

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**Підвищення якості керування акумуляторним електровозом за рахунок
встановлення системи підлеглого регулювання електроприводом**

Виконав: студент групи ЕЕМ-22ск

Гліб ВОРОНОВ

Керівник випускної роботи _____

д.т.н., проф. Олег СІНЧУК

Нормо контролер _____

д.т.н., проф. Олег СІНЧУК

Декан ЕТФ _____

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____

к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Рір 2025 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ВОРОНОВ Гліб Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Підвищення якості керування акумуляторним електровозом за
рахунок встановлення системи підлеглого регулювання електроприводом

1. Термін подання студентом роботи: 16 червня 2025 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є підвищення якості
керування акумуляторним електровозом. Завданням є встановлення системи
підлеглого регулювання електроприводом.
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Аналіз стану проблеми та основні підходи до моделювання тягових
комплексів; II. Математичне моделювання динамічних процесів в тяговому
комплексі; III. Оптимізація режимів гальмування тягового комплексу
електровоза.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень) I. Електровоз шахтний; II. Діаграми руху рудникового
електровозового складу; III. Модель тягової системи
електровоз - вагонетки; IV. Математична модель динаміки тягового
комплексу; V. Графіки перехідних процесів за швидкістю.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Олег СІНЧУК		
II	Олег СІНЧУК		
III	Олег СІНЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Загальні відомості про рудничні електровоз	17.05.25
2	Аналіз наукових досліджень	21.05.25
3	Класифікація методів моделювання	26.05.25
4	Формування та спрощення математичної моделі	31.05.25
5	Моделювання перехідних процесів	04.05.25
6	Дослідження оптимального часу гальмування	14.06.25

Дата видання завдання 12.05.2025 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Гліб ВОРОНОВ
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олег СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Підвищення якості керування акумуляторним електровозом за рахунок встановлення системи підлеглого регулювання електроприводом»

52 с., 17 рис., 10 літературних джерел

Мета дослідження – аналіз динамічних процесів у тяговому комплексі рудничний електровоз як електромеханічної системи та розробка методики оптимізації її роботи шляхом математичного моделювання.

Завдання дослідження:

- Аналіз існуючих наукових підходів до моделювання тягових електромеханічних комплексів.
- Розробка математичної моделі динаміки рудничного електровозосоставу.
- Дослідження впливу основних параметрів системи на її функціонування.

Оптимізація керування електровозосоставом для підвищення енергоефективності та продуктивності.

Формулювання практичних рекомендацій щодо покращення експлуатаційних характеристик тягового комплексу.

Предмет дослідження – динамічні процеси, що виникають у системі рудничний електровоз в процесі її функціонування та управління.

Результати дипломної роботи можуть знайти застосування при проектуванні та модернізації рудничних електровоз, а також у розробці інтелектуальних систем керування, що дозволять мінімізувати втрати енергії та підвищити стабільність руху. Таким чином, дана робота спрямована на вирішення актуальних задач гірничотранспортної галузі шляхом

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-03	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використання сучасних методів аналізу та оптимізації динамічних процесів у тягових електромеханічних комплексах.

Ключові слова: ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ, ТЯГОВИЙ КОМПЛЕКС, РУДНИЧНИЙ ЕЛЕКТРОВОЗ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-03	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1. Аналіз стану проблеми та основні підходи до моделювання тягових комплексів.....	9
1.1. Загальні відомості про рудничні електровоз.....	9
1.2. Аналіз наукових досліджень з моделювання динамічних процесів	11
1.3. Класифікація методів моделювання електромеханічних систем.....	14
Висновок до розділу.....	18
Розділ 2. Математичне моделювання динамічних процесів в тяговому комплексі.....	19
2.1. Формування та спрощення математичної моделі динаміки тягового комплексу.....	19
2.2. Моделювання перехідних процесів в тяговому електроприводі при пуску та гальмуванні.....	26
Висновки до розділу	42
Розділ 3. Оптимізація режимів гальмування тягового комплексу електровоза	43
3.1. Дослідження оптимального часу гальмування тягового електпривода рудничного електровоза.....	43
Висновки до розділу	48
Висновки	49
Список використаних джерел	51

Вступ

У сучасних умовах підвищення ефективності транспортних систем у гірничодобувній галузі є однією з пріоритетних задач. Особливої уваги заслуговує вдосконалення рудничних електровозосоставів, що включають електровоз та вагонетки, оскільки вони відіграють ключову роль у транспортуванні гірничої маси. Забезпечення енергоефективності, підвищення продуктивності та зменшення експлуатаційних витрат можливе завдяки глибокому аналізу динамічних процесів у даних тягових комплексах. У зв'язку з цим важливим інструментом дослідження стає математичне моделювання, що дозволяє детально аналізувати поведінку системи та знаходити оптимальні режими її роботи.

Актуальність дослідження обумовлена тим, що рудничний електровозосостав є складною електромеханічною системою, що включає у себе як електричні, так і механічні компоненти, що взаємодіють між собою. Взаємозв'язок між складовими системи (електровозом, вагонетками, системою керування та рейковою колією) обумовлює необхідність комплексного підходу до аналізу перехідних процесів, а також пошуку оптимальних рішень для підвищення ефективності роботи. Відомо, що динаміка руху електровозосоставу визначається не лише параметрами електроприводу, але й фізико-механічними характеристиками навантаження, умовами контакту коліс з рейками, а також алгоритмами керування. Врахування всіх цих факторів потребує застосування методів системного аналізу та математичного моделювання.

Попередні дослідження у цій галузі показали, що класичні аналітичні методи вирішення рівнянь руху тягових комплексів (наприклад, методи варіаційного числення, принцип максимуму Понтрягіна, метод динамічного програмування Беллмана) мають обмежене застосування через складність

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-03	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обліку всіх впливових факторів. Аналіз роботи В. С. Еліса та інших дослідників засвідчив, що застосування лінійних диференціальних рівнянь для опису динаміки рудничного електровозосоставу призводить до значних спрощень, які не дозволяють точно відтворювати реальні умови експлуатації. Таким чином, єдиним ефективним підходом для аналізу перехідних процесів є методи математичного моделювання, що дозволяють враховувати нелінійні характеристики системи та широкий спектр взаємодіючих параметрів.

Метою даної роботи є дослідження динамічних процесів у тяговому комплексі «рудничний електровоз – вагонетки» як електромеханічної системи та розробка методики оптимізації її роботи шляхом математичного моделювання. Основним завданням є розробка моделі, що дозволить аналізувати взаємодію складових комплексу та визначати оптимальні параметри для підвищення енергоефективності, продуктивності та надійності експлуатації.

Результати дослідження можуть знайти застосування при проектуванні та модернізації рудничних електровозосоставів, а також у розробці інтелектуальних систем керування, що дозволять мінімізувати втрати енергії та підвищити стабільність руху. Таким чином, дана робота спрямована на вирішення актуальних задач гірничотранспортної галузі шляхом використання сучасних методів аналізу та оптимізації динамічних процесів у тягових електромеханічних комплексах.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-03	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Аналіз стану проблеми та основні підходи до моделювання тягових комплексів

1.1. Загальні відомості про рудничні електровози

Рудничні електровозні склади є спеціалізованими транспортними засобами, призначеними для транспортування корисних копалин, породи, шахтного обладнання та персоналу в умовах підземних гірничих виробок. Їхня експлуатація є критично важливою для забезпечення безперервного технологічного процесу видобутку корисних копалин. Вони характеризуються роботою в умовах підвищеної вологості, пилу, обмежених габаритів і потенційно вибухонебезпечного середовища.



Рис 1.1 –Електровоз шахтний (рудничний) К-14

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-03			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 1	Лім.	Лист	Листів
Розробив		Воронов Г.А.					9	15
Перевірів		Сінчук О.М.						
Реценз.								
Н. Контр.		Сінчук О.М.						
Затвердив		Пересунько І.І.				КНУ ЕЕМ-22ск		

Конструктивно рудничні електровози поділяються на акумуляторні, контактні та комбіновані. Акумуляторні моделі забезпечують автономність роботи у вибухонебезпечних умовах, тоді як контактні електровози мають вищу енергоефективність за умови наявності відповідної інфраструктури. Комбіновані електровози поєднують переваги обох систем, що робить їх універсальними для різних шахтних умов.

До основних компонентів рудничного електровоза відносяться:

Тягові електродвигуни, що забезпечують рух та управління швидкістю.

Система живлення, включаючи акумулятори або контактну мережу.

Механічна частина – ходова частина, рама, гальмівні механізми.

Система керування, що дозволяє оператору регулювати рух і забезпечує безпеку експлуатації.

Розвиток рудничних електровозів спрямований на підвищення їхньої енергоефективності, впровадження рекуперативного гальмування, дистанційне керування та автоматизацію процесів. Впровадження нових технологій сприятиме зниженню експлуатаційних витрат, підвищенню безпеки та продуктивності шахтного транспорту.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-01	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Аналіз наукових досліджень з моделювання динамічних процесів

Моделювання динамічних процесів є фундаментальним інструментом для розуміння та прогнозування поведінки складних систем у різних галузях науки та техніки. Сучасні наукові дослідження в цій сфері охоплюють широкий спектр підходів, що варіюються від класичних аналітичних методів до чисельного моделювання та застосування комп'ютерних симуляцій. Основна мета таких досліджень полягає у створенні математичних моделей, здатних точно відобразити динаміку системи, її стабільність, нелінійні ефекти та реакцію на зовнішні впливи.

Одним із важливих напрямків є розробка моделей, які враховують нелінійність і розподілені параметри систем. Це дозволяє описати процеси, що характеризуються швидкою зміною станів або виникненням хаотичних коливань. Наприклад, моделювання електромеханічних систем, таких як тягові електроприводи або системи управління електродвигунами, потребує врахування як електричних, так і механічних властивостей об'єкта. У даних дослідженнях широко використовуються системи диференціальних рівнянь, що описують зв'язок між струмовими характеристиками, магнітним потоком та механічними параметрами обертання. Застосування методів імітаційного моделювання за допомогою потужних програмних пакетів (наприклад, Matlab/Simulink) дозволяє проводити «віртуальні» експерименти, оцінювати ефективність різних схем керування та прогнозувати поведінку системи в реальних умовах.

Особливу увагу приділено аналізу стійкості динамічних систем. Сучасні дослідники застосовують як класичні методи аналізу, такі як розв'язання характеристичних рівнянь та побудова фазових портретів, так і сучасні чисельні алгоритми, що дозволяють врахувати вплив затримок, зовнішніх перешкод та нелінійних ефектів. Використання адаптивних та

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-01	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

робастних алгоритмів управління, зокрема, ПД-регуляторів та їх модифікацій, дозволяє оптимізувати процеси регулювання навіть за наявності значних параметричних невизначеностей. Такий підхід сприяє підвищенню ефективності систем управління, що є особливо актуальним у галузях енергозбереження та транспортного забезпечення.

У контексті досліджень із моделювання динамічних процесів слід зазначити і важливість міждисциплінарного підходу. Сучасні системи стають все більш складними, що зумовлює необхідність інтеграції знань із математики, фізики, інформатики та інженерних дисциплін. Наприклад, моделювання електроприводів включає врахування як електромагнітних процесів, так і механіки руху транспортних засобів, а також аспектів енергетичного менеджменту. Така синтезація дозволяє створювати комплексні моделі, здатні враховувати різні аспекти роботи системи та передбачати її поведінку у змінних умовах експлуатації.

Ключовим викликом, що постає перед дослідниками, є проблема точності відтворення реальних умов роботи систем при використанні спрощених математичних моделей. З одного боку, аналітичні моделі дозволяють отримати загальне уявлення про процес, але часто не враховують усіх факторів, що впливають на систему. З іншого боку, чисельне моделювання забезпечує високий рівень деталізації, але вимагає значних обчислювальних ресурсів і може бути схильним до накопичення похибок. У зв'язку з цим, актуальними є дослідження, спрямовані на оптимізацію алгоритмів моделювання, розробку ефективних методів валідації та перевірки моделей за допомогою експериментальних даних.

Особливу увагу приділяють дослідженням у сфері моделювання систем із затримкою, які широко використовуються у промислових процесах та управлінні транспортними системами. Запізнювання сигналів або відгуків об'єктів управління може суттєво впливати на стабільність системи, тому

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-01	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розробка робастних алгоритмів, що враховують цей фактор, є надзвичайно важливою. Застосування прогнозуючих методів управління та адаптивних алгоритмів дозволяє мінімізувати негативний вплив затримок, що сприяє підвищенню безпеки та ефективності експлуатації складних технічних систем.

У підсумку, аналіз сучасних наукових досліджень у галузі моделювання динамічних процесів свідчить про активну інтеграцію теоретичних підходів із практичними експериментальними дослідженнями. Розроблені моделі сприяють не лише поглибленню розуміння внутрішніх механізмів функціонування складних систем, але й забезпечують основу для створення новітніх технологічних рішень, спрямованих на оптимізацію роботи систем управління. Подальші дослідження в цьому напрямку повинні зосередитися на удосконаленні методів чисельного моделювання, підвищенні точності моделювання нелінійних ефектів та розробці інтегрованих систем управління, здатних адаптуватися до змінних умов експлуатації.

Таким чином, сучасний стан досліджень у сфері моделювання динамічних процесів є багатограним та перспективним, відкриваючи широкі можливості для інноваційних розробок як у науковій, так і в практичній площинах застосування.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-01	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3. Класифікація методів моделювання електромеханічних систем

1. Аналітичні методи

Аналітичні методи ґрунтуються на застосуванні строго математичних підходів, що дозволяють виводити закриті розв'язки диференціальних рівнянь, які описують динаміку електромеханічної системи. До таких методів відносять:

Розв'язання диференціальних рівнянь

Математичне моделювання електромеханічних систем зазвичай починається з формулювання системи рівнянь, що описують взаємодію електричних, магнітних та механічних величин. За допомогою аналітичних методів (наприклад, методу змінних розділення, перетворення Лапласа) отримуються точні формули, які дозволяють описати перехідні процеси, сталі стани та коливальні режими роботи.

Лінійаризація нелінійних моделей

Багато електромеханічних систем є нелінійними за своєю природою. Для спрощення аналізу застосовують методи лінійаризації, що дозволяють розглядати систему в околі робочої точки. Цей підхід є корисним для дослідження стабільності системи та визначення її частотних характеристик.

Аналітичні методи дозволяють отримати глибоке розуміння внутрішніх механізмів роботи системи, однак їх застосування обмежується моделями з відносно простими структурами та малими нелінійностями.

2. Чисельні методи

Чисельні методи моделювання є незамінними у випадках, коли аналітичні розв'язки недоступні або надто громіздкі для отримання. Серед основних чисельних підходів виділяють:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-01	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Методи інтегрування диференціальних рівнянь

Для опису динаміки електромеханічних систем широко використовуються чисельні алгоритми інтегрування звичайних диференціальних рівнянь, зокрема метод Рунге–Кутта, метод Ейлера та їх модифікації. Ці методи дозволяють моделювати поведінку системи з високою точністю, враховуючи нелінійні ефекти та змінні параметри.

Методи скінченних різниць та елементів

При моделюванні розподілених параметричних систем, таких як системи теплообміну або розподілені електромагнітні процеси, застосовують методи скінченних різниць або скінченних елементів. Ці методи дозволяють розбити систему на дрібні елементи, для яких обчислюють локальні значення фізичних величин, що потім інтегруються для отримання загальної картини роботи системи.

Чисельні методи є потужним інструментом для моделювання складних електромеханічних систем, оскільки вони забезпечують гнучкість і можуть бути адаптовані до широкого спектру умов, включаючи вплив зовнішніх перешкод та змінні параметри моделі.

3. Імітаційне моделювання

Імітаційне моделювання – це підхід, який базується на створенні комп’ютерних моделей, що відтворюють поведінку електромеханічних систем у віртуальному середовищі. Основними характеристиками цього методу є:

Використання спеціалізованих програмних пакетів

Пакети типу Matlab/Simulink, PSpice, ANSYS тощо дозволяють швидко і ефективно створювати моделі електроприводів, електродвигунів, систем зворотного зв’язку та інших компонентів. Завдяки модульній структурі цієї програмної платформи дослідники можуть легко інтегрувати різні підсистеми

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-01	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та проводити «віртуальні» експерименти з моделлю, що дозволяє виявляти оптимальні режими роботи та оцінювати вплив змінних параметрів.

Проведення експериментальних симуляцій

Імітаційне моделювання дозволяє дослідити динаміку системи у режимах, що важко або неможливо відтворити в лабораторних умовах. Наприклад, зміна параметрів енергозабезпечення, варіювання навантаження або аналіз режимів роботи при виникненні аварійних ситуацій.

Аналіз перехідних процесів та стабільності

За допомогою імітаційних методів можна отримати детальні осцилограми, аналізувати час встановлення режиму, визначати критичні точки стабільності та проводити аналіз стійкості системи.

Імітаційне моделювання забезпечує високий рівень гнучкості і дозволяє адаптувати модель до реальних умов експлуатації, проте вимагає значних обчислювальних ресурсів та ретельної валідації отриманих результатів.

4. Гібридні методи

Гібридні методи являють собою інтеграцію аналітичних, чисельних та імітаційних підходів з метою використання переваг кожного з них. До гібридних методів відносять:

Комбіноване моделювання

У цьому підході частини системи, що мають просту структуру, моделюються аналітично, а більш складні блоки – чисельно або за допомогою симуляційних моделей. Такий підхід дозволяє знизити обчислювальні витрати та підвищити точність моделі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-01	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інтеграція експериментальних даних

Гібридні методи часто використовують результати лабораторних досліджень для коригування параметрів моделі. Це забезпечує більшу реалістичність моделювання та дозволяє врахувати вплив факторів, які важко формалізувати математично.

Адаптивне моделювання

У цьому методі модель постійно коригується в режимі реального часу на основі вхідних даних. Адаптивне моделювання дозволяє ефективно реагувати на зміну умов експлуатації та підвищує надійність системи управління.

Гібридні методи сприяють досягненню високої точності та стабільності при моделюванні складних електромеханічних систем, дозволяючи поєднувати аналітичні закономірності з практичною перевіркою даних.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-01	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок до розділу

Рудничні електровози є ключовими для безперервного видобутку корисних копалин. Впровадження сучасних технологій – автоматизації, дистанційного керування та оптимізації електромеханічних систем – сприяє підвищенню їх енергоефективності, безпеки та продуктивності. Застосування гібридних методів моделювання дозволяє точно відобразити динаміку систем та оптимізувати процеси управління, що є перспективним напрямком подальших досліджень.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-01	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2. Математичне моделювання динамічних процесів в тяговому комплексі

2.1. Формування та спрощення математичної моделі динаміки тягового комплексу

Процеси, що відбуваються в системі тягового електротехнічного комплексу контактної-аккумуляторного електровоза в автономному режимі функціонування за імпульсного регулювання напруги живлення тягових двигунів, описуються системою нелінійних диференціальних рівнянь. Для спрощення аналізу прийняті такі обмеження:

- транзистори та інші елементи в IGBT-перетворювачі з ШІМ мають ідеальні характеристики (пряме падіння напруги та зворотний струм дорівнюють нулю);
- величина перехідних втрат напруги в перетворювачі є сталою;
- рівні напруги джерела живлення, магнітного потоку та швидкості електродвигуна залишаються сталими протягом одного періоду перемикавання перетворювача, який значно менший за постійні часу T_o , T_s , T_m , є постійними сталим
- перетворювач працює в ключовому режимі з достатньо високою частотою комутації, що забезпечує неперервний характер струму в колі електродвигуна [10].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-03		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 2		
Розробив	Белан П.О.						
Перевірів	Сінчук О.М.						
Реценз.							
Н. Контр.	Сінчук О.М.						
Затвердив	Пересунько І.І.				КНУ ЕЕМ-22ск		
					Літ.	Лист	Листів
						19	24

З урахуванням цих припущень та рекомендацій [10] рівняння динаміки системи набувають такого вигляду:

$$\frac{m_1 \cdot m_2}{C} \frac{d^3 V_1}{dt^3} + (m_1 + m_2) \frac{dV_1}{dt} = F - F_c + \frac{m_2}{C} \frac{d^2 F_1}{dt^2}; \quad (2.1)$$

$$\frac{m_1 \cdot m_2}{C} \frac{d^3 V_2}{dt^3} + (m_1 + m_2) \frac{dV_2}{dt} = F - F_c + \frac{m_1}{C} \frac{d^2 F_1}{dt^2}; \quad (2.2)$$

де m_1, m_2 – відповідно маса електровоза (з урахуванням приведених мас електродвигунів) та маса складу;

C – коефіцієнт жорсткості сцепки;

V_1, V_2 – лінійні швидкості мас m_1 и m_2

F – тягове зусилля, прикладене до маси m_1 ;

F_c – сила статистичного опору, що діє на масу m_2

При пуску та гальмуванні складу можна прийняти $F = const, F_c = const$,

тоді рівняння (2.1) і (2.2) спрощуються:

$$\frac{m_1 \cdot m_2}{C} \frac{d^3 V_1}{dt^3} + (m_1 + m_2) \frac{dV_1}{dt} = F - F_c; \quad (2.3)$$

$$\frac{m_1 \cdot m_2}{C} \frac{d^3 V_2}{dt^3} + (m_1 + m_2) \frac{dV_2}{dt} = F - F_c. \quad (2.4)$$

Пружну деформацію зчїпки можна виразити:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 \cdot x = \frac{1}{m_1} \cdot F + \frac{1}{m_2} \cdot F_c; \quad (2.5)$$

де $\omega = \sqrt{\frac{C \cdot (m_1 + m_2)}{m_1 \cdot m_2}}$ - кутова частота власних коливань системи;

$x = x_1 - x_2$ - різниця лінійних переміщень крайніх перерізів зчипки.

Враховуючи, що $l / \omega = T$, $\frac{F - F_c}{m_1 + m_2} = a_{cp}$ (середнє прискорення під час пуску, що дорівнює розрахунковій величині для абсолютно жорстких елементів системи), розв'язання рівнянь (2.3) і (2.4) запишуться у вигляді:

$$V_1 = A_1 + A_2 \cdot \sin \omega \cdot t + A_3 \cdot \cos \omega \cdot t + a_{cp} \cdot t; \quad (2.6)$$

$$V_2 = B_1 + B_2 \cdot \sin \omega \cdot t + B_3 \cdot \cos \omega \cdot t + a_{cp} \cdot t; \quad (2.7)$$

де $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ - коефіцієнти.

У загальному випадку початкові умови будуть відрізнятися від нульових:

$$V_1 = V_{10}, V_2 = V_{20}, \frac{dV_{10}}{dt} = a_{10}, \frac{dV_{20}}{dt} = a_{20}.$$

Тоді (2.6) і (2.7) буде мати вигляд:

$$V_1 = \sqrt{(a_{10} - a_{cp})^2 \cdot T^2 + (V_{10} - V_{20})^2 \cdot \frac{m_2}{m_1 + m_2}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_1) + V_{10} - \frac{V_{10} - V_{20}}{T_1^2} \cdot T^2 + a_{cp} \cdot t;$$

$$V_2 = \sqrt{(a_{10} - a_{cp})^2 \cdot T^2 + (V_{10} - V_{20})^2 \cdot \frac{m_2}{m_1 + m_2}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_2) + V_{20} - \frac{V_{10} - V_{20}}{T_2^2} \cdot T^2 + a_{cp} \cdot t;$$

де $\psi_1 = \arctg \frac{V_{10} - V_{20}}{a_{10} - a_{cp}} \cdot \frac{T}{T_1^2}; T_1 = \sqrt{\frac{m_1}{C}} = \frac{l}{\omega_1};$

$$\psi_2 = \arctg \frac{V_{10} - V_{20}}{a_{10} - a_{cp}} \cdot \frac{T}{T_2^2}; T_2 = \sqrt{\frac{m_1}{C}} = \frac{l}{\omega_2}.$$

Деформація в пружних елементах розглянутої системи описується виразом:

$$x = \sqrt{\left(\frac{dx_0}{dt} \cdot T\right)^2 + (x_0 - x_{yem})^2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi) + x_{yem}; \quad (2.8)$$

де x_0 – початкове значення деформації;

$$x_{yem} = x_{cp} = \left(\frac{F}{m_1} + \frac{F_e}{m_2} \right) \cdot T^2 \quad - \text{стале (середнє) значення деформації}$$

$$\psi = \arctg \frac{x_0 - x_{yem}}{\frac{dx_0}{dt} \cdot T};$$

У момент рушання електровозоскладу, за наявності зазору пружні деформації зчипки опишуться рівнянням:

$$T_1 \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + x = T_1 \cdot \frac{F_{II}}{m_1} = \frac{F_{II}}{C}; \quad (2.9)$$

де F_{II} – пускове тягове зусилля електровоза;

Загальний вигляд рішення (2.9) буде:

$$x = A' \cdot \sin \omega_1 \cdot t + B' \cdot \cos \omega_1 \cdot t + \frac{F_{II}}{C}. \quad (2.10)$$

У момент часу $t = 0$ швидкість руху маси m_1 і деформації дорівнюють нулю, тоді з урахуванням значень коефіцієнтів рівняння (2.10) набуде вигляду:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

$$x = \frac{F_{II}}{C} \cdot (1 + \cos \omega_1 \cdot t). \quad (2.11)$$

Деформація зчіпки під час руху обох мас з урахуванням, що $x_0 = x_c = x_{уст}$ виразиться:

$$x = \frac{x_c}{1 + \kappa_m} \cdot \left(\sqrt{\lambda_{II}^2 + \kappa_m} \cdot 2 \cdot (\lambda_{II} - 1) \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi) + (\lambda_{II} + \kappa_m) \right); \quad (2.12)$$

$$\text{де } x_c = \frac{F_c}{C}; \lambda_{II} = \frac{F_{II}}{F_c}; \kappa_m = \frac{m_1}{m_2}.$$

Наприклад, при значеннях $\omega \cdot t + \psi = \frac{\pi}{2}$, $\lambda_{II} = 2$, $\kappa_m \approx 0$ отримаємо $x_{max} = 4 \cdot x_c$. Таким чином, за вказаних умов динамічна деформація в 4 рази перевищує статистичну, тому чим більша маса m_1 відносно маси m_2 , тим кращі умови пуску. Найгірші умови для пуску електропривода матимуть місце за наявності жорсткого (без зазорів) зв'язку між вагонами у складі.

З огляду на зазначені вище обмеження, загальну структуру розглянутої системи електропривода може бути представлено схемою, зображеною на рис. 2.1, а.

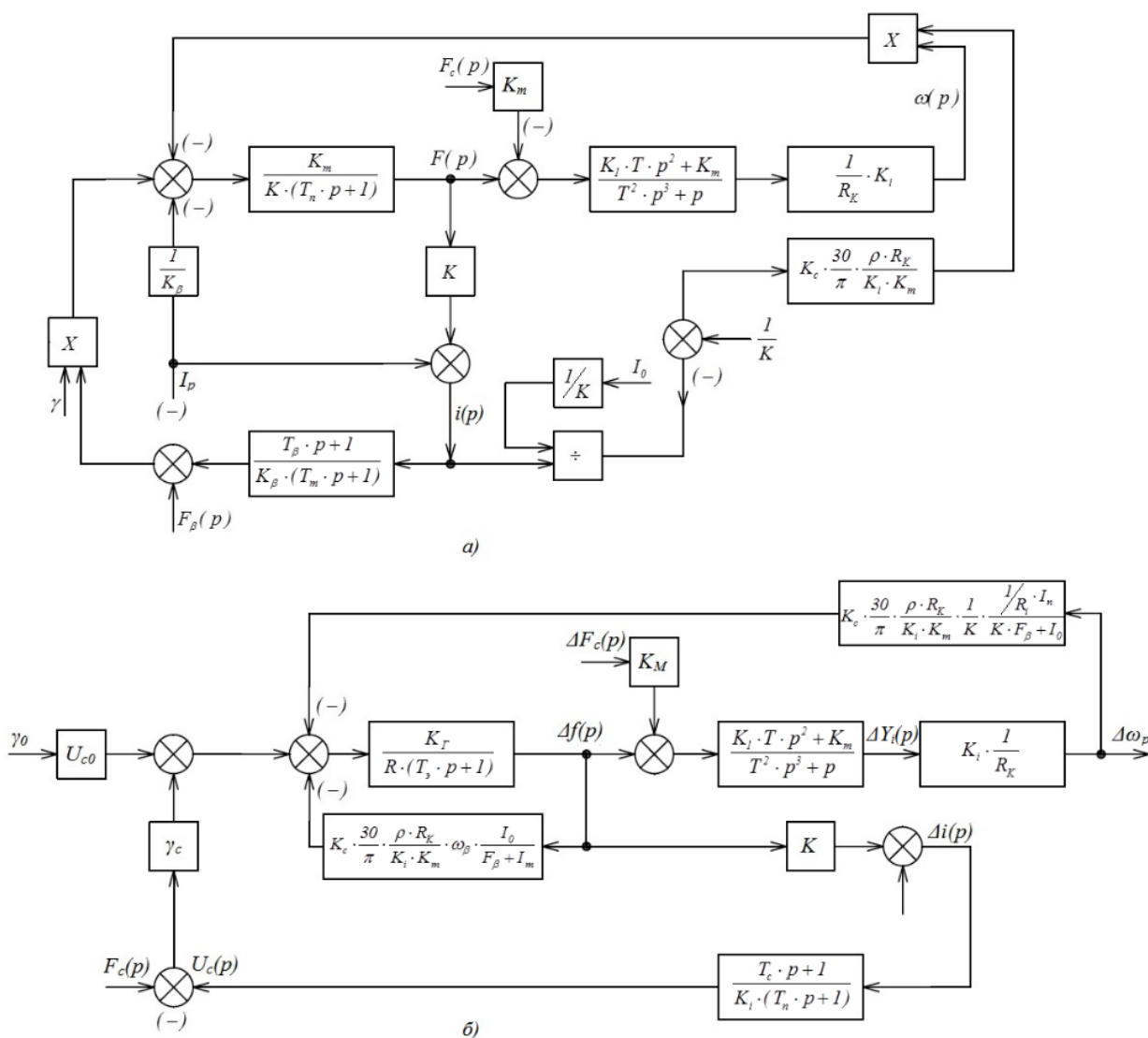


Рис. 2.1. Варіанти структур систем тягового електричного приводу

Отримана структура характеризується жорстким параметричним зв'язком за керувальним параметром γ і наявністю істотних нелінійностей.

Під час розгляду цієї структури в умовах малих відхилень вхідних параметрів видається можливим одержати лінійний аналог моделі моделі системи тягового електроприводу рудничного контактено-акумуляторного електровоза, структуру якого показано на рис. 2.1, б. Передавальні функції системи відповідно за керувальним $W_{\Delta\gamma}(p)$ і збурювальним $W_{\Delta FB}(p)$ впливами матимуть вигляд:

$$W_{\Delta r}(p) = \frac{b_4 \cdot p^4 + b_3 \cdot p^3 + b_2 \cdot p^2 + b_1 \cdot p}{a_5 \cdot p^5 + a_4 \cdot p^4 + a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0}; \quad (3.13)$$

$$W_{\Delta FB}(p) = \frac{c_3 \cdot p^3 + c_2 \cdot p^2 + c_1 \cdot p + c_0}{a_5 \cdot p^5 + a_4 \cdot p^4 + a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0}; \quad (3.14)$$

$$\text{де} \quad b_4 = \kappa \cdot \kappa_D \cdot u_{EO} \cdot R_E \cdot T_{II} \cdot T^2; \quad b_3 = \kappa \cdot \kappa_3 \cdot u_{EO} \cdot R_x \cdot T^2$$

$$b_2 = \kappa \cdot \kappa_3 \cdot u_{EO} \cdot R_x \cdot T_{II};$$

$$b_1 = \kappa \cdot \kappa_3 \cdot u_{EO} \cdot R_x; \quad a_5 = \kappa \cdot R_x \cdot T_3 \cdot T_{II} \cdot T^2;$$

$$a_4 = \kappa \cdot R_x \cdot (T_3 \cdot T^2 + T_{II} \cdot T^2) + \kappa_3 \cdot C_e \cdot R_x \cdot T_{II} \cdot T^2 + \frac{\kappa}{\kappa_E} \cdot \lambda_0 \cdot \kappa_3 \cdot R_x \cdot T_E \cdot T^2;$$

$$a_3 = \kappa \cdot R_x \cdot (T_3 \cdot T_{II} + T^2) + \kappa_3 \cdot C_e \cdot R_x \cdot T^2 + \frac{\kappa}{\kappa_E} \cdot \gamma_0 \cdot \kappa_3 \cdot R_x \cdot T^2 + C_e \cdot \kappa_i \cdot \kappa_3 \cdot \kappa_I \cdot T \cdot T_{II};$$

$$a_2 = \kappa \cdot R_x \cdot (T_3 + T_{II}) + \kappa_3 \cdot C_e \cdot R_x \cdot T_{II} + \frac{\kappa}{\kappa_E} \cdot \gamma_0 \cdot \kappa_3 \cdot R_x \cdot T_E + C_e \cdot \kappa_i \cdot \kappa_3 \cdot \kappa_I;$$

$$a_1 = \kappa \cdot R_x + \kappa_3 \cdot C_e \cdot R_x + \frac{\kappa}{\kappa_E} \cdot \gamma_0 \cdot \kappa_3 \cdot R_x + C_e \cdot \kappa_i \cdot \kappa_3 \cdot \kappa_m \cdot T_{II}; \quad a_0 = C_e \cdot \kappa_i \cdot \kappa_3 \cdot \kappa_m;$$

$$c_3 = \kappa \cdot C_e \cdot \kappa_m \cdot \kappa_i \cdot \kappa_3 \cdot \kappa_I \cdot T \cdot T_{II}; \quad c_2 = \kappa \cdot C_e \cdot \kappa_m \cdot \kappa_i \cdot \kappa_3 \cdot \kappa_I \cdot T;$$

$$c_1 = \kappa \cdot C_e \cdot \kappa_m \cdot \kappa_i \cdot \kappa_I \cdot \kappa_m \cdot T_{II}; \quad c_0 = \kappa \cdot C_e \cdot \kappa_m \cdot \kappa_i \cdot \kappa_I \cdot \kappa_m.$$

Розроблені моделі дають змогу виконати аналіз систем приводів рудничних контактнo-акумуляторних електровозів з метою пошуку та реалізації оптимальних режимів їхнього функціонування.

2.2. Моделювання перехідних процесів в тяговому електроприводі при пуску та гальмуванні

При вантажно-розвантажувальних операціях тяговому електроприводі рудничний електровоз працює в пуско-гальмівних режимах. При цьому реалістичною для розроблення алгоритму управління ТЕТК є трикутна, а не трапецеїдальна форма графіків руху (рис. 2.2).

Ґрунтуючись на результатах експериментальних дослідженнях врахуємо, що прискорення руху під час рушання електровозов не має перевищувати 1 м/с^2 . В іншому разі спостерігатиметься буксування ведучих коліс електровоза і, природно одіозні перехідні процеси в тяговому електроприводі із втратою контролю керованості цим процесом з боку СУ.

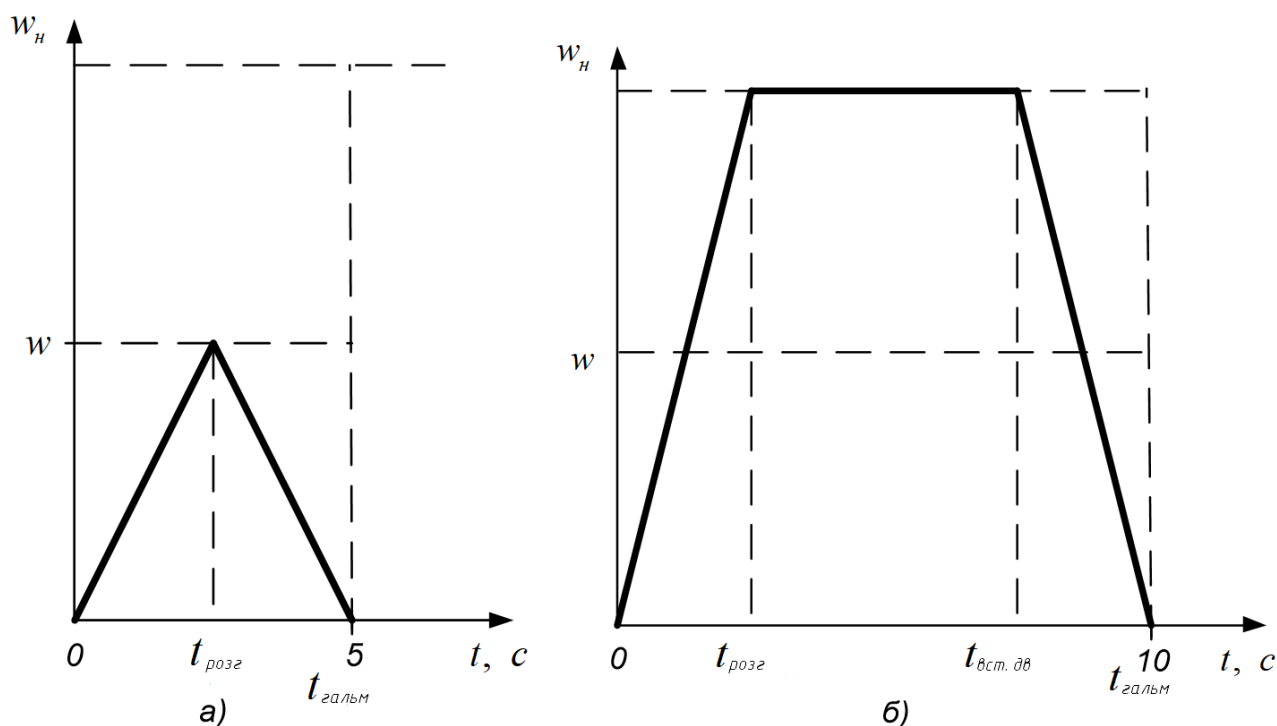


Рис 2.2 – Діаграми руху рудникового електровозового складу під час навантаження-розвантаження (орти-заїзди, перекидання) (а) і під час руху головними відкочувальними виробками (квершлагами) (б)

У загальному випадку механічна частина являє собою систему пов'язаних мас, що рухаються з різними швидкостями обертально або поступально. Під час зміни навантаження елементи системи (вали, опори, клиноремінні передачі, зубчасті зачеплення тощо) деформуються, оскільки механічні зв'язки не є абсолютно жорсткими. Вхідний вал механізму приводиться в обертання зі швидкістю ω_1 електромагнітним моментом M , що виникає на роторі двигуна.

Дослідження динаміки показують, що в більшості практичних випадків реальні механізми можна звести до розрахункових схем із трьома масами, двома масами й однією масою [2,3,6].

Параметрами узагальненої трьох масової механічної системи (рис. 2.4) є сумарні наведені моменти інерції мас J_1 , J_2 і J_3 та еквівалентні наведені жорсткості механічних пружних зв'язків C_{12} і C_{23} . Параметрами узагальненої трьох масової механічної системи (рис. 3.4) є сумарні наведені моменти інерції мас J_1 , J_2 і J_3 та еквівалентні наведені жорсткості механічних пружних зв'язків C_{12} і C_{23} .

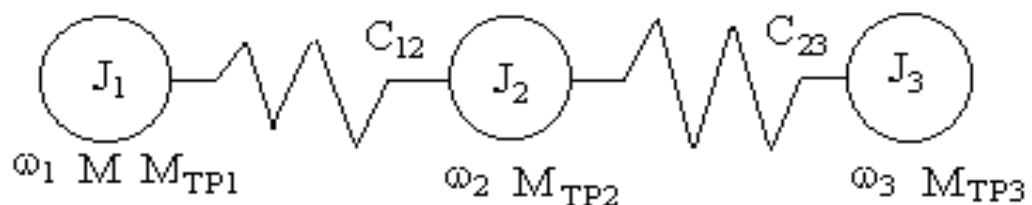


Рис. 2.4. Тримасова модель тягової системи:

електровоз - вагонетки

Тут $C_{ik} = d M_i / d j k$ - коефіцієнт пружності або жорсткість пружних зв'язків.

Сумарний коефіцієнт пружності послідовно з'єднаних пружних елементів визначається за формулою:

$$\frac{1}{C_{\Sigma}} = \sum_i^n \frac{1}{C}$$

Перша маса являє собою ротор двигуна і жорстко з ним пов'язаний з ним електровоз. До цієї маси прикладено електромагнітний момент двигуна M і момент статичного навантаження M_{c1} , який зазвичай є сумарним моментом втрат на валу двигуна і жорстко пов'язаних із ним елементах. До проміжної маси механізму прикладений момент опору M_{c2} з моментом інерції завантаженої частини вагонеток. До третьої маси прикладений момент зовнішнього навантаження M_{c3} із сумарним моментом інерції порожніх вагонеток.

Трьох масова модель під час дослідження електромеханічних систем використовується в тих випадках, коли виникає необхідність детальнішого аналізу умови руху мас механізму. Для розв'язання задачі при цьому зазвичай використовують математичне моделювання на персональних електронно-обчислювальних машинах, оскільки аналітичне розв'язання виходить вельми громіздким.

Двомасова модель, спрощено представлена на рис. 2.5, найзручніша для вивчення впливу пружності механічних зв'язків на поведінку ТЕМС і в цьому випадку для нас буде основною. При цьому можна вважати, що перша маса складається із суми мас електровоза і завантажених вагонеток, а друга - з порожніх вагонеток.

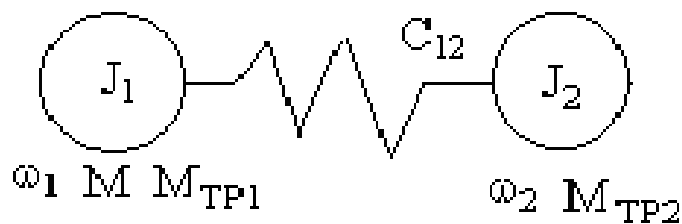


Рис. 2.5. Двомасова модель електровоза та вагонеток

Поведінку двомасової системи можна описати такою системою рівнянь, складених на підставі другого закону Ньютона:

$$\begin{aligned}
 J_1 \frac{d\omega_1}{dt} &= M - M_{12} - M_{C1} & (4a) \\
 M_{12} &= C_{12} \cdot (\theta_1 - \theta_2) & (16) \\
 J_2 \frac{d\omega_2}{dt} &= M_{12} - M_{C2} & (1c)
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

Диференціюючи обидві частини рівняння (3.1, б), отримаємо:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\omega_1}{dt} &= \frac{M_{12}}{J_2} + \frac{M}{J_1} - \frac{M_{C1}}{J_1} & (4.7,a) \\
 \frac{dM_{12}}{dt} &= c_{12} \cdot \omega_1 - c_{12} \cdot \omega_2 & (4.7,б) \\
 \frac{d\omega_2}{dt} &= \frac{M_{12}}{J_2} - \frac{M_{C2}}{J_2} & (4.7,в)
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

У тих випадках, коли параметри системи такі, що вплив пружних зв'язків незначний, або під час розв'язування задач, у яких із цим впливом можна не зважати, механічну частину уявляють як найпростішу розрахункову схему, яка не враховує впливу пружних зв'язків - жорстку

наведену ланку. У цьому разі багато масову систему замінюють однією еквівалентною масою з моментом інерції J_s , на яку впливає електромагнітний момент двигуна M і сумарний приведений до вала двигуна момент навантаження M_c . Останній момент містить у собі всі зовнішні сили, прикладені до механічної системи, крім моменту двигуна M .

Приведемо систему з двома масами (рис. 2.4) до однієї маси, припустивши зв'язок між першою і другою масами абсолютно жорстким. Відмінністю її від раніше розглянутої системи є рівність швидкостей мас $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, а також $M_{12}=0$. Складаючи рівняння (2.7,а) і (2.7,б), отримаємо:

$$J_s \frac{d\omega}{dt} = M - M_c \quad (2.17)$$

$$\text{де } J_s = J_1 + J_2 \text{ і } M_c = M_{c1} + M_{c2}$$

Рівняння (2.17) являє собою основне рівняння руху тягового електроприводу електровоза. Його значення для аналізу фізичних процесів в ЕМС винятково велике. Воно правильно описує рух механічної частини будь-якої ЕМС у середньому. Тому за його допомогою можна за відомим електромагнітним моментом двигуна і значеннями J_1 і M оцінити середнє значення прискорення електропривода, передбачити час, за який двигун досягне заданої швидкості, і вирішити багато інших практичних питань навіть у тих випадках, коли вплив пружних зв'язків у системі істотний.

Для подальшого синтезу системи керування та регулювання опишемо динаміку (рис. 2.6) рудничного електровозного складу як трьох масову систему, що складається з електровоза масою m_1 , завантажених вагонеток із сумарною масою m_2 і порожніх вагонеток із сумарною масою m_3 . На перелічені маси діють сили, зумовлені тертям кочення, в'язким тертям і пружністю зв'язку з'єднання між електровозом із навантаженими вагонетками та навантаженими вагонетками з порожніми вагонетками.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-03	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

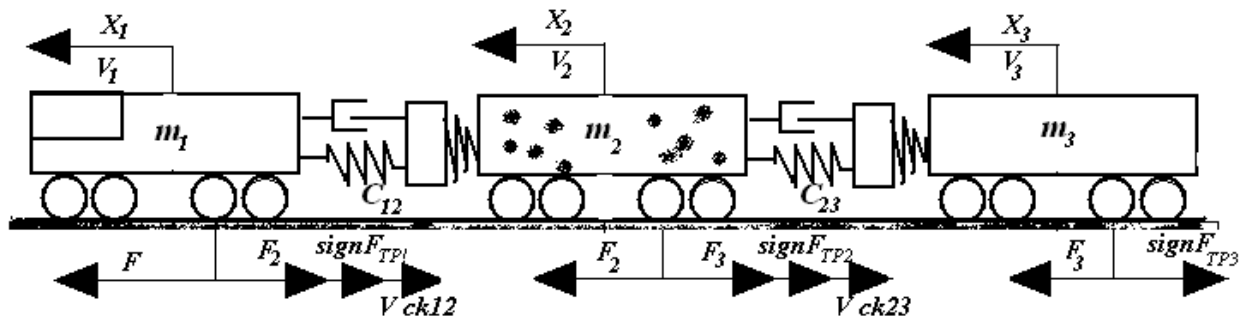


Рис. 2.6. Розрахункова модель рудничного електровозоскладу як тримасова система з моментом опору типу "тертя"

Диференціальні рівняння динаміки для прямолінійного руху електровоза мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 \frac{dF}{dt} &= (U_z - F - V_1) / T_H \\
 \frac{dV_1}{dt} &= (F - F_1 - V_1 \cdot ck_{12} - \text{sign}F_{TP1}) / m_1 \\
 \frac{dF_1}{dt} &= (V_1 - V_2) \cdot c_{12} \\
 \frac{dV_2}{dt} &= (F_1 - F_2 - V_2 \cdot ck_{23} - \text{sign}F_{TP2}) / m_2 \\
 \frac{dF_2}{dt} &= (V_2 - V_3) \cdot c_{23} \\
 \frac{dV_3}{dt} &= (F_2 - \text{sign}F_{TP3}) / m_3
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

$$\frac{dX_1}{dt} = V_1$$

$$\frac{dX_2}{dt} = V_2$$

$$\frac{dX_3}{dt} = V_3$$

де U_z – напруга завдання

F – зусилля, що розвивається електродвигуном електровоза;

F_1, F_2 – відповідно сили пружності з'єднання між електровозом і навантаженими вагонетками та між навантаженими і порожніми вагонетками;

C_{12}, C_{23} – сумарні коефіцієнти пружності з'єднання електровоза з навантаженими вагонетками і навантаженими вагонетками з порожніми вагонетками;

X_1, X_2, X_3 – відповідно шляхи пройдені електровозом, навантаженими і порожніми вагонетками;

$F_{TP1}, F_{TP2}, F_{TP3}$ – відповідно сили тертя електровоза, навантажених і порожніх вагонеток;

m_1, m_2, m_3 – відповідно маси електровоза, навантажених і порожніх вагонеток;

Структурну схему ТЕМК рудникового електровоза, наведену до вала тягового двигуна, показано на рис. 2.7.

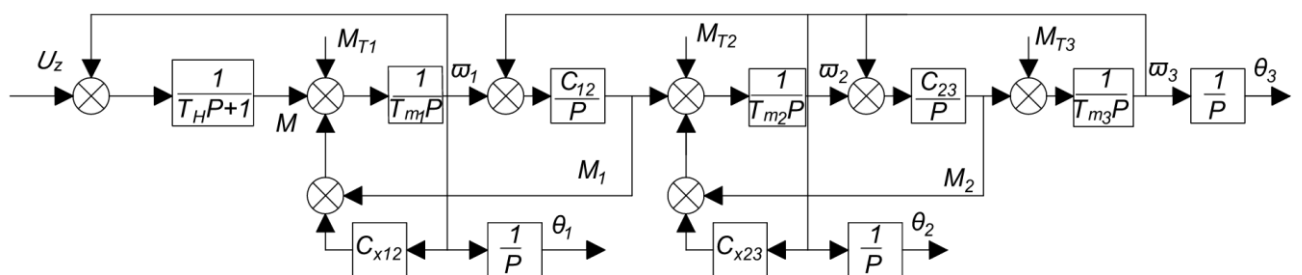


Рис. 2.7. Структурна схема тягового електромеханічного комплексу рудникового електровоза

Система диференціальних рівнянь, що описують електромеханічні перехідні процеси, наведені до вала електродвигуна, має вигляд:

$$\begin{aligned}
\frac{dM}{dt} &= (U_Z - M - \omega_1) / T_H \\
\frac{d\omega_1}{dt} &= (M - M_1 - \omega_1 \cdot ck_{12} - \text{sign}M_{TP1}) / Tm_1 \\
\frac{dM_1}{dt} &= (\omega_1 - \omega_2) \cdot c_{12} \\
\frac{d\omega_2}{dt} &= (M_1 - M_2 - \omega_2 \cdot ck_{23} - \text{sign}M_{TP2}) / Tm_2 \\
\frac{dF_2}{dt} &= (\omega_2 - \omega_3) \cdot c_{23} \\
\frac{d\omega_3}{dt} &= (M_2 - \text{sign}M_{TP3}) / Tm_3
\end{aligned}
\tag{2.19}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d\theta_1}{dt} &= \omega_1 \\
\frac{d\theta_2}{dt} &= \omega_2 \\
\frac{d\theta_3}{dt} &= \omega_3
\end{aligned}$$

де M – момент, що розвивається електродвигуном електровоза;

M_1, M_2 - відповідно моменти пружності з'єднання між електровозом і навантаженими вагонетками та між навантаженими і порожніми вагонетками;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ - відповідно швидкості обертання електровоза, навантажених вагонеток і порожніх вагонеток;

C_{12}, C_{23} – сумарні коефіцієнти пружності з'єднання електровоза з навантаженими вагонетками і навантаженими вагонетками з порожніми вагонетками;

ck_{12}, ck_{23} - коефіцієнти в'язкого тертя навантажених і порожніх вагонеток;

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ - відповідно кути повороту коліс електровозом, навантаженими і порожніми вагонетками;

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-03	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$M_{TP1}, M_{TP2}, M_{TP3}$ – відповідно моменти тертя електровоза, навантажених і порожніх вагонеток;

T_{m1}, T_{m2}, T_{m3} - відповідно механічні постійні часу електровоза, навантажених і порожніх вагонеток;

Параметри електромеханічної системи: номінальна швидкість обертання електродвигуна $n = 1320$ об/хв; сумарний активний опір електропривода $R_{\Sigma} = 0,095$ Ом; номінальна напруга електропривода $U_n = 250$ В; магнітний потік двигуна в досліджуваному режимі $K_{\phi} = 1,75$ В/с; наведений момент інерції двигуна $J = 4$ кг·м²; електромагнітна постійна електропривода $T_H = 0,01$ с; передатне число редуктора $i = 14,75$; діаметр колеса $D = 760$ мм; маса електровоза $m_{El} = 14$ т; маса вагона $m_{вагон}$ = 4-6 т ; маса вантажу $m_{вантаж}$ $m_{груза} = 10$ т; маса завантаженого складу $m_{сост} = 160$ т т; пересування 0,5 довжини вагона 6 сек; пересування 1 довжини вагона 10 сек; швидкість електровоза $v = Rk \cdot \omega_N / i_{ред} = 0,38 \cdot 1320 \cdot 0,105 / 14,75 = 3,6$ м/с; радіус приведення $\rho = v / \omega = 3,6 / 132 = 0,027$; приведений момент інерції електровоза $J_1 = m_{эл} \cdot \rho^2 = 14000 \cdot 0,027^2 = 10,2$ кг·м²; приведений момент інерції завантаженого поїзда $J_2 = m_{эл} \cdot \rho^2 = 160000 \cdot 0,027^2 = 116,8$ кг·м².

За базові одиниці приймаємо $U_n = 250$ В, $R_{\Sigma} = 0.095$ Ом, $K_{\phi} = 1,75$ В/с. У цьому випадку постійні часу розглянутої системи залишаються в реальному часі.

Графік завдання напруги переміщення прийнято амплітудою $U_z = 0.5$, час розгону $t_1 = 1$ с, час постійного завдання $t_{12} = 0,1$ с, час уповільнення $t_2 = 1$ с. Сумарний час завдання $t_1 + t_{12} + t_2 = 2,1$ с.

На рис.2.8 наведено отримані графіки перехідного процесу за положенням електровоза і виборного з перебором варіантів почергового завантаження першої, третьої і шостої вагонеток.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-03	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

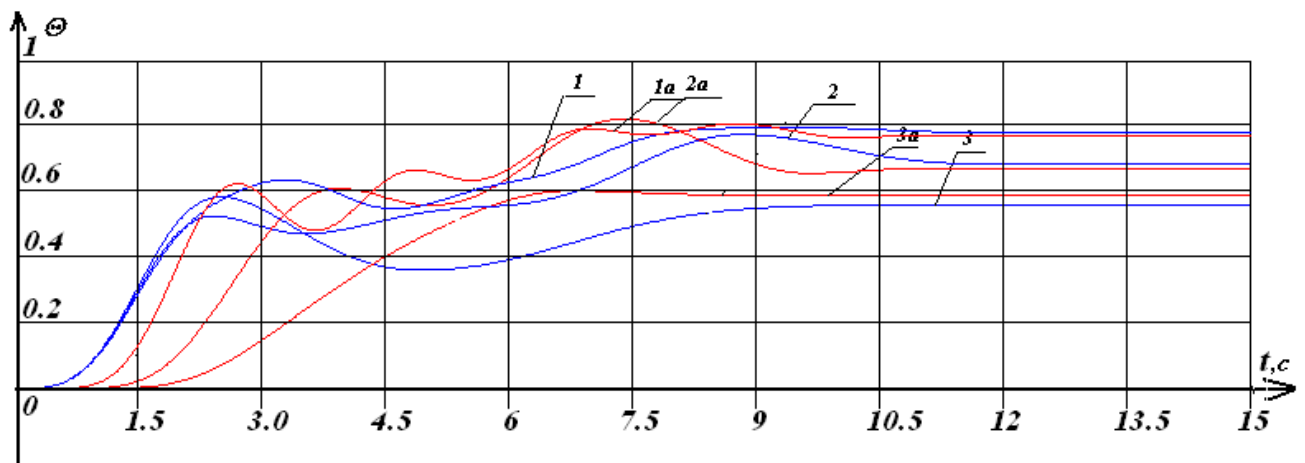


Рис. 2.8. Графіки перехідних процесів за положенням: 1 - переміщення електровоза за навантаженої однієї вагонетки; 1а - переміщення навантаженої вагонетки; 2 - переміщення електровоза за навантажених трьох вагонеток; 2а - переміщення трьох навантажених вагонеток; 3 - переміщення електровоза за шести навантажених вагонеток; 3а - переміщення за шести навантажених вагонеток.

Аналіз отриманих результатів показує, що за навантаженої однієї вагонетки електровоз і вагонетка відпрацьовують однакове переміщення, що дорівнює $m = 0,78$, за трьох навантажених вагонеток $\theta = 0,7$, за шести переміщення дорівнює $\theta = 0,6$. Таким чином, у разі відпрацювання заданого переміщення $\theta = 0,8$ у першому випадку при завантаженні одного вагона помилка під час зупинки становить 2,5%, процес коливальний без перерегулювання. При завантаженні трьох вагонів - 12,5%, перерегулювання за переміщенням електровоза становить 10%, за переміщенням завантаженого вагона. При завантаженні шести вагонів перехідний процес коливальний без перерегулювання за переміщенням тягового електровоза й аперіодичний процес за переміщенням завантажених вагонеток.

Перехідні процеси за завданням і моментом електропривода за різної кількості завантажених вагонеток подано на рис. 2.8.

За трикутного закону зміни напруги керування момент, що розвивається двигуном електропривода електровоза, має коливальний знакозмінний характер. Частота і коефіцієнт загасання коливань залежить від кількості завантажених вагонеток. Для однієї завантаженої вагонетки $\omega_0 = 2\pi/(4,2-1,75)=2,56$ рад/с, для трьох - $\omega_0 = 2\pi/(3,5-1,75)=3,6$ рад/с, для шести - $\omega_0 = 2\pi/(4,5-1,75)=2,28$ рад/с. Непропорційну зміну частоти коливань системи можна пояснити одночасною зміною коефіцієнтів пружності та моментів інерції. Максимальний час регулювання (протікання перехідного процесу) становить $t_0 = 11,5$ с за завантаженої однієї вагонетки. Для трьох і шести завантажених вагонеток час регулювання становить $t_0 = 9,5$ с.

Графіки перехідних процесів за завданням і швидкістю обертання представлені на рис. 2.10.

Перехідний процес - коливальний. Ступінь коливання швидкості обертання електровоза, завантажених і порожніх вагонеток $m=1$ (кількість напівхвиль).

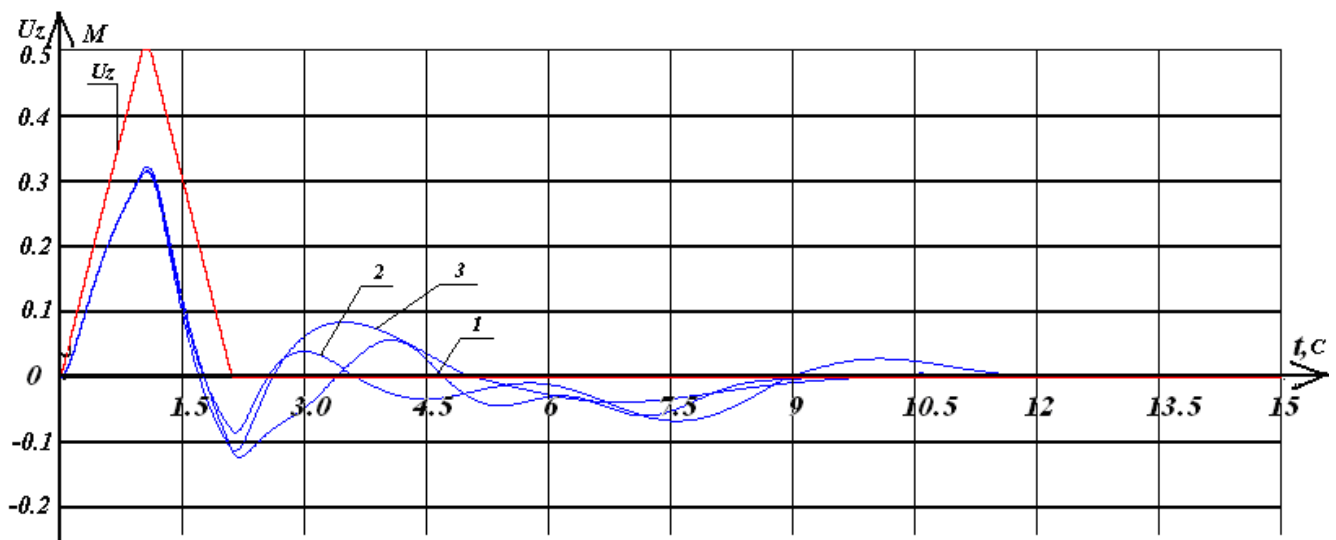


Рис. 2.9. Графіки перехідних процесів за завданням і моментом:

1 - завантажено одну вагонетку;

2 - завантажено три вагонетки;

3 - завантажено шість вагонеток

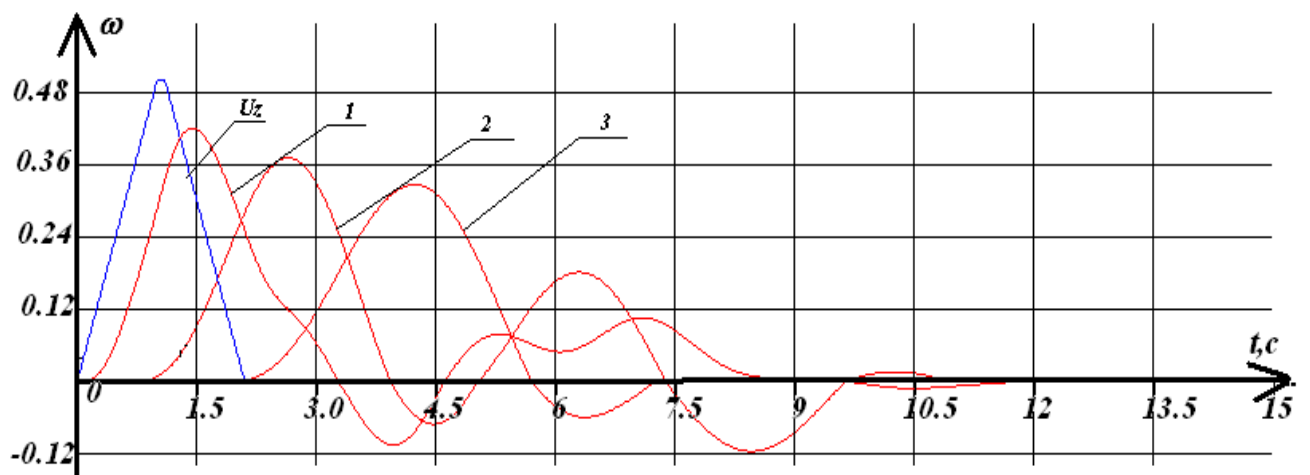


Рис. 2.10. Графіки перехідних процесів за заданням і швидкості обертання електродвигуна електровоза:

1 - завантажено одну вагонетку;

2 - завантажено три вагонетки;

3 - завантажено шість вагонеток

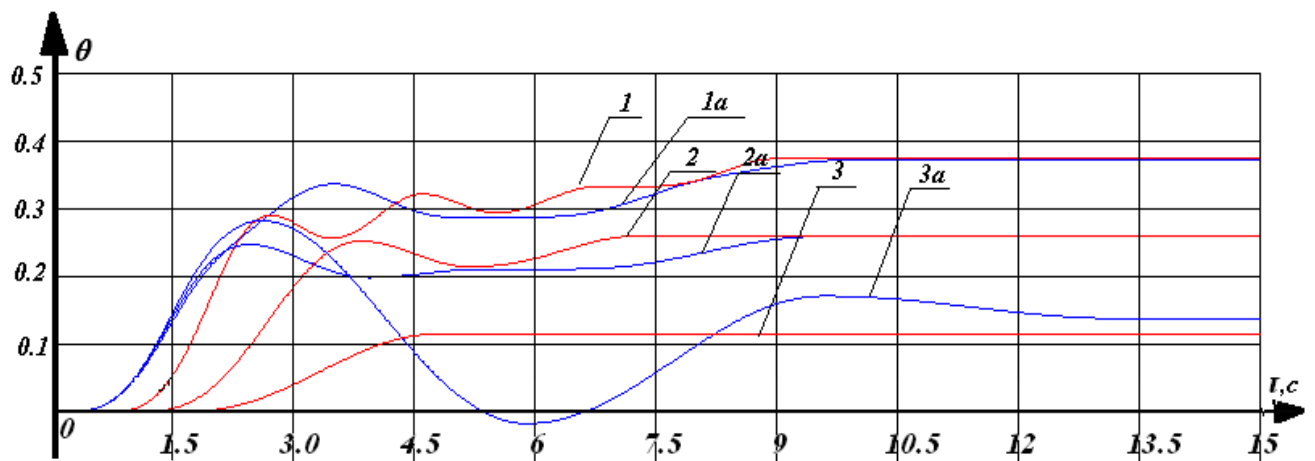


Рис. 2.11. Графики переходных процессов по положению:

1 – перемещение электровоза при нагруженной одной вагонетки;

1a – перемещение нагруженной вагонетки;

2 – перемещение электровоза при нагруженных трех вагонеток;

2а – перемещение трех нагруженных вагонеток;

3 – перемещение электровоза при шести при свободном выбеге

Підвищення точності зупинки завантажених вагонеток поліпшується за рахунок збільшення амплітуди задавального сигналу зі збільшенням кількості завантажених вагонеток. Результати розрахунку при збільшенні амплітуди задавального сигналу зі збільшенням кількості завантажених вагонеток наведено на рис. 2.12 і 2.13.

На рис. 2.12 наведено перехідні процеси за переміщенням у разі дозованого збільшення амплітуди сигналу, що задає, під час завантаження трьох вагонеток на $\Delta Uz = 0.06$, під час завантаження шести вагонеток на $\Delta Uz = 0.12$. Характер перехідних процесів залишився незмінним.

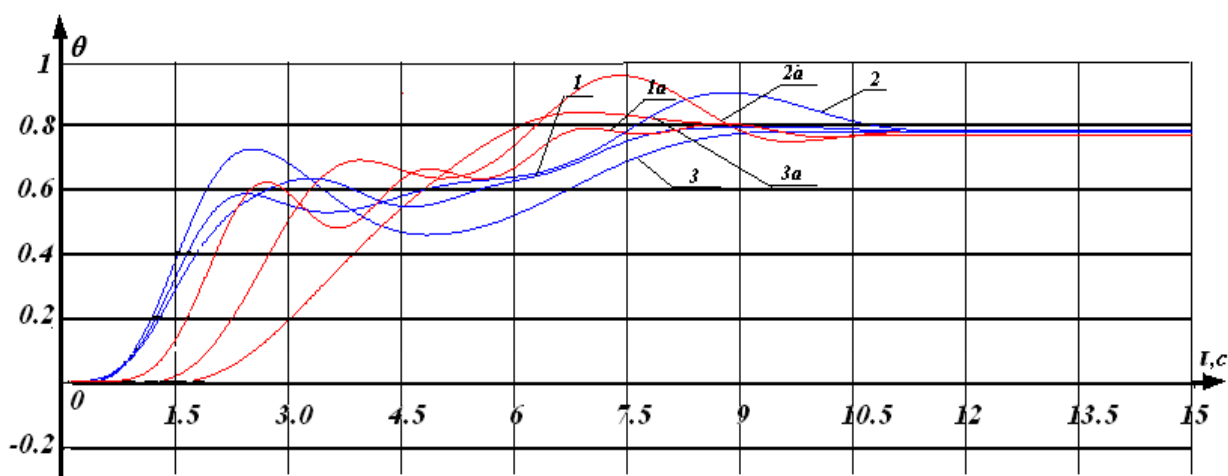


Рис. 2.12 Графіки переміщення відповідно електровоза - 1, 2, 3 і завантажених вагонеток - 1а, 2а, 3а для однієї, трьох і шести при збільшенні амплітуди сигналу.

На рис. 2.13 графіки 2 і 2а перехідного процесу отримано в разі збільшення завдання на $\Delta Uz = 0.0125$, графіки 3 і 3а - за $\Delta Uz = 0.11875$. Звідси впливає висновок, що приріст амплітуди сигналу керування зі збільшенням завантажених вагонів має не лінійний характер.

На рис. 2.14 наведено електромеханічну систему рудничного електровоза, у якому використовується підпорядкована система регулювання з налаштуванням за симетричним оптимумом контуру моменту (струму) і модульним оптимумом контуру частоти обертання електропривода.

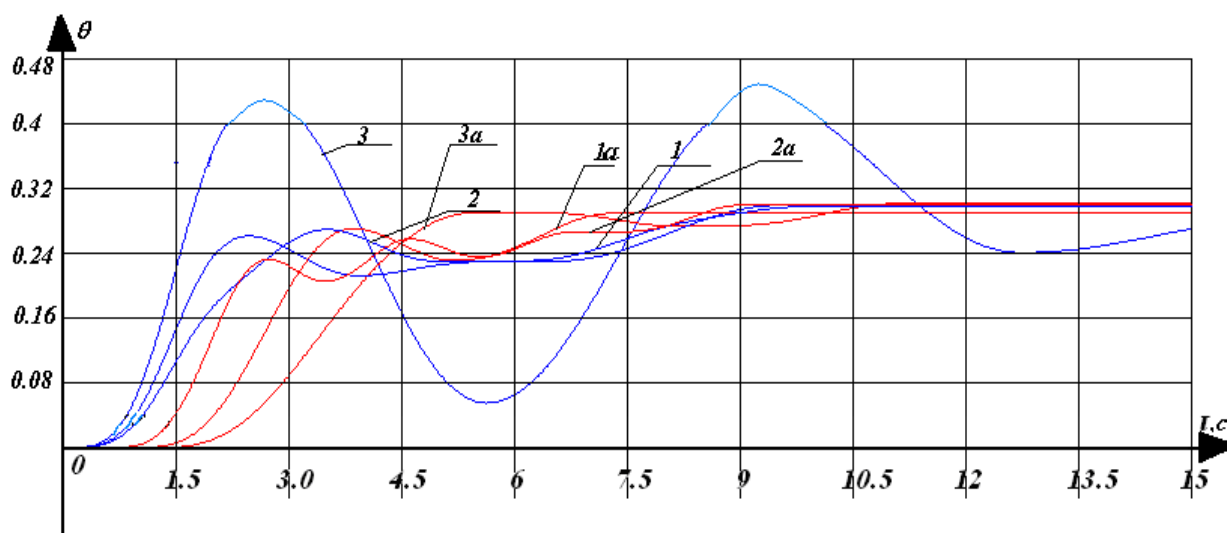


Рис. 2.13. Графіки переміщення відповідно електровоза - 1, 2, 3 і завантажених вагонеток - 1а, 2а, 3а для однієї, трьох і шести при збільшенні амплітуди сигналу за вільного вибору

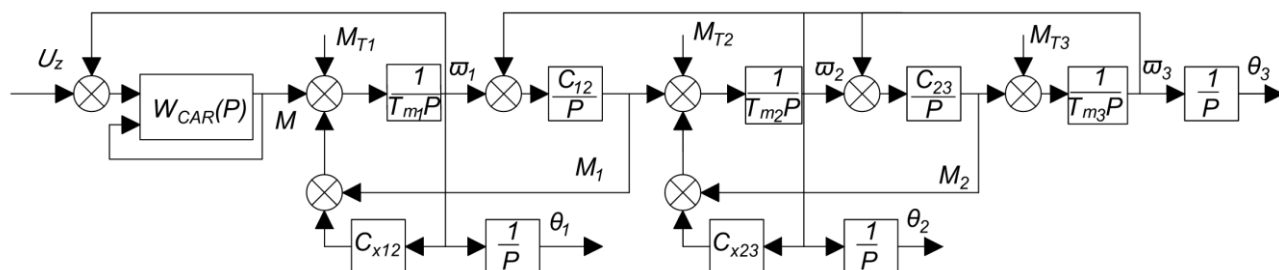


Рис. 2.14. Структурна схема рудничного електровоза із системою підпорядкованого регулювання

Графіки перехідних процесів за положенням електровоза і почерговим завантаженням першої, третьої та шостої вагонеток наведено на рис. 2.15.

Перехідні процеси з переміщення рудникового електровоза з використанням регульованого електропривода, налаштованого на

симетричний і модульний оптимум, наведені на рис. 2.16 показують таке. Максимальна усталена помилка переміщення за трикутного завдання становить 5% за шести завантажених вагонеток.

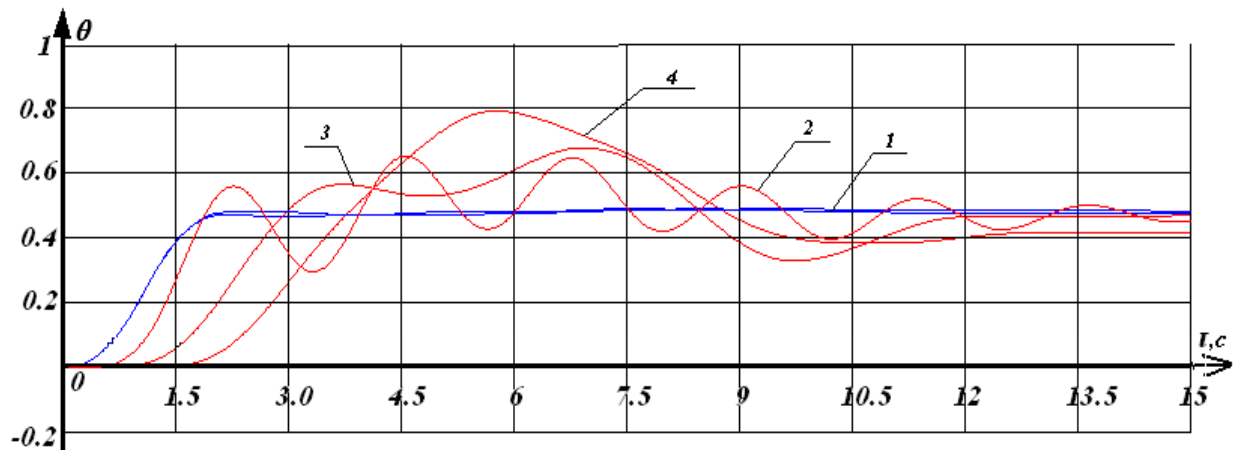


Рис. 2.15. Графіки перехідних процесів за положенням:

1- переміщення електровоза за навантаженої однієї вагонетки;

1а - переміщення навантаженої вагонетки;

2 - переміщення електровоза за навантажених трьох вагонеток;

2а - переміщення трьох навантажених вагонеток;

3 - переміщення електровоза при шести навантажених вагонетках;

3а - переміщення при шести навантажених вагонетках

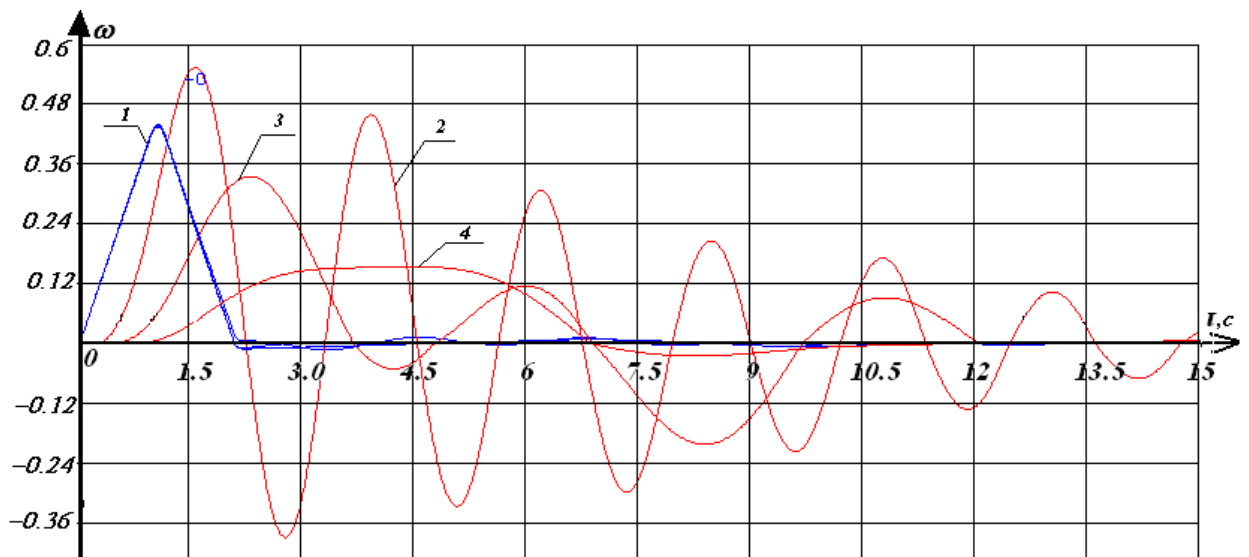


Рис. 2.16. Графіки перехідних процесів за швидкістю:

- 1 - швидкість електровоза;
- 2- швидкість однієї завантаженої вагонетки;
- 3- швидкість трьох завантажених вагонеток;
- 4 - швидкість шести завантажених вагонеток

Процеси мають коливальний характер із меншим коефіцієнтом загасання. Час перехідного процесу становить від 12 с до 16 с, що більше ніж за відсутності системи автоматичного керування цим процесом [6]. Максимальне перерегулювання становить 45% при завантаженні трьох вагонеток.

Ступінь коливання системи: $m=7$ для однієї завантаженої вагонетки, $m=3$ для трьох завантажених вагонеток, $m=1$ для шести завантажених вагонеток. Звідси видно, що зі збільшенням числа завантажених вагонеток ступінь коливання зменшується.

Висновки до розділу

У ході дослідження динаміки тягового комплексу електровоза було розроблено спрощену математичну модель, що базується на системі нелінійних диференціальних рівнянь із врахуванням низки припущень (ідеальні характеристики елементів перетворювача, сталі значення параметрів протягом коротких часових інтервалів, неперервність струму тощо). Це дозволило отримати аналітичні вирази для опису руху як самої тягової одиниці, так і потяга, зокрема пружної деформації зчіпки.

Аналіз перехідних процесів при пуску та гальмуванні показав, що реалістичною є трикутна форма графіків руху, яка гарантує обмеження прискорення до 1 м/с^2 з метою запобігання буксуванню ведучих коліс. При цьому збільшення кількості завантажених вагонеток спричиняє зменшення переміщення електровоза і зміну параметрів коливальних процесів, що визначається співвідношенням мас і характеристиками пружних зв'язків.

Розроблена модель дозволяє оптимізувати систему керування, забезпечуючи точне регулювання руху навіть за умов зміни навантаження. Вона є ефективним інструментом для аналізу та прогнозування перехідних процесів, що сприяє підвищенню безпеки та ефективності експлуатації рудничних електровозів.

Таким чином, отримані результати демонструють, що спрощення та правильне формування математичної моделі дає змогу адекватно описати динамічну поведінку тягового комплексу та забезпечити основу для подальшої оптимізації конструктивних та регуляторних рішень у сучасних електротехнічних системах.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-03	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 3. Оптимізація режимів гальмування тягового комплексу електровоза

3.1. Дослідження оптимального часу гальмування тягового електропривода рудничного електровоза

Через великі та різкозмінні динамічні режими, що протікають у коротких (до 5 с) інтервалах часу під час гальмування електровоза під час навантажувальних операцій, а точніше реалізації процесу гальмування СУ ТЕП у заданий час, основним видом гальмування є пневматичне, коли колодкові гальма фіксують колісні пари електровоза. При цьому гальмуванні одночасно тяговий електричний двигун відключається від системи електропостачання (від АБ) і переходять у режим динамічного гальмування. З огляду на неоднозначність протікання перехідних електромеханічних процесів під час такого гальмування цей момент функціонування ТЕП підлягає додатковому індивідуальному дослідженню.

Для визначення мінімально оптимального часу гальмування і збереження при цьому динамічних зусиль, що не порушують міцності конструкції електровоза, потрібно забезпечити необхідне значення гальмівного зусилля. Формалізуючи завдання, на підставі наведених у попередніх розділах рівнянь і міркувань, сформуємо рамкову мету пошуку так: при $F(t)=0$ визначити значення W_1 і W_2 при спільному русі цих доданків системи, для яких $\varepsilon \rightarrow \min$.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-03			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат				
Розробив		Воронов Г.А.			Розділ 3	Літ.	Лист	Листів
Перевірив		Сінчук О.М.					43	6
Реценз.								
Н. Контр.		Сінчук О.М.						
Затвердив		Пересунько І.І.				КНУ ЕЕМ-22ск		

Виходячи із системи рівнянь:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = \frac{1}{m_1} [F(t) - f(S)(\chi_1 - \chi_2) - W_1 \text{Sign} \dot{\chi}_1], \\ \ddot{x}_2 = \frac{1}{m_2} [f(S)(\chi_1 - \chi_2) - W_2 \text{Sign} \dot{\chi}_2]. \end{cases} \quad (3.20)$$

Перетворюючи, отримаємо:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = \frac{1}{m_1} [-f(S)(\chi_1 - \chi_2) - W_1 \text{Sign} \dot{\chi}_1], \\ \ddot{x}_2 = \frac{1}{m_2} [f(S)(\chi_1 - \chi_2) - W_2 \text{Sign} \dot{\chi}_2]. \end{cases} \quad (3.21)$$

У цьому разі попередній пошук здійснювався методом градієнта при $C_1 = 60000$, $C_2 = 3000$ і колишніх початкових умов. Варійовані значення параметрів, значення критеріїв і часу гальмування зведено в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1

Варійовані значення параметрів, значення критеріїв і часу гальмування

W_1	W_2	t	ε	σ
1000	1400	12,6	-156	26,1
1000	2025	12,6	-150	31,0
1000	2650	13,3	-72	0,1
1000	3273	11,4	-48	0,1
1000	2962	12,3	-59	0,1
1000	3587	10,6	-38	0,1
1000	3900	10,0	-29	0
1000	4525	9,9	-29	0
1000	6000	7,0	-9,6	8,8
1000	5000	8,14	-7,2	0,4
1000	4800	8,42	-9,9	0,02
1250	4800	8,08	-6,3	0,37
750	4800	8,8	-14,7	0,04
1100	4600	8,56	-11,7	0,004

Виходячи з результатів пошуку, оптимальному режиму гальмування відповідають $W_1 = 1000-1100$; $W_2 = 4600-4800$.

Для отримання математичного опису поверхні за методикою і планом, аналогічним для процесу розгону, було проведено серію з 17 дослідів, результати яких наведено в таблиці 3.2. Центр області планування прийнято в точках $W_1 = 1400$; $W_2 = 2025$. Крок пошуку $\Delta W_1 = 200$; $\Delta W_2 = 425$.

Таблица 3.2

Результати дослідів математичної моделі

№ п/п	Z_1	Z_2	W_1	W_2	t	ε	σ
1.	1	1	1600	2337	8,12	-92,79	24,69
2.	1	-1	1600	1712	8,72	-112,16	26,175
3.	-1	1	1200	2337	11,14	-143,92	37,93
4.	-1	-1	1200	1712	9,88	-114,354	22,45
5.	0	0	1400	2025	10,08	-138,34	35,03
6.	2	0	1800	2025	8,00	-102,79	27,00
7.	-2	0	1000	2025	12,56	-150,32	31,00
8.	0	2	1400	2650	9,38	-108,66	30,02
9.	0	-2	1400	1400	8,52	-93,62	15,39
10.	2	2	1800	2650	28,19	-91,64	-
11.	2	-2	1800	1400	15,89	-80,84	-
12.	-2	2	1000	2650	15,43	-64,99	-
13.	-2	-2	1000	1400	12,58	-155,85	26,08
14.	-	-	1000	3275	11,42	-47,56	0,09
15.	-	-	1000	2962	12,32	-58,75	0,11
16.	-	-	1000	3587	10,64	-37,61	0,02
17.	-	-	1000	3900	9,96	-29,121	0,00

Коефіцієнти A_{ij} і C_{ij} знаходяться за таблицею 3.3.

Таблица 3.3

Коефіцієнти A_{ij} і C_{ij}

№ п/п	Z_1	Z_2	A_0	A_1	A_2	A_{11}	A_{12}	A_{13}
1.	+1	+1	1	1	+1	-17	-17	1
2.	+1	-1	1	1	-1	-17	-17	-1
3.	-1	+1	1	-1	+1	-17	-17	-1
4.	-1	-1	1	-1	-1	-17	-17	1
5.	0	0	3	0	0	-238	-238	
6.	1	0	2	+1	0	-89	-166	
7.	-1	0	2	-1	0	-89	-166	
8.	0	1	2	0	1	-166	-89	
9.	0	-1	2	0	-1	-166	-89	
10.	2	0	-1	2	0	358	50	
11.	-2	0	-1	-2	0	358	50	
12.	0	2	-1	0	2	50	358	
13.	0	-2	-1	0	-2	50	358	

Як і в разі розгону, під час гальмування електровозоскладу також спостерігається відповідність мінімуму коефіцієнта динамічності мінімуму часу гальмування. Це пояснюється тим, що під час недостатньо інтенсивного гальмування рудничного електровозоскладу, який має велику масу, відбувається додаткове прискорення електровоза, що супроводжується збільшеними динамічними зусиллями, що призводить до збільшення сумарного часу гальмування системи.

Висновки до розділу

1. На підставі розробленої методики та математичної моделі проведення дослідження виявлено вплив системоутворювальних параметрів на динамічні властивості системи: рудничний контактено-акумуляторний електровоз - вагонетки.

2) Визначено оптимальні значення параметрів системи, що забезпечують необхідну точність устанавлення вагонеток під навантажувальним люком для навантаження: точність постановлення рудничного електроскладу під завантаження можна підвищити шляхом ступінчастого збільшення амплітуди сигналу завдання на переміщення залежно від кількості завантажених вагонеток, як у розімкнутій системі регулювання, так і із застосуванням систем підпорядкованого регулювання електроприводом. При цьому перехідний процес у разі завантаженості менше шести вагонеток має різко коливальний характер.

3. Застосування систем підпорядкованого регулювання тяговим електроприводом рудникового електровоза підвищить ступінь коливання системи. Для поліпшення якості перехідного процесу за переміщенням потрібен алгоритм керування ТАП, відповідний раніше, і схемотехнічна його реалізація в комплексі СУ рудниковим контактено-акумуляторним електровозом.

Основні результати досліджень, викладених у цьому розділі, наведені в роботах автора [5, 6 - 7, 10].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-03	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

Дипломна робота присвячена аналізу динамічних процесів у тягових комплексах рудничних електровозів із застосуванням математичного моделювання. Проведене дослідження має актуальне значення для гірничої галузі, оскільки дозволяє не лише поглиблено розглянути процеси, що відбуваються в електромеханічних системах транспортних засобів, а й розробити рекомендації щодо оптимізації режимів їхньої роботи з метою підвищення енергоефективності та продуктивності.

Основна частина роботи охоплює аналіз стану проблеми та сучасних підходів до моделювання тягових комплексів. Розглянуто як класичні аналітичні методи, що базуються на диференціальних рівняннях, так і чисельні та імітаційні методи моделювання. Важливим результатом дослідження є встановлення того, що комплексний підхід, який інтегрує теоретичні моделі з експериментальними даними, забезпечує більш точне відтворення реальних умов експлуатації рудничних електровозів.

У другому розділі досліджено математичне моделювання динамічних процесів у тяговому комплексі. Автором було розроблено спрощену модель, яка дозволяє описати взаємодію електровоза та вагонеток як єдиної системи з урахуванням нелінійних ефектів, де враховано як електромеханічні, так і механічні властивості. Зокрема, було проаналізовано перехідні процеси при пуску та гальмуванні, де застосування трикутного закону зміни напруги дозволяє забезпечити оптимальне прискорення та уникнути буксування ведучих коліс. Отримані аналітичні вирази демонструють залежність поведінки системи від співвідношення мас та характеристик пружних зв'язків, що відкриває можливості для подальшої оптимізації конструктивних рішень.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-03	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У третьому розділі роботи розглянуто питання оптимізації режимів гальмування тягового комплексу електровоза. На основі математичних моделей проведено серію експериментальних досліджень, результати яких дозволили визначити оптимальні значення параметрів для досягнення необхідної точності постановлення вагонеток при гальмуванні. Було встановлено, що застосування систем підпорядкованого регулювання значно підвищує якість перехідних процесів, що, у свою чергу, сприяє зменшенню динамічних зусиль та підвищенню безпеки експлуатації. Результати дослідження демонструють, що при збільшенні кількості завантажених вагонеток характер коливальних процесів змінюється, що вимагає адаптації алгоритмів керування для забезпечення стабільності системи.

Загалом, результати роботи свідчать про доцільність використання математичного моделювання для аналізу та оптимізації динамічних процесів у складних електромеханічних системах, таких як рудничні електровози. Розроблена методика моделювання та отримані результати можуть бути успішно застосовані при проектуванні та модернізації транспортних засобів у гірничій галузі. Вони сприяють не лише підвищенню енергоефективності і продуктивності, а й зменшенню експлуатаційних витрат, що є надзвичайно важливим з урахуванням сучасних викликів у галузі видобутку корисних копалин.

Отже, проведене дослідження є вагомим внеском у розуміння механізмів взаємодії складових електромеханічних систем і відкриває перспективи для подальших наукових розробок у напрямку розробки інтелектуальних систем керування. Подальші дослідження в даній області можуть зосередитись на удосконаленні чисельних методів моделювання, врахуванні додаткових нелінійних ефектів та розробці адаптивних алгоритмів регулювання, що дозволить створити більш ефективні та безпечні системи управління для сучасних рудничних електровозів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-03	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Петров А. В. Показники якості електричної енергії в лініях зовнішнього електропостачання системи електричної тяги постійного струму / А. В. Петров, О. І. Саблін // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2012. – № 41. – С. 95-101.
2. Скалозуб В. В. Ресурсозберігаючі методи управління тягою поїздів і удосконалення конструкцій рухомого складу. Автореферат дисертації на наукового ступеня д.т.н. Дніпропетровськ. 2003. 35
3. Петренко О. М. Алгоритм синтезу експертної системи управління рухом електрорухомого складу на основі рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана / О. М. Петренко, Б. Г. Любарський, М. Л. Глебова // Вісник
4. Калашников К. О. Зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. Дніпропетровськ. 2014. 22 с.
5. Фізична модель рекуперативної системи маневрового тепловоза: Монографія / ред. Ю.В.Черняк, Ю.В. Прилепский, І.В. Грицук. Донецьк: ДонІЗТ, 2010. 196 с.
6. Устенюк О. В. Використання накопичувачів енергії для підвищення параметрів локомотивів. / О. В. Устенюк, О. В. Пасько. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. / Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й

практика» науково-виробничого журналу. – 2012. – №3. – С. 293–296

7. Гетьман Г. К. Теорія електричної тяги / Г. К. Гетьман. – Дніпро: Акцент ПП, 2014. – 580 с. – (Підручник).
8. Саблін, О. І. Підвищення ефективності рекуперації енергії в системі електротранспорту при обмеженому тяговому електроспоживанні / Енергетика та енергозбереження. – 2014. – № 6/1(20). – С. 21-26.
9. Скалозуб, В.В. Ресурсозберігаючі методи управління тягою поїздів і удосконалення конструкцій рухомого складу: автореф. дис...докт. техн. наук : 05.22.07 / Скалозуб Владислав Васильович; [ДНУЗТ]. – Д.: 2003. – 37
10. Електропостачання електричного транспорту: навч. посіб./В. Х. Далека, В. К. Нем, В. І. Скуріхін; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 168 с

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250-03	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		