ 0 \\ U_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Для визначення взаємозв'язку між рівняннями відхилення $\boldsymbol{\eta}$ визначимо передаточну функцію $\mathbf{W}$ матриці $\mathbf{P}$:

$$\mathbf{W} = \mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & w_{14} & w_{15} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & w_{24} & w_{25} \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} & w_{34} & w_{35} \\ w_{41} & w_{42} & w_{43} & w_{44} & w_{45} \\ w_{51} & w_{52} & w_{53} & w_{54} & w_{55} \end{bmatrix}$$

де w_{ij} – елементи матриці $\mathbf{W}$, що приймають значення:

$$w_{11} = \frac{r_D + px_D}{r_D r_s + p^2 x_{dD}^2 + pr_s x_D + p^2 x_D x_d};$$

$$w_{12} = w_{21} = \frac{px_{dD}}{r_D r_s - p^2 x_{dD}^2 + pr_D x_d + px_s x_D + p^2 x_D x_d};$$

$$w_{22} = \frac{r_s + px_d}{r_D r_s + p^2 x_{dD}^2 + pr_D x_d + px_s x_D + p^2 x_D x_d};$$

$$w_{13}, w_{14}, w_{15}, w_{23}, w_{24}, w_{25} = 0;$$

$$w_{31}, w_{32} = 0$$

$$w_{33} = \frac{Jx_Q p^2 + Jr_Q p}{r_Q I_{m0}^2 x_{dm}^2 + Jp^3 x_{qQ}^2 + Jp^2 r_Q x_q + Jp^2 r_s x_Q + Jp^3 x_Q x_q + Jpr_s r_Q + pI_{m0}^2 x_Q x_{dm}^2}$$

$$w_{34} = \frac{Jp^2 x_{qQ}}{r_Q I_{m0}^2 x_{dm}^2 + Jp^3 x_{qQ}^2 + Jp^2 r_Q x_q + Jp^2 r_s x_Q + Jp^3 x_Q x_q + Jpr_s r_Q + pI_{m0}^2 x_Q x_{dm}^2}$$

$$w_{35} = \frac{r_Q I_{m0} x_{dm} + pI_{m0} x_Q x_{dm}}{r_Q I_{m0}^2 x_{dm}^2 + Jp^3 x_{qQ}^2 + Jp^2 r_Q x_q + Jp^2 r_s x_Q + Jp^3 x_Q x_q + Jpr_s r_Q + pI_{m0}^2 x_Q x_{dm}^2}$$

$$w_{41}, w_{42} = 0; w_{43} = w_{34}.$$

$$w_{44} = \frac{Jp^2 x_q + Jpr_s + I_{m0}^2 x_{dm}^2}{r_Q I_{m0}^2 x_{dm}^2 + Jp^3 x_{qQ}^2 + Jp^2 r_Q x_q + Jp^2 r_s x_Q + Jp^3 x_Q x_q + Jpr_s r_Q + pI_{m0}^2 x_Q x_{dm}^2}$$

$$w_{45} = \frac{pI_{m0} x_{qQ} x_{dm}}{r_Q I_{m0}^2 x_{dm}^2 + Jp^3 x_{qQ}^2 + Jp^2 r_Q x_q + Jp^2 r_s x_Q + Jp^3 x_Q x_q + Jpr_s r_Q + pI_{m0}^2 x_Q x_{dm}^2}$$

$$w_{51}, w_{52} = 0; w_{53} = w_{35}; w_{54} = w_{45}.$$

$$w_{55} = \frac{r_Q r_s - p^2 x_{qQ}^2 + p r_Q x_q + p r_s x_Q + p^2 x_Q x_q}{r_Q I_{m0}^2 x_{dm}^2 + J p^3 x_{qQ}^2 + J p^2 r_Q x_q + J p^2 r_s x_Q + J p^3 x_Q x_q + J p r_s r_Q + p I_{m0}^2 x_Q x_{dm}^2}$$

Аналіз матриці W показав, що можна відзначити, що перші два рівняння системи (2.18) є лінійно незалежними від трьох останніх. З урахуванням цього факту можна розглядати два незалежні канали в аналізі режимів роботи СДПМ, які описуються системами відповідних лінійних рівнянь.

Розглянемо математичну модель динаміки руху тягової установки для контуру d . Для цього наведемо перші два рівняння системи (2.17), що визначають динаміку руху СДПМ по осі d :

$$\begin{cases} U_1 = \eta_1(r_s + p x_d) + \eta_2 p x_{dD}; \\ 0 = \eta_1 p x_{dD} + \eta_2(r_D + p x_D). \end{cases} \quad (2.19)$$

Представимо систему рівнянь (2.19) у матричному виді через рівняння стану:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_d = \mathbf{A}_d \boldsymbol{\eta}_d + \mathbf{B}_d \mathbf{U}_d; \quad (2.20)$$

де $\boldsymbol{\eta}_d$ – вектор положень для осі d :

$$\boldsymbol{\eta}_d = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix}, \quad (2.21)$$

$\mathbf{U}_d$ – вектор керувань для осі d :

$$\mathbf{U}_d = U_1, \quad (2.22)$$

$\mathbf{A}_d$ – матриця станів для осі d :

$$\mathbf{A}_d = \begin{bmatrix} a_{d11} & a_{d12} \\ a_{d21} & a_{d22} \end{bmatrix}, \quad (2.23)$$

$\mathbf{B}_d$ – матриця керувань для осі d :

$$\mathbf{B}_d = \begin{bmatrix} b_{d11} \\ b_{d21} \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

Для того, щоб привести систему рівнянь (2.19) до стандартного вигляду (2.20), треба виконати певні алгебраїчні перетворення.

Після розкриття дужок у рівняннях (2.19) і залишення в лівій частині рівнянь $\eta_1 p$, $\eta_2 p$ маємо:

$$\begin{cases} \eta_1 p = -\eta_1 \frac{r_s}{x_d} - \eta_2 p \frac{x_{dD}}{x_d} + U_1 \frac{1}{x_d}; \\ \eta_2 p = -\eta_1 p \frac{x_{dD}}{x_D} - \eta_2 \frac{r_D}{x_D}. \end{cases} \quad (2.25)$$

Після підстановки першого рівняння (2.25) в друге і навпаки отримаємо:

$$\begin{cases} \eta_1 p = -\eta_1 \frac{r_s}{x_d} - \left(-\eta_1 p \frac{x_{dD}}{x_D} - \eta_2 \frac{r_D}{x_D} \right) \frac{x_{dD}}{x_d} + U_1 \frac{1}{x_d}; \\ \eta_2 p = \left(-\eta_1 \frac{r_s}{x_d} - \eta_2 p \frac{x_{dD}}{x_d} + U_1 \frac{1}{x_d} \right) \frac{x_{dD}}{x_D} - \eta_2 \frac{r_D}{x_D}. \end{cases} \quad (2.26)$$

В результаті перегрупування в першому та другому рівнянні системи (2.26) отримаємо:

$$\begin{cases} \eta_1 p (x_D x_d - x_{dD}^2) = -\eta_1 r_s x_D + \eta_2 r_D x_{dD} + U_1 x_D; \\ \eta_2 p (x_D x_d - x_{dD}^2) = \eta_1 r_s x_{dD} - \eta_2 r_D x_d - U_1 x_{dD}. \end{cases} \quad (2.27)$$

Переведемо ліву частину рівнянь системи (2.27) вирази керуючих впливів $\eta_1 p$, $\eta_2 p$ отримаємо:

$$\begin{cases} \eta_1 p = \eta_1 \frac{-r_s x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} + \eta_2 \frac{r_D x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} + U_1 \frac{x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2}; \\ \eta_2 p = \eta_1 \frac{r_s x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} + \eta_2 \frac{-r_D x_d}{x_D x_d - x_{dD}^2} + U_1 \frac{-x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2}. \end{cases} \quad (2.28)$$

Отже, матриця стану системи, яка визначає динаміку процесів СДПМ по осі d для двигуна Оріон-18-2-01П, що застосовується в тягових електровозах серії 7КА, представлена у такому вигляді:

$$\mathbf{A}_d = \begin{bmatrix} \frac{-r_s x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} & \frac{r_D x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} \\ \frac{r_s x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} & \frac{-r_D x_d}{x_D x_d - x_{dD}^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -181,153 & 2,483 \cdot 10^{-3} \\ 9,932 \cdot 10^{-3} & -1,165 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

Матриця керувань $\mathbf{B}_d$ системою, динамікою процесів СДПМ по осі d має вигляд:

$$\mathbf{B}_d = \begin{bmatrix} \frac{x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} \\ \frac{-x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 188,701 \\ -0,010 \end{bmatrix}. \quad (2.30)$$

Проведена перевірка за критерієм керованості (2.2) знайдених рівнянь стану системи показала, що ранг матриці дорівнює 2, іншими словами, система є повністю керованою.

Тепер розглянемо математичну модель динаміки руху тягової установки для контуру q . Для цього запишемо останні три рівняння системи (2.18), які описують динаміку її руху по осі q :

$$\begin{cases} U_3 = \eta_3(r_s + p x_q) + \eta_4 p x_{qQ} + \eta_5 x_{dM} I_{M0}; \\ 0 = \eta_3 p x_{qQ} + \eta_4 (r_Q + p x_Q); \\ 0 = \eta_3 x_{dM} I_{M0} - \eta_5 p J. \end{cases} \quad (2.31)$$

Приведемо систему рівнянь (2.31) до матричного виду через рівняння стану:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_q = \mathbf{A}_q \boldsymbol{\eta}_q + \mathbf{B}_q \mathbf{U}_q, \quad (2.32)$$

де $\boldsymbol{\eta}_q$ – вектор положень для осі q :

$$\boldsymbol{\eta}_q = \begin{bmatrix} \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \end{bmatrix}, \quad (2.33)$$

$\mathbf{U}_q$ – вектор керувань для осі q :

$$\mathbf{U}_q = U_3, \quad (2.34)$$

$\mathbf{A}_q$ – матриця положень для осі d :

$$\mathbf{A}_q = \begin{bmatrix} a_{q11} & a_{q12} & a_{q13} \\ a_{q21} & a_{q22} & a_{q23} \\ a_{q31} & a_{q32} & a_{q33} \end{bmatrix}, \quad (2.35)$$

$\mathbf{B}_q$ – матриця керувань для осі q :

$$\mathbf{B}_q = \begin{bmatrix} b_{q11} \\ b_{q21} \\ b_{q31} \end{bmatrix}. \quad (2.36)$$

Для перетворення системи рівнянь (2.31) у стандартний вигляд (2.32), потрібно виконати кілька алгебраїчних перетворень. Розкривши дужки в рівняннях (2.31) і залишивши в лівій частині рівнянь: $\eta_3 p$, $\eta_4 p$, $\eta_5 p$ отримаємо:

$$\begin{cases} \eta_3 p = -\eta_3 \frac{r_s}{x_q} - \eta_4 p \frac{x_{qQ}}{x_q} - \eta_5 \frac{x_{dM} I_{M0}}{x_q} + U_3 \frac{1}{x_q}; \\ \eta_4 p = -\eta_3 p \frac{x_{qQ}}{x_Q} - \eta_4 \frac{r_Q}{x_Q}; \\ \eta_5 p = \eta_3 \frac{x_{dM} I_{M0}}{J}. \end{cases} \quad (2.37)$$

Після взаємної підстановки першого рівняння (2.37) в друге отримаємо:

$$\begin{cases} \eta_3 p = -\eta_3 \frac{r_s}{x_q} + \left(\eta_3 p \frac{x_{qQ}}{x_Q} + \eta_4 \frac{r_Q}{x_Q} \right) \frac{x_{qQ}}{x_q} - \eta_5 \frac{x_{dM} I_{M0}}{x_q} + U_3 \frac{1}{x_q}; \\ \eta_4 p = \left(\eta_3 \frac{r_s}{x_q} + \eta_4 p \frac{x_{qQ}}{x_q} + \eta_5 \frac{x_{dM} I_{M0}}{x_q} - U_3 \frac{1}{x_q} \right) \frac{x_{qQ}}{x_Q} - \eta_4 \frac{r_Q}{x_Q}; \\ \eta_5 p = \eta_3 \frac{x_{dM} I_{M0}}{J}. \end{cases} \quad (2.38)$$

Після виконання операцій перегрупування, винесемо за дужки множників рівнянь $\eta_3 p$, $\eta_4 p$, $\eta_5 p$ в перших двох рівняннях системи (2.38) отримаємо:

$$\begin{cases} \eta_3 p (x_Q x_q - x_{qQ}^2) = -\eta_3 r_s x_Q + \eta_4 r_Q x_{qQ} - \eta_5 x_{dM} I_{M0} x_Q + U_3 x_Q; \\ \eta_4 p (x_Q x_q - x_{qQ}^2) = \eta_3 r_s x_{qQ} - \eta_4 r_Q x_Q + \eta_5 x_{dM} I_{M0} x_{qQ} - U_3 x_{qQ}; \\ \eta_5 p = \eta_3 \frac{x_{dM} I_{M0}}{J}. \end{cases} \quad (2.39)$$

Представимо рівняння системи (2.39) через вирази $\eta_3 p$, $\eta_4 p$, $\eta_5 p$ остаточно отримаємо:

$$\begin{cases} \eta_3 p = \eta_3 \frac{-r_s x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + \eta_4 \frac{r_Q x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + \eta_5 \frac{-x_{dM} I_{M0} x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + U_3 \frac{x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2}; \\ \eta_4 p = \eta_3 \frac{r_s x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + \eta_4 \frac{-r_Q x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + \eta_5 \frac{x_{dM} I_{M0} x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} + U_3 \frac{-x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2}; \\ \eta_5 p = \eta_3 \frac{x_{dM} I_{M0}}{J}. \end{cases} \quad (2.40)$$

Отримана матриця стану для системи, яка описує динаміку тягової установки по вісі q для синхронного двигуна з ПМ має вигляд:

$$\mathbf{A}_q = \begin{bmatrix} \frac{-r_s x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} & \frac{r_Q x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} & \frac{-x_{dM} I_{M0} x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \\ \frac{r_s x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} & \frac{-r_Q x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} & \frac{x_{dM} I_{M0} x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \\ \frac{x_{dM} I_{M0}}{J} & 0 & 0 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} -417,439 & 5,258 \cdot 10^{-3} & -79,574 \\ 0,021 & -104,36 & 4,01 \cdot 10^{-3} \\ 14,077 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.41)$$

Матриця керувань $\mathbf{B}_q$, що описує динаміку процесів по вісі q має вигляд:

$$\mathbf{B}_q = \begin{bmatrix} \frac{x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \\ \frac{-x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 434,832 \\ -0,022 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.42)$$

Проведена перевірка за критерієм керованості (2.2) стану системи показала, що система є керованою.

Висновки до розділу

1. Для синтезу оптимальних за точністю сигналів керування тягової установки з СДПМ найдоцільніше застосувати метод аналітичного конструювання оптимальних регуляторів на основі використання властивостей функцій перемикання оптимальних керувань.

2. Знайдені математичні моделі динаміки руху тягової установки з СДПМ для найбільш поширених варіантів конструктивного виконання електродвигунів дозволяють синтезувати сигнали оптимального керування тяговою установкою.

3. Отримані аналітичні вирази для функцій перемикань дали змогу визначити оптимальні сигнали керування, які можуть бути використані при побудові структурних схем САК рухом тягових установок.

РОЗДІЛ 3

3. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВОЮ УСТАНОВКОЮ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ

Сигнали оптимального релейного керування тяговою установкою, отримані у попередньому відділі, створюють базу для розробки структурних схем систем автоматичного керування (САК). З метою подальшої практичної реалізації цих схем і визначення ефективності їх впливу на тягові установки з синхронними двигунами з постійними магнітами (СДПМ), необхідно виконати наступні завдання:

1. Розробити комп'ютерні імітаційні моделі САК для тягових установок з метою дослідження перехідних режимів.
2. Провести аналіз впливу застосування САК на тягові установки, використовуючи розроблені комп'ютерні моделі. Дослідити вплив роботи САК на тривалість перехідного процесу та величину статичної похибки регулювання.

3.1 Комп'ютерні моделі САК рухом тягової установки з СДПМ

Створення комп'ютерної моделі системи автоматичного керування (САК) для руху тягової установки з синхронними двигунами з постійними магнітами (СДПМ) у середовищі MATLAB має ряд складнощів. Нижче перераховано деякі можливі труднощі та поради щодо їх подолання:

Створення точних математичних моделей для СДПМ та САК є складним завданням через складні рівняння динаміки та електромагнітної

взаємодії. Використовуйте літературу та робочі групи для знаходження адекватних математичних моделей.

Через складність моделювання в текстовому вигляді MATLAB/Simulink надає графічний інтерфейс для створення блок-схем та моделей, що полегшує візуалізацію та розуміння системи.

Використання правильних чисельних методів та алгоритмів для симуляції різних частин системи, таких як регулятори, динаміка двигуна та інші дає коректні результати розрахунку.

Необхідно проводити порівняння результатів моделі з результатами, отриманими в літературі або інших досліджень для валідації точності та достовірності.

Під час симуляції необхідно звертати увагу на ефективне використання ресурсів комп'ютера, особливо при роботі з великими моделями, що може значно затримати обробку даних.

Збереження детальної інформації про розроблену модель, включаючи математичні рівняння, параметри, налаштування та результати полегшує проведення повторних моделювань у подальшому.

На рисунку 3.1 представлена загальна комп'ютерна модель системи автоматичного керування (САК) для руху тягової установки, оснащеної синхронними двигунами з постійними магнітами (СДПМ) із пусковими обмотками.

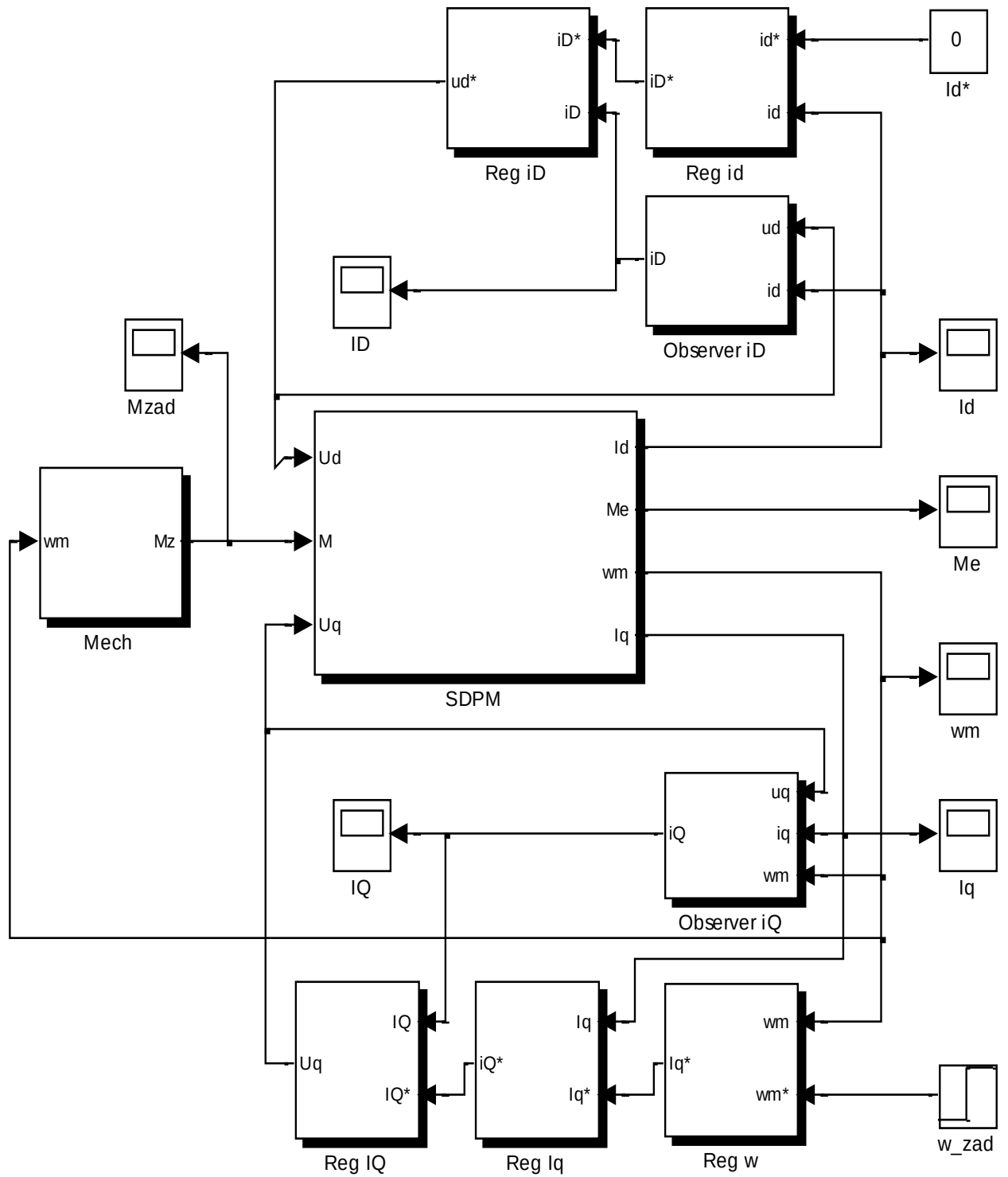


Рис. 3.1. Загальна комп'ютерна модель САК тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками.

Загальна модель САК для тягової установки з СДПМ, що не має пускових обмоток, включає наступні основні блоки:

- Блок «SDPM» - це модель СДПМ без пускових обмоток;
- Блок «Red id» - модель регулятора струму id, відповідального за сигнал керування;
- Блок «Red iq» - модель регулятора струму iq, відповідального за сигнал керування;
- Блок «Red w» - модель регулятора швидкості обертання ротора СДПМ, відповідального за сигнал керування;
- Блок «w_zad» - блок задання швидкості обертання ротора СДПМ;
- Блок «M_zad» - блок задання механічного моменту навантаження;
- Блок «Mech» - модель динаміки руху електровоза.

Ця модель призначена для дослідження та вирішення завдань, пов'язаних із системою автоматичного керування та динамікою тягової установки.

3.2 Комп'ютерне моделювання роботи системи автоматичного керування рухом тягових установок

В якості базової моделі для порівняння було обрано систему автоматичного керування (САК) рухом тягової установки з лінійними регуляторами струму та швидкості, комп'ютерна модель якої зображена на рис. 3.2. Комп'ютерне моделювання функціонування САК проводилося для двох сценаріїв:

1. Для базової моделі САК тягової установки з лінійними регуляторами струму та швидкості.
2. Для розробленої у роботі моделі САК тягової установки з релейними регуляторами струму та швидкості.

1- розроблена модель САК; 2 – базова модель САК

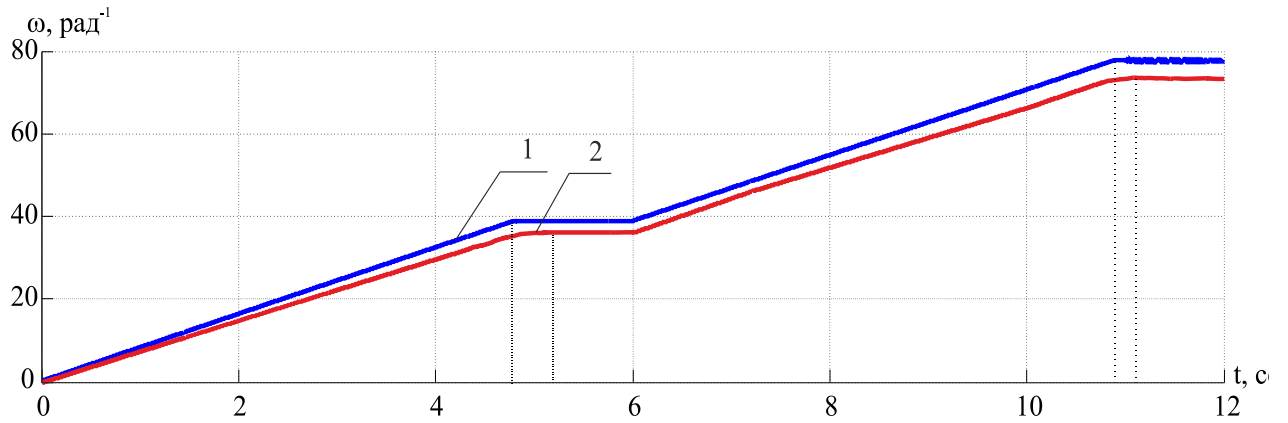


Рис. 3.4. Зміна швидкості обертання ротора тягової установки
для 1- розробленої та 2- базової моделі САК

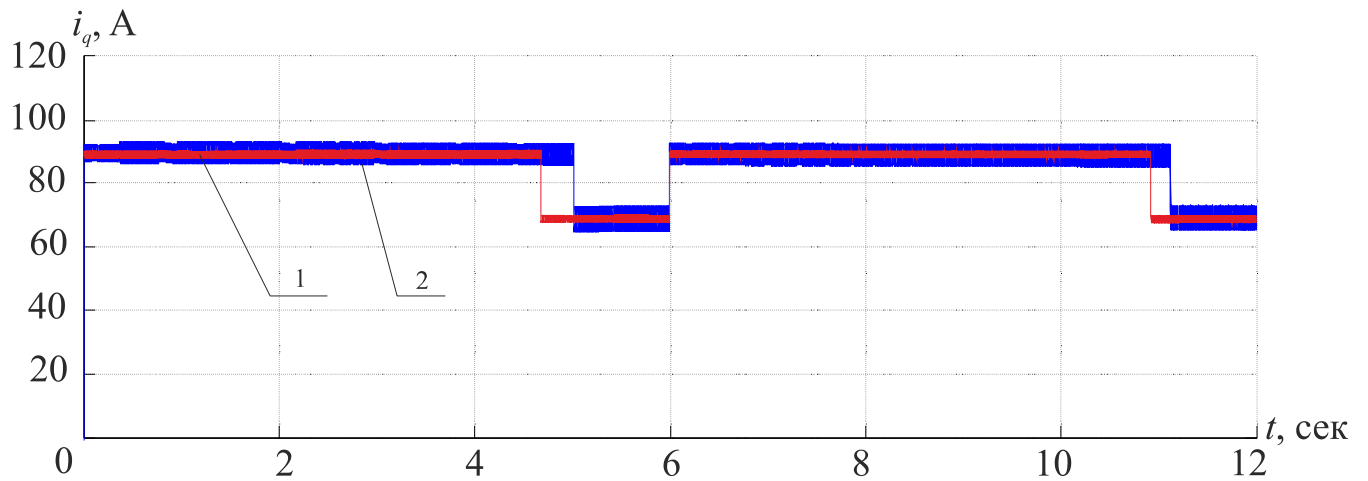


Рис. 3.5. Зміна струму i_q для 1- розробленої та 2- базової моделі САК

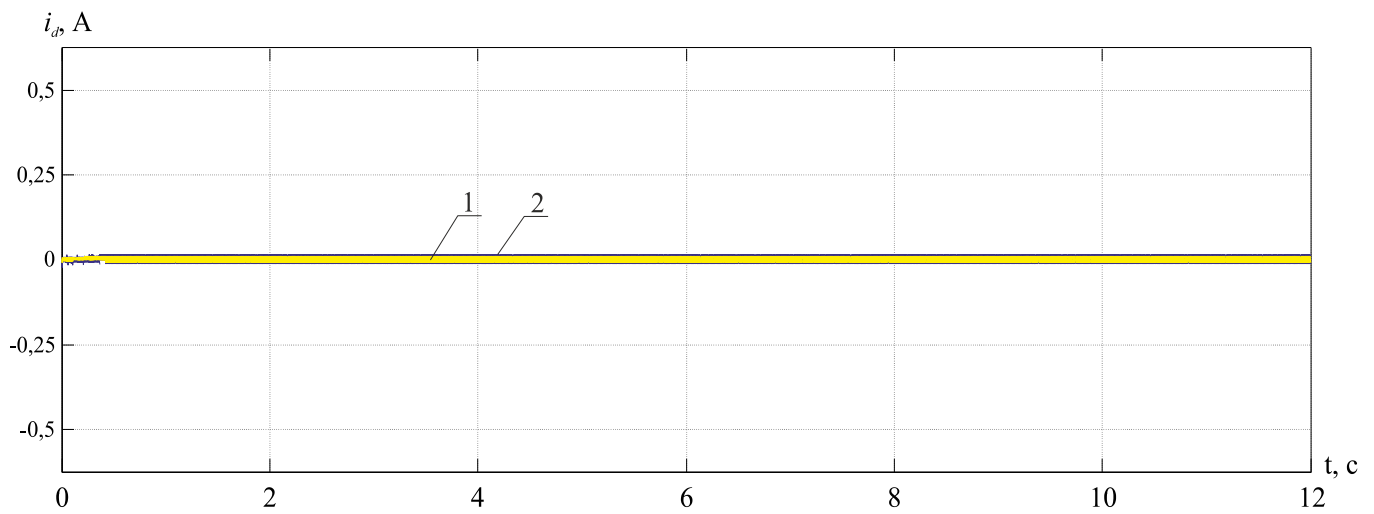


Рис. 3.6. Графіки зміни струму i_d для розробленої (1) та базової (2) моделей
САК

Як видно з рис. 3.4, тривалість перехідного процесу зміни швидкості у випадку запропонованої в роботі моделі виявилась на 13,4 % (0,42 с) меншою, ніж для базової моделі. До того ж, як видно з рис. 3.3 розроблена система, на відміну від базової, володіє астатизмом відносно моменту навантаження.

Висновки до розділу

1. Розроблені структурні схеми систем автоматичного керування (САК) на основі оптимальних релейних законів керування дозволяють створювати комп'ютерні імітаційні моделі. Ці моделі відкривають можливість для аналізу режимів роботи запропонованих САК для тягових установок з синхронними двигунами постійного струму (СДПМ) з пусковими обмотками.

2. Експериментальний аналіз ефекту використання оптимальних релейних сигналів управління на розроблених комп'ютерних моделях свідчить про те, що при застосуванні цих САК тривалість перехідного процесу для СДПМ із пусковими обмотками скорочується на 13,4% у порівнянні з базовою САК. Крім того, розроблені САК тягових установок володіють астатизмом відносно моменту навантаження.

4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ РУХОМ ТЯГОВОЇ УСТАНОВКИ

Визначення економічної ефективності керування рухом тягової установки проводиться для діапазону середніх робочих швидкостей від 3 до 7 км/год для шахтного електровоза. Зміна керування швидкістю виконується з кроком 0,25 км/год. Для кожного значення швидкості отримано тривалість виконання технологічної операції. На рисунку 4.1 подано графік залежності тривалості технологічної операції від керування швидкістю.

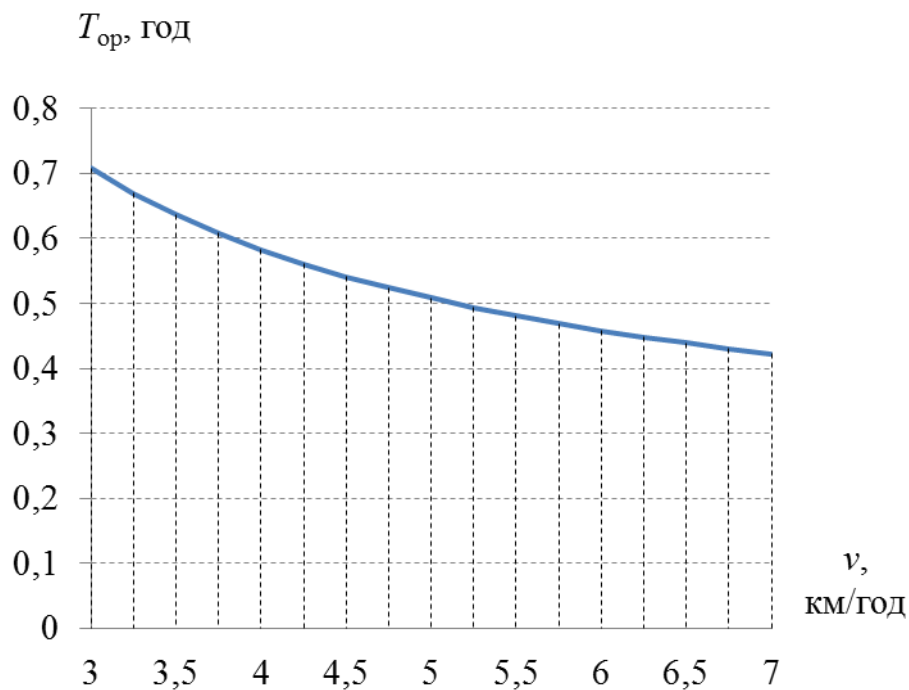


Рис. 4.1. Графік тривалості технологічної операції від керування швидкості.

За техніко-економічною документацією на технологічне обладнання визначимо параметри, що характеризують умови виконання технологічної операції. Параметри технологічного обладнання при транспортуванні руди представлені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Технологічне устаткування для транспортування руди

№ п/п	Параметр операції	Значен- ня	Умовні позначення
1	Вартість двигуна, грн	80527	rs_d
2	Вартість колісної пари, грн	12000	rs_k
3	Вартість підшипникового вузла, грн	7500	$rs_{п}$
4	Встановлена швидкість руху, км/год	7	v
5	Кількість витраченої енергії, кВт год	34,7	W_t
6	Маса руди, кг	37500	m_p
7	Ресурс ізоляції двигуна при роботі в номінальному режимі, год	7200	$T_{дв}$
8	Ресурс колісних пар електровозу, год	8640	$T_{кп}$
9	Ресурс підшипникового вузла при роботі в номінальному режимі, год	10000	$T_{пв}$
10	Тривалість виконання операції, год	0,42	$T_{ор}$

Для проведення оцінки ефективності керування параметрами технологічної операції визначимо вартісні показники операції транспортування за допомогою рівняння (1.4).

Вартість спожитої електричної енергії під час транспортування руди буде визначена у грн.:

$$RE_e = W_t C_0, \quad (4.1)$$

де C_0 – тариф на електричну енергію, грн/кВт·год.

Визначаємо ресурс ізоляції двигуна, год:

$$T_d = T_{дв} k_t, \quad (4.2)$$

де k_t – коефіцієнт запасу міцності ізоляції.

Коефіцієнт запасу міцності ізоляції двигуна:

$$k_t = k_0 2^{\sqrt{\frac{T_{op}}{T_d}}},$$

де k_0 – фактичний коефіцієнт запасу; $k_0 = 7 \dots 9$ [11]; t – час технологічної операції, год.

Витрати ресурсу ізоляції двигуна:

$$R_d = \frac{T_{op}}{T_d}. \quad (4.3)$$

Показник величини зносу ресурсу ізоляції двигуна RE_d , грн:

$$RE_d = R_d r s_d. \quad (4.4)$$

Вартість відвантаженої руди, грн:

$$PE = m_p C_p, \quad (4.5)$$

де C_p – вартість 1 кг руди; за даними оптового ринку $C_p = 2600$ грн/кг.

Ресурс ізоляції підшипникового вузлу, год:

$$T_{\Pi} = T_{пв} k_{\Pi}^a, \quad (4.6)$$

де $k_{\text{и}}$ – коефіцієнт, який враховує фактичний час виконання операції до його значення при номінальних параметрах технологічного обладнання, а – показник зміни середнього терміну служби підшипника.

Коефіцієнт запасу терміну служби підшипників ходової частини:

$$a = 0,41 \text{Re}^{0,56} \lambda^{0,78},$$

де Re – число Рейнольдса; у даному випадку, прийнято, Re = 200;

λ – параметр в'язкості мастила; $\lambda = 0,03$ [10].

Величина зносу підшипника:

$$R_{\text{п}} = \frac{T_{\text{оп}}}{T_{\text{п}}}. \quad (4.7)$$

Знос підшипника $RE_{\text{п}}$, впродовж технологічної операції, грн:

$$RE_{\text{п}} = R_{\text{п}} r s_{\text{п}}. \quad (4.8)$$

Ресурс колісних пар електровозу в процесі роботи, год:

$$T_{\text{к}} = T_{\text{кп}} k_{\text{и}}^{-a}, \quad (4.9)$$

Величина витрати ресурсу зносу колісних пар [17]:

$$R_{\text{к}} = \frac{T_{\text{оп}}}{T_{\text{к}}}. \quad (4.10)$$

Кількісний показник зносу підшипника $RE_{\text{к}}$, в процесі роботи, грн:

$$RE_k = R_k rs_k. \quad (4.11)$$

Результати розрахунку кількісної оцінки при роботі тягової установки приведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Економічна оцінка при керуванні швидкістю руху тягової установки

W_e , кВт·год	v , км/го д	T_{op} , год	RE_d , грн	RE_n , грн	RE_k , грн	RE_e , грн	RE_{Σ} , грн	PE , грн
1	2	3	4	5	6	7	8	9
32,9	3,0	0,715	5,290	0,32	0,59	69,2	78,5	86,4
33,0	3,3	0,676	5,390	0,32	0,61	69,4	78,5	86,4
33,1	3,5	0,643	5,497	0,32	0,63	69,6	78,4	86,4
33,2	3,8	0,614	5,613	0,32	0,66	69,8	78,3	86,4
33,3	4,0	0,589	5,738	0,32	0,68	70,0	78,3	86,4
33,4	4,3	0,567	5,874	0,32	0,71	70,2	78,3	86,4
33,5	4,5	0,547	6,023	0,32	0,74	70,4	78,2	86,4
33,6	4,8	0,529	6,185	0,32	0,77	70,6	78,2	86,4
33,7	5,1	0,513	6,364	0,32	0,81	70,8	78,3	86,4
33,8	5,3	0,499	6,562	0,32	0,85	71,0	78,3	86,4
33,9	5,6	0,486	6,782	0,33	0,90	71,2	78,4	86,4
34,0	5,8	0,474	7,028	0,33	0,96	71,4	78,5	86,4
34,1	6,1	0,463	7,304	0,33	1,02	71,6	78,6	86,4
34,2	6,3	0,452	7,617	0,33	1,09	71,8	78,8	86,4
34,3	6,6	0,443	7,975	0,34	1,17	72,0	79,1	86,4
34,4	6,8	0,435	8,388	0,34	1,27	72,1	79,4	86,4
34,5	7,1	0,427	8,870	0,35	1,38	72,3	79,8	86,4

Відповідно до розрахункових параметрів, проведемо визначення критерію результативності управління швидкістю переміщення шахтного електровозу. Критерій результативності (1.4) для технологічного процесу транспортування представлено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3. Розрахунок критерію ефективності технологічного процесу

N	W_e , кВт·год	v , км/год	T_{op} , год	RE , грн	PE , грн	E
1	2	3	4	5	6	7
1	32,9	3,0	0,72	78,5	86,4	0,0181
2	33,0	3,3	0,68	78,5	86,4	0,0207
3	33,1	3,5	0,64	78,4	86,4	0,0233
4	33,2	3,8	0,61	78,3	86,4	0,0259
5	33,3	4,0	0,59	78,3	86,4	0,0285
6	33,4	4,3	0,57	78,3	86,4	0,0311
7	33,5	4,5	0,55	78,2	86,4	0,0336
8	33,6	4,8	0,53	78,2	86,4	0,0358
9	33,7	5,1	0,51	78,3	86,4	0,0379
10	33,8	5,3	0,50	78,3	86,4	0,0397
11	33,9	5,6	0,49	78,4	86,4	0,0411
12	34,0	5,8	0,47	78,5	86,4	0,0420
13	34,1	6,1	0,46	78,6	86,4	0,0424
14	34,2	6,3	0,45	78,8	86,4	0,0420
15	34,3	6,6	0,44	79,1	86,4	0,0409
16	34,4	6,8	0,43	79,4	86,4	0,0388
17	34,5	7,1	0,43	79,8	86,4	0,0355

На рис. 4.2. приведений графік ефективності при керуванні швидкістю руху тягової установки.

E

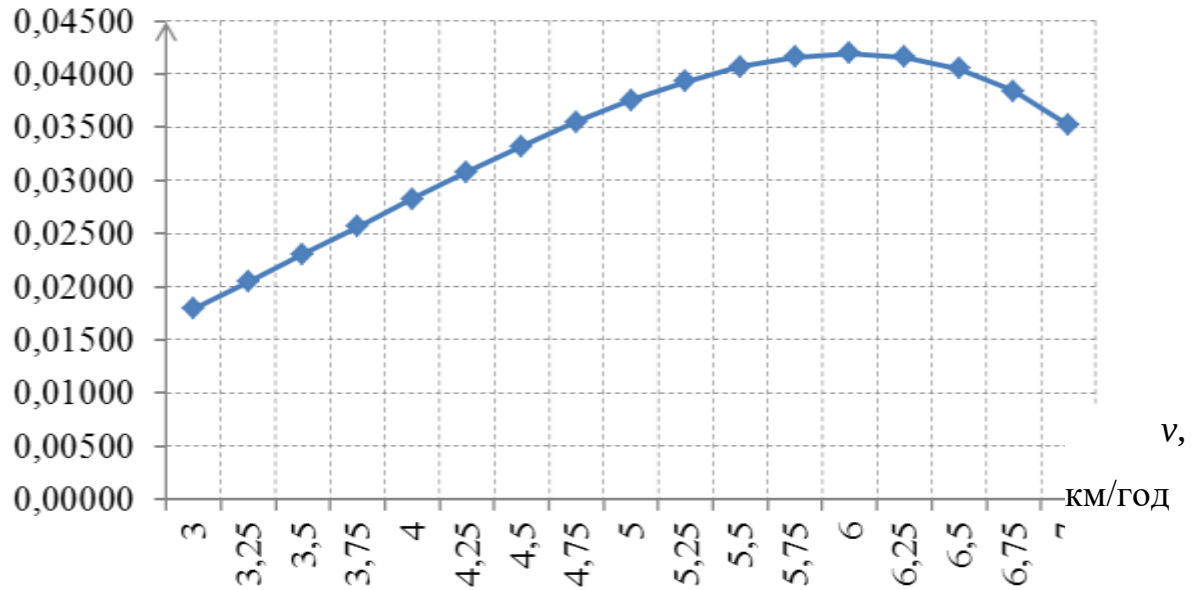


Рис. 4.2. Ефективність керування швидкістю руху тягової установки

Висновки до розділу.

Проаналізувавши графік на рис. 4.2, можна зазначити, що при швидкості переміщення тягового електровозу $v = 6$ км/год критерій результативності керування є оптимальним.

Аналіз даних, представлених у таблицях 4.2-4.3, виявив, що екстремум критерію ефективності використання технологічних ресурсів не збігається з мінімумами експлуатаційних втрат та витрат електроенергії.

Отриманий розподіл вказує на те, що критерії енергетичної та економічної результативності роботи тягових установок не завжди виявляються ефективнішими у порівнянні із критерієм використання ресурсів.

РОЗДІЛ 5

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Загальні вимоги безпеки до технологічного устаткування

Безпечність експлуатації виробничого обладнання – це характеристика, яка визначає його здатність відповідати вимогам з безпеки праці під час монтажу, експлуатації та демонтажу відповідно до встановлених нормативів. Загальні стандарти щодо безпеки виробничого обладнання встановлені у ГОСТ 12.2.003-91. Згідно з цим нормативним документом безпечність обладнання забезпечується: правильним вибором принципів дії, конструктивних схем та елементів конструкції; використанням засобів механізації, автоматизації та дистанційного управління; впровадженням засобів захисту; дотриманням ергономічних стандартів; включенням вимог щодо безпеки до технічної документації на монтаж, експлуатацію, ремонт, транспортування та зберігання обладнання; використанням безпечних та нешкідливих матеріалів у конструкції. Під час проектування обладнання необхідно враховувати умови його експлуатації, щоб забезпечити безпечність у разі впливу вологості, сонячної радіації, механічних коливань, високих та низьких тисків, температурних змін, агресивних речовин і т.д. Рухомі елементи обладнання, що можуть становити небезпеку, повинні бути обгороджені, за винятком тих, чиє обгородження заборонене у зв'язку з їх функціональним призначенням. Самовільне вмикання приводів робочих органів при відновленні подачі енергії слід уникати. Конструкція обладнання повинна забезпечувати захист людини від можливого ураження електричним струмом та має бути обладнана засобами сигналізації.

Для аварійного усунення небезпеки внаслідок шкідливих, отруйних, вибухонебезпечних та пожежонебезпечних речовин, обладнання повинно бути обладнане спеціальними пристроями. Під час експлуатації обладнання

важливо дотримуватися стандартів, що встановлені для уникнення забруднення навколишнього середовища шкідливими речовинами та уникнення ризику вибуху чи пожежі.

Вимоги щодо безпеки під час експлуатації кар'єрного транспорту повинні враховувати різноманітні фактори, такі як максимальні кути нахилу, стан доріг, інтенсивність руху транспорту та наявність тимчасових доріг. Особливо нестійкі дороги на відвалах можуть призводити до падіння транспортних засобів на ухилі. Порівнюючи безпеку застосування різних видів транспорту, таких як залізничний, автомобільний та конвеєрний, слід зазначити, що експлуатація залізничного транспорту, як правило, супроводжується найвищою частотою травматизму, у той час як конвеєрний транспорт вважається менш небезпечним. Безпека експлуатації залізничного транспорту залежить від різних факторів, таких як конструкційні особливості колії, технічний стан колії та дотримання габаритів в місцях наближення рухомого складу. Кожна ділянка колії повинна пройти оцінку і мати відповідний паспорт, а при введенні в експлуатацію перевірятися габарит наближення споруд за допомогою габаритної платформи, яка рухається із швидкістю 5 км/год.

На шахтному транспорті використовують спеціалізовані конвеєри, придатні для застосування у гірських умовах. За їхнім призначенням конвеєри розподіляються на вантажні, грузолодські та для перевезення людей. Виробки, призначені для встановлення стрічкових конвеєрів, повинні бути прямолінійними на всій довжині конвеєра. Щомісяця виробки слід очищати від вугілля, яке може випадати, або від породи та сторонніх предметів. Щоб уникнути травм, пов'язаних із обривом стрічки, особливо в похилих виробках із кутом нахилу понад 10 градусів, конвеєри обладнуються ловителями, у яких передбачено відключення приводу. Для конвеєрів із резинотросовими стрічками встановлюється контрольна апаратура, що дозволяє вчасно виявляти дефекти в тросовій основі та попереджувати

розрив стрічки. Реле швидкості встановлюються для відключення конвеєра при зниженні швидкості стрічки до 75% від номінальної величини через пробуксовку, що може викликати пожежу. Повторне включення конвеєра, якщо причина не усунута, неможливе через блокування. Натяжні та приводні станції конвеєра обгороджуються для запобігання травматизації. Заборонено виконання ремонту, змащення чи очищення конвеєра під час його роботи. У точці включення конвеєра слід встановити табличку "Не вмикати! Працюють люди!". В місцях перетину виробок і конвеєра встановлюють містки для переходу людей, обладнані поручнями. Висота проходу людей над містком повинна бути не менше 0,8 м, а ширина містка - 0,6 м. Усі конвеєрні установки оснащуються системами сигналізації, звуковий сигнал якої є чутним по всій довжині конвеєра. Тривалість сигналу становить 5 секунд, крім того, передбачено пристрій для відключення конвеєра з будь-якого місця.

Автоматизація системи конвеєрного транспорту передбачає встановлення засобів автоматичного контролю та захисту для кожного конвеєра, а також керування як окремими конвеєрами, так і взагалі лінією виробництва. Обладнання для автоматизації підземних конвеєрних систем повинно відповідати чинним "Правилам безпеки у вугільних сланцевих шахтах" і "Технічним вимогам до схем і обладнання автоматизації підземних конвеєрних ліній для вугільних і сланцевих шахт". Реалізація автоматизованого управління конвеєрними лініями повинна гарантувати високий рівень безпеки від іскристійкості. Конструкція обладнання повинна відповідати вимогам "Правил виготовлення вибухозахищеного та рудникового електрообладнання" (ПВВРЕ).

Щодо безпеки під час експлуатації підйомних установок, то на гірничодобувних підприємствах та при будівництві метрополітенів використовується велика кількість нахилених шахт для підняття корисної копалини і породи, а також для опускання і підняття різноманітних вантажів

та персоналу. Під час експлуатації таких виробок, де встановлено канатне обладнання, існує ризик виникнення небезпечних виробничих ситуацій, що можуть призвести до нещасних випадків. Основні потенційні небезпеки при канатному підйомі та опусканні людей і вантажів у вертикальних і нахилених виробках включають:

- Падіння грузопідйомних контейнерів у вертикальних або вільний спуск у нахилених виробках.
- Удари та гострі зупинки грузопідйомних контейнерів з людьми.
- Падіння виробок вантажів чи інших предметів.
- Падіння людей.

5.2 Захисне відключення

На бурових установках, які працюють в районах з кам'янистим ґрунтом, забезпечення захисту обслуговуючого персоналу від електроструму перед встановленням кондуктора (заземлювача) повинно здійснюватися за допомогою пристроїв захисного відключення. Після встановлення кондуктора (заземлювача) захист повинен забезпечуватися шляхом використання захисного відключення і заземлення.

У випадку ударно-канатного буріння на бурових установках важливо забезпечувати захист людей від електроструму за допомогою пристроїв захисного відключення.

У системах з ізольованою нейтраллю на бурових установках для колонкового буріння може застосовуватися автоматичне контролювання ізоляції з виведенням на вольтметри, а також світловою, звуковою або комбінованою сигналізацією, при цьому застосовується захисне заземлення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На основі отриманих результатів, які включають теоретичні та практичні висновки, була вирішена актуальна наукова задача щодо підвищення енергоефективності тягових установок із системами дискретного перемикання фаз за допомогою розробки нових керувальних алгоритмів та створення оптимальних систем автоматичного керування.

Результати досліджень, представлені у роботі, дозволяють зробити наступні висновки:

1. Аналіз використання двигунів постійного і змінного струму виявив їхні конструктивні недоліки та низьку енергоефективність при застосуванні в шахтних електровозах. У зв'язку з цим для підвищення ефективності тягових установок пропонується використання систем дискретного перемикання фаз, що дозволяє уникнути зазначених недоліків.

2. Огляд існуючих методів автоматичного керування швидкістю руху тягових установок з системами дискретного перемикання фаз показав, що використання оптимальних релейних регуляторів, які працюють в режимі ковзання, є перспективним напрямком для створення високоефективних систем керування.

3. Розроблені математичні моделі динаміки тягових установок для різних варіантів конструкції систем дискретного перемикання фаз дозволяють синтезувати оптимальні сигнали управління для цих установок.

4. Впровадження системи автоматичного керування швидкістю руху тягових установок із системами дискретного перемикання фаз, що базується на використанні властивостей функції перемикання для релейного регулювання струмів та швидкості, призвело до зменшення витрат електроенергії на 14,7% шляхом скорочення тривалості перехідних процесів на 13,4%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Синчук О.Н. Шахтный электровозный транспорт. Теория, конструкции, электрооборудование: учебник/ О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, В.Л. Дебелий, Л.Л. Дебелий; под ред. доктора технических наук, профессора О.Н. Синчука. – Кривой Рог- Донецк: ЧП Щербатых А.В., 2015 – 428 с.
2. Удовенко О.О. Енергозберігаюча система тягового електроприводу рудникового акумуляторного електровозу: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.03 “Електротехнічні комплекси та системи”/ О.О. Удовенко. – Харків, 2004. – 19 с.
3. Новые системы электропривода на синхронных электродвигателях [Электронный ресурс] : ООО «Орион–мотор» . — Режим доступа. : <http://www.orionmotor.narod.ru/rasvitie.htm>.
4. Pragasan P., Krishnan R. Modelling of Permanent Magnet Motor Drives/ P. Pragasan, R. Krishnan// IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 35, No. 4, November 1988.
5. Krøvel Ø. Design of Large Permanent Magnetized Synchronous Electric Machines/ Øystein Krøvel //Ph.D thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, pp 6-10, 14-15 Feb 2011
6. Kane D. M. and M. R. Warburton, "Integration of permanent magnet technology / D. M. Kane and M. R. Warburton//IEEE Power Engineering Society Summer Meeting: IEEE, 2002.
7. Dorr G. Trends and Developments of Electrical Machines in the 21st Century/ G. Dorr// in ICEM Bruges, Belgium: ICEM, 2002.
8. Шидловский А.К. Тиристорные преобразователи постоянного напряжения для низковольтного транспорта/ А.К. Шидловский, В.Б. Павлов. – Киев: Наукова думка, 1982.

9. Шрейнер Р.Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами/ Р.Т. Шрейнер, Ю.А. Дмитренко. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224 с.
10. McLean G.W. Performance and design of induction motors with square-wave excitation/ G.W. McLean, G.F. Nix, S.R. Alwash// IEE Proc, 1969, vol. 116, №8. — P.1405–1411.
11. Попович М.Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін. – К.: Либідь, 2005. – 680
12. Tavner, P. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines [Text] / P. Tavner, L. Ran, J. Penman, H. Sedding. – Institution of Engineering and Technology (IET), 2008. – 304 p.
13. Lutsenko, I. Optimal control of systems engineering. Development of a general structure of the technological conversion subsystem(part 2) [Text] / I. Lutsenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Vol. 1, Issue 2 (73). – P. 43–50.
14. Садовой А.В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами/ А.В. Садовой, Б.В. Сухинин, Ю.В. Сохина – Киев: ИСИМО, 1996. – 298 с.
15. Садовой А.В. Синтез и исследование оптимальных по точности систем управления электроприводами с низкой чувствительностью к широкому спектру дестабилизирующих факторов: – Дис. д-ра техн. наук. 05.09.03/ Садовой Александр Валентинович. – Днепродзержинск, 1992. – 501 с.
16. Зеленов А.Б. Применение метода аналитического конструирования регуляторов для синтеза оптимальной системы управления электроприводом/А.Б. Зеленов, В.И. Жилияков, А.В. Садовой.// Электричество, 1977, № 8. – С. 49–54.

17. Сурков В.В. Синтез агрегированных регуляторов методом А.А. Красовского по критерию обобщенной работы/ В.В. Сурков// Электрика. 2001, № 4. С. 25–32.
18. Певзнер О. Б. Схема замещения и точная круговая диаграмма синхронной реактивной машины/ О. Б. Певзнер // Электричество, 1960, № 2. С. 47—48.
19. Постников И. М. Синхронные реактивные двигатели/ И. М. Постников, В. В. Ралле. Киев, «Техніка», 1970. – 148 с.
20. Деев В.В. Тяга поездов/В.В. Деев, Г.А Ильин, Г.С. Афонин// Под. ред. В.В. Деева. – М. Транспорт, 1987, 264 с.
21. Савеленко І.В. Розробка та дослідження роботи системи автоматичного керування тяговим електроприводом / І.В. Савеленко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 42 (1151). – С. 76 – 79.
22. Закладний О.М. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник/ О.М. Закладний, А.В. Праховник, О.І. Соловей// К. Кондор, 2005. – 408 с.