

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

*Кафедра «Локомотиви»*

«ДО ЗАХИСТУ»

в.о зав. кафедрою Б.Є.Боднар

« 13 »  2021 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань: 27 «Транспорт»

Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»

Спеціалізація «Локомотиви та локомотивне господарство»

**УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМИ  
ТЯГОВИМИ ДВИГУНАМИ ЛОКОМОТИВІВ**

**IMPROVEMENT OF ASYNCHRONOUS CONTROL SYSTEMS  
TRACTION ENGINES OF LOCOMOTIVES**

**0032.206303.000.04MP.ПЗ**

Керівник  В.Н. Сердюк

дипломного проекту  
Нормоконтролер  Л.В. Колодій

Виконавець: студент  
групи ЛГ2026  А.О.Пономаренко

Student  А.О.Ponomarenko

Дніпро,

2021

Дніпровський національний університет залізничного транспорту  
ім.ак.Лазаряна

Факультет «Транспортна інженерія» кафедра  
«Локомотиви»  
Спеціальність 273 «Залізничний транспорт»  
за ОП «Локомотиви та локомотивне господарство»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедрою

М.І.Капіца

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 р.

### З А В Д А Н Н Я

до дипломної магістерської роботи на здобуття ОС «магістр»  
студента групи ЛГ2026 \_\_\_\_\_ Пономаренко Антон Олександрович

(прізвище , ім'я та по-батькові )

1. Тема магістерської дипломної роботи «Удосконалення системи управління асинхронними тяговими електродвигунами локомотивів»

Затверджена наказом по університету від 24 грудня 2020 р. № 763ст

2. Термін подання студентом закінченої роботи 10 грудня 2021 року

3. Вихідні дані до магістерської роботи. Електровози 2ЭС10, ЭП20, тепловоз 2ТЭ25А, електровоз 2ЭВ120, гібридний тепловоза ТЕМ9Н.

;4. Перелік креслень (демонстративного матеріалу)

\_\_\_\_\_

Схеми тягового

електроприводу

Класифікація алгоритмів управління ТЕП в режимі реалізації граничних зусиль

\_\_\_\_\_

Функціональна схема електричної передачі тепловоза ТЕМ9Н

\_\_\_\_\_

Модулювання тягового електропривода

\_\_\_\_\_

Результати модулювання тягового електроприводу

\_\_\_\_\_

Осцилограми модулювання роботи тягового

електроприводу

5. Перелік питань до розробки та термін виконання

Назва розділу магістерської роботи	Термін виконання	Обсяг розділу, %
1 Аналіз алгоритмів управління ТЕП локомотивів в режимі реалізації граничних зусиль	17.10.2021	30
Спосіб управління та математична моделювання ТЕП із системою спільного регулювання АТ	14.11.2021	30
3 Математичне та комп'ютерне модулювання механічної частини ТЕП гібридного тепловоза.	10.12.2021	40
4 Комплексні електромеханічні моделі ТЕП із спільного регулювання АТД та дослідження режимів реалізації граничних зусиль		

Дата видачі завдання « 27 » грудня 2020 р.

Керівник магістерської роботи \_\_\_\_\_ Сердюк В.Н.  
(підпис) (ПІБ)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Пономаренко А.О.  
(підпис) (ПІБ)

## РЕФЕРАТ

**Обсяг і структура.** Дипломна магістерська робота на тему: «Удосконалення системи управління асинхронними тяговими електродвигунами локомотивів» включає в себе 6 креслень, 100 аркушів розрахунково-пояснювальної записки та складається з 5 частин. Проект містить рисунки, таблиці та список використаних джерел з 21 найменувань.

Об'єктом дослідження є підвищення надійності зчеплення тепловозних коліс з рейками при роботі в режимі «тяга».

Предметом дослідження є зона контакту колеса і рейки.

Метою магістерської роботи є підвищення граничних по зчепленню зусиль, реалізованих електроприводом локомотивів при спільному управлінні асинхронними тяговими двигунами візка.

Сучасні тепловози та електровози, оснащені потужними асинхронними тяговими двигунами (АТД), що мають високий номінальний електромагнітний момент. При цьому швидкість ковзання коліс в контакті колесо-рейка збільшується вище деякого критичного значення, і робоча крапка тягового електропривода (ТЭП) переходить в зону боксування (або юза), що може без застосування спеціальних систем та алгоритмів управління ТЭП супроводжується погіршенням гальмівних і тягових властивостей, збільшенням динамічних навантажень і зносу.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні основні завдання дослідження: розробити і виготовити установки для вивчення ефекту впливу магнітного поля на взаємодію сталевих пар тертя, отримати експериментальні дані щодо впливу постійного магнітного поля на тертя зразків зі сталі; визначити для режимів початкового і повного насичення параметрів магнітного поля в зоні.

Ключові слова: МАГНІТНЕ ПОЛЕ, КОЛЕСО-РЕЙКА МЕХАНІЧНА КОЛИВАЛЬНА СИСТЕМА, МАГНІТНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ, ТЕПЛОВОЗ ЧМЕЗ.

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	
2	АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ УПРАВЛІННЯ ТЕП ЛОКОМОТИВІВ В РЕЖИМІ РЕАЛІЗАЦІЇ ГРАНИЧНИХ ЗУСИЛЬ .....
2.1	Алгоритми захисту від буксування та юза. ....
2.2	Класифікація алгоритмів управління ТЕП в режимі реалізації граничних зусиль і постановка задачі.....
3	СПОСІБ УПРАВЛІННЯ І МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕП ІЗ СИСТЕМОЮ СПІЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ АТ.....
2.1	Спосіб і алгоритми управління ТЕП гібридного тепловоза в режимі реалізації граничних зусиль.....
2.2	Математичне і комп'ютерне моделювання СУ ТЕП з спільним регулюванням АТД.....
3	МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ТЕП ГІБРИДНОГО ЕПЛОВОЗА.....
3.1	Спрощене моделювання механічної підсистеми ТЕП.....
3.2	Моделювання механічної частини гібридного тепловоза ТЭМ9Н з високим ступенем деталізації.....
4	КОМПЛЕКСНІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ МОДЕЛІ ТЕП ІЗ СПІЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ АТД І ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ГРАНИЧНИХ ЗУСИЛЬ.....
4.1	Створення комплексних моделей ТЕП зі спільним регулюванням АТД..
4.2	Попередній аналіз реалізації граничних зусиль на спрощених моделях ТЕП.....

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Удосконалення системи управління асинхронними тяговими електродвигунами локомотивів	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		<i>Пономаренко</i>					2	
Перевір.		<i>Сердюк В.Н.</i>						
Реценз.								
Н. Контр.		<i>Колодій Л.В.</i>						
Затверд.						<b>УДУНТ, гр. ЛГ2026</b>		

4.3 Дослідження динамічних процесів в ТЕМ зі спільним розривним управлінням АТД при розгоні і гальмуванні на межі по зчепленню.....

Висновки.....

Список використаних джерел.....

					0032.206303.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

З метою оновлення вітчизняного локомотивного парку Укрзалізниці, правлінням намічені перспективи розвитку транспорту до 2030 року, прийнята Стратегія розвитку залізничного транспорту. Організація проектування та випуску в Україні локомотивів нового покоління з асинхронним тяговим приводом передбачена в рамках даної стратегії. Сучасні тепловози і електровози, оснащені потужними асинхронними тяговими двигунами (АТД), що мають високий номінальний електромагнітний момент, можуть перевозити великовагові склади і досягати в процесі роботи граничних по зчепленню тягових або гальмівних зусиль навіть в хороших умовах зчеплення. При цьому швидкість ковзання коліс в контактi колесо-рейка збільшується вище деякого критичного значення, і робоча крапка тягового електропривода (ТЭП) переходить в зону боксовання (або юза), що може без застосування спеціальних систем та алгоритмів управління ТЭП супроводжується погіршенням гальмівних і тягових властивостей, збільшенням динамічних навантажень і зносу.

Вивченням ТЭП з асинхронними двигунами (АД) як єдиної керованої електромеханічної системи займалися вітчизняні та зарубіжні вчені:

Однак електропривод зі спільним регулюванням АТД в межах візка, паралельно підключених до одного інвертору, поки досліджений недостатньо і вимагає подальшого опрацювання.

У сучасному тяговому електроприводі вітчизняних і зарубіжних локомотивів широко впроваджуються двигуни змінного струму замість традиційних колекторних двигунів послідовного збудження. На потужних локомотивах з високим використанням сил зчеплення найбільшого поширення набув ТЭП з АТД, це електровози 2ЭС10, ЭП20, тепловоз 2ТЭ25А, дослідний електровоз 2ЭВ120.

					<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найбільше використання сил зчеплення, а, отже, і реалізацію великих сили тяги і гальмування вдається досягти при окремому регулюванні кожного двигуна (поосного регулювання). Однак з урахуванням економічних чинників і зручності розміщення в ряді випадку використовують паралельне підключення двигунів візка до загального інвертору (спільне регулювання). Тяговий електропривод з асинхронними двигунами зважаючи на низку відомих особливостей досить складний в управлінні і в індивідуальному виконанні, а паралельне підключення двигунів додатково ускладнює завдання.

Динамічні і тягові якості локомотивів з АТД визначальним чином залежать від системи управління електроприводом. У той же час, з перерахованих вище локомотивів тільки на тепловозі 2ТЭ25А застосовані вітчизняні алгоритми регулювання ТЕП. Дані алгоритми розроблені Всеросійським науково-дослідним і конструкторсько-технологічним інститутом рухомого складу (ВНІКТИ). На російські електровози інтегровані алгоритми зарубіжних фірм: Siemens, Alstom, Bombardier Transportation, є інтелектуальною власністю цих фірм.

В сучасних умовах досить актуально, поряд з впровадженням імпортованих систем управління (СУ), створювати і удосконалювати з урахуванням світових досягнень власні алгоритми управління ТЕП, використовуючи для їх відпрацювання, як вже наявні зразки локомотивів, так і нові комп'ютерні технології.

Для цих цілей добре підходить чотиривісний гібридний маневрово-вивізний тепловоз ТЕМ9Н зі спільним регулюванням АТД, На даному тепловозі застосовано комплекс технічних рішень в системі електроживлення, що знімають ряд обмежень по управлінню ТЕП в порівнянні зі звичайним електроприводом тепловоза. Використання в системі електроживлення акумуляторної батареї з величезним енергозапасом (300 кВт \* годин) і суперконденсаторів дає можливість відійти від традиційного для тепловозів ступеневої (позиційного) зміни потужності дизеля на тягу і

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відпрацьовувати алгоритми регулювання ТЕП з АТ, застосовні як для тепловозів, так і для електровозів нового покоління. Мета магістерської роботи - підвищення граничних по зчепленню зусиль, реалізованих електроприводом локомотивів при спільному управлінні асинхронними тяговими двигунами візка.

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ УПРАВЛІННЯ ТЕП ЛОКОМОТИВІВ В РЕЖИМІ РЕАЛІЗАЦІЇ ГРАНИЧНИХ ЗУСИЛЬ

Системи управління ТЕП локомотивів формувалися історично [1-20] в залежності від застосовуваних тягових електродвигунів, розвитку елементної бази СУ і теорії електроприводу. Відповідно змінювалися схеми і алгоритми управління ТЕП в режимі реалізації граничних по зчепленню зусиль [21], але, не дивлячись на різноманітність конкретних рішень, дані алгоритми можна умовно розділити за принципом функціонування на дві великі групи:

1. Алгоритми захисту від буксування і юза.
2. Алгоритми реалізації потенційного коефіцієнта зчеплення.

Алгоритми першої групи починають функціонувати тільки при виникненні буксування (юза) і включають в себе два етапи:

- а) виявлення буксування (або юза);
- б) придушення буксування (юза).

Алгоритми другої групи виводять ТЕП на межу по зчепленню і дозволяють досягати максимально можливих тягових зусиль, що особливо важливо для рушання з місця і надійного ведення великовагових складів в несприятливих умовах. Ці алгоритми реалізовані і розвиваються в ТЕП зарубіжних фірм. У вітчизняному тяговому електроприводі ведуться дослідження в цьому напрямку, практично ж поки реалізовані і удосконалюються переважно алгоритми першої групи, і це теж необхідно для модернізації існуючого парку локомотивів.

Відставання виникло в результаті кардинальних змін нашої країни в 90-і роки минулого століття, уповільнили розвиток виробляють галузей. Дослідження, розробка і впровадження нових вітчизняних систем і алгоритмів управління ТЕП з АТ особливо актуальні не тільки через виниклу необхідності імпортозаміщення, а й в силу стратегічної важливості для Росії забезпечення безперебійної і надійної роботи залізничного транспорту незалежно від будь-яких зовнішньополітичних умов.

					<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.1 Алгоритми захисту від буксування та юза

Для пояснення алгоритмів необхідно попередньо коротко зупинитися на виникненні та наближеному математичному описі зміни зчеплення та тягових (гальмівних) зусиль в ТЕП при буксуванні (юзі). У тяговому приводі локомотива завжди присутній контакт "колесо-рейка". Саме в ньому відбувається реалізація гальмівних і тягових зусиль. Сила тяги (гальмування) реалізується за допомогою взаємодії коліс і рейок, результат цієї взаємодії кількісно виражається коефіцієнт зчеплення, позначається в технічній літературі символом  $\psi$ .

Коефіцієнт зчеплення  $\psi$  встановлює зв'язок між силою зчеплення колеса  $F_d$ , забезпечує переміщення локомотива по рейках і вертикальним навантаженням коліс  $N$  [1;2]:

$$F_d = \psi \times N. \quad (1.1)$$

Процеси, що відбуваються в контакті колесо-рейка, дуже складні, залежать від безлічі факторів і погано піддаються точному аналітичному опису. Але для дослідження алгоритмів керування ТЕП локомотивів в режимі реалізації граничних зусиль важливо, що в результаті фундаментальних теоретичних, а також експериментальних досліджень математично описано рух колеса при малих прослизаннях, а також отримані експериментальні і наближені аналітичні залежності коефіцієнта зчеплення від прослизання коліс (як для малих, так і для великих прослизань), які називають характеристиками зчеплення (або кривими зчеплення).

Положення робочих точок в різних режимах роботи ТЕП можна проілюструвати на характеристиці зчеплення (рис. 1.1) [2]. Наведена характеристика є усередненою, в реальних умовах вона має стохастичний розкид (рис. 1.2), крім того, крутизна її висхідної і падаючої ділянок залежить від стану рейок (рис. 1.3). Однак усереднена характеристика (рис. 1.1) добре відображає суть процесів і пояснює зв'язок між коефіцієнтом зчеплення  $\psi$  і швидкістю

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ковзання колеса в поздовжньому напрямку  $v_k$ . В даному випадку коефіцієнт зчеплення виражений у відносних одиницях:

$$k = \frac{\psi}{\psi_0}, \quad (1.2)$$

де  $k$  – відносний коефіцієнт зчеплення (у відносних одиницях);

$\psi_0$  – потенційний коефіцієнт.

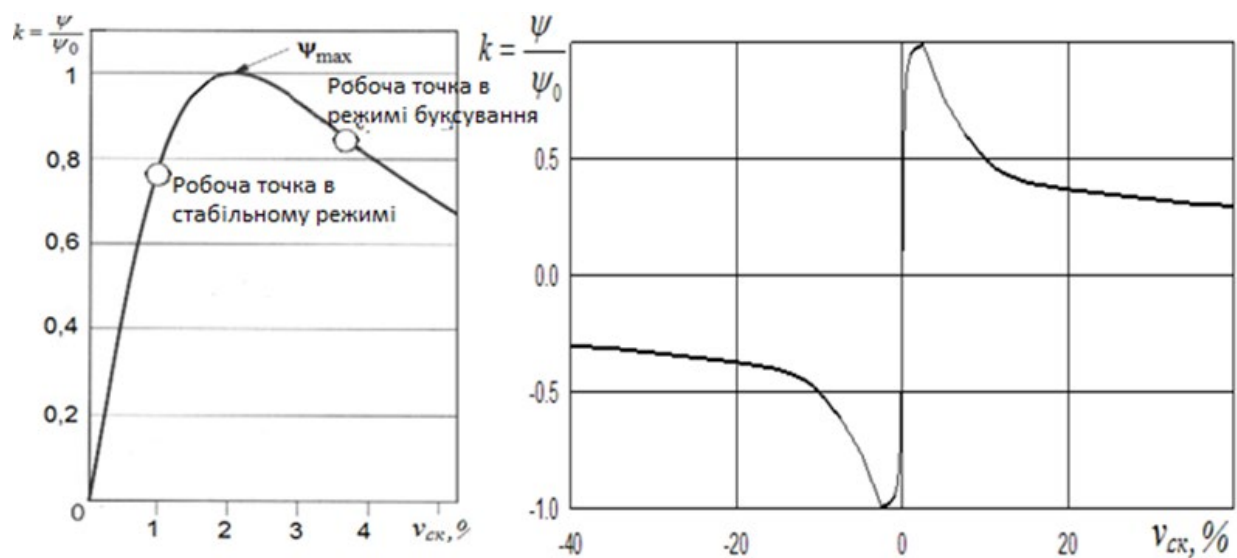


Рисунок 1.1 – Характеристика зчеплення: а) – в режимі з різним розташуванням робочих точок ТЕП; б) – в режимах тяги та гальмування

У поздовжньому напрямку швидкість ковзання колеса може виражатись як в абсолютних одиницях, так і у відсотках. Швидкість ковзання у відсотках визначається за формулою:

$$v_{\text{ковз\%}} = \frac{v_k - v_{\text{л}}}{v_{\text{л}}} 100\%, \quad (1.3)$$

де  $v_k$  – лінійна швидкість точки на ободі колеса (далі швидкість колеса);

$v_{\text{л}}$  – лінійна швидкість локомотива.

На рис. 1.1а) зображена характеристика зчеплення для режиму тяги, в якому для реалізації тягового зусилля швидкість колеса повинна бути трохи більше

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидкості локомотива (перший квадрант координатної площини). У режимі гальмування швидкість колеса повинна бути трохи менше швидкості локомотива, при цьому характеристика має аналогічний вигляд, але розташована в третьому квадранті (рис. 1.1б). При збільшенні швидкості ковзання до критичної позначки (на рис. 1.1а) це  $v_{\text{ковз}} = 2,5 \%$ ) коефіцієнт зчеплення досягає максимуму і стає рівним потенційному коефіцієнту зчеплення  $\psi_0$  ( $k=1; \psi=\psi_0$ ), а реалізоване колесом тягове зусилля  $F$  стає граничним (максимально можливим) за умовами зчеплення.

$$F = N \cdot \psi_0 \cdot k.$$

(1.4)

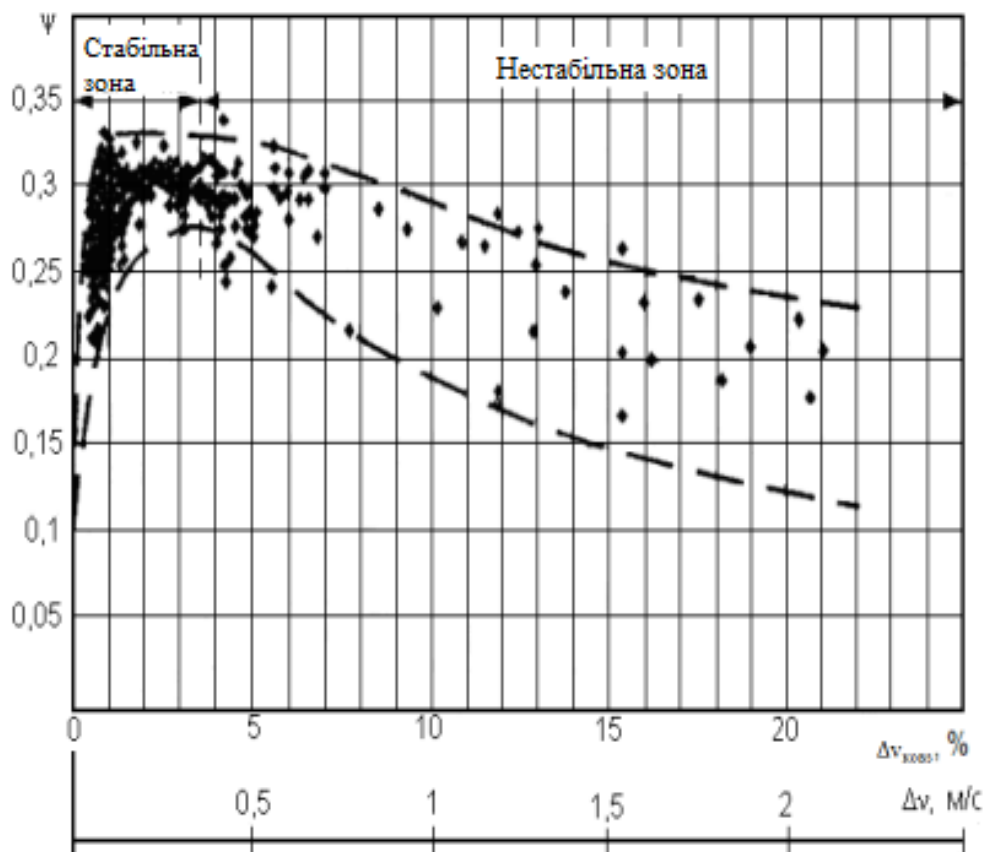


Рисунок 1.2. Виміряні значення коефіцієнта для різного стану рейок

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

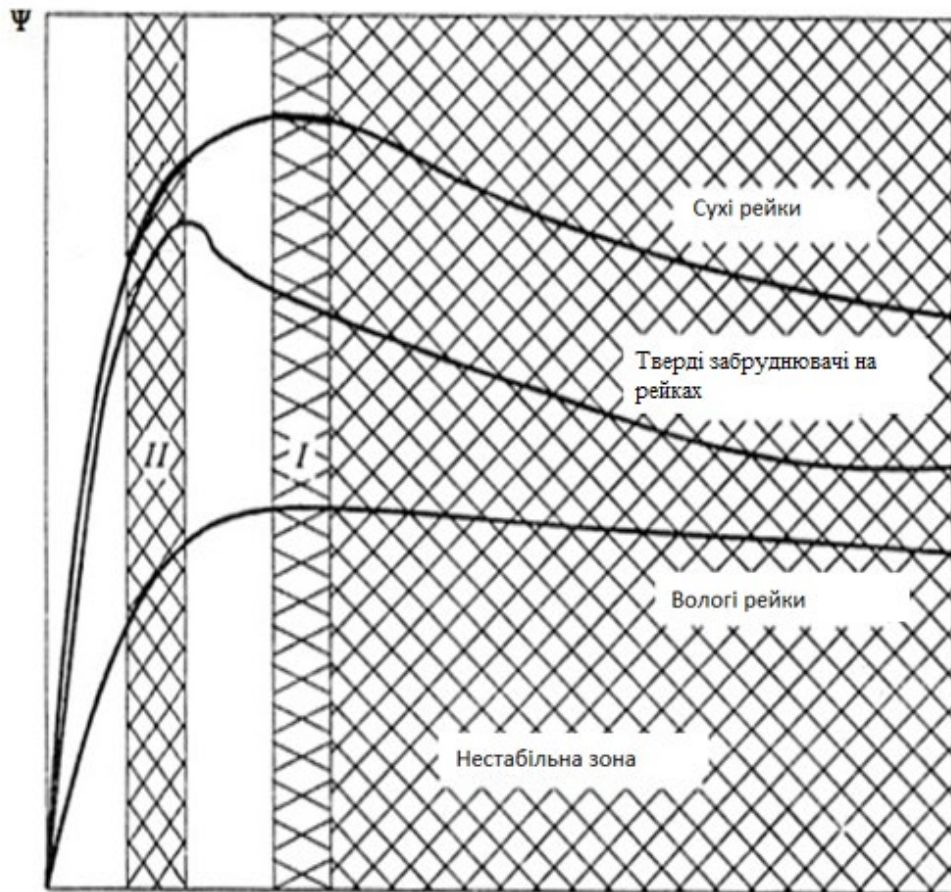


Рисунок 1.3. Вид характеристики зчеплення

При подальшому збільшенні ковзання робоча точка зміщується на падаючу ділянку в зону буксування (рис. 1.1а). Ця ділянка характеристики має негативну крутизну, тобто негативне гасіння коливань, і є нестабільною: крім буксування і зниження тягового зусилля  $F$  (1.4), тут можливе посилення власних форм коливань в механічній підсистемі. Тому можна наступним чином класифікувати динамічні режими роботи ТЕП в залежності від положення робочої точки :

- квазістаціонарні режими - це режими тяги або гальмування, в яких робоча точка знаходиться на висхідній ділянці (стабільна зона, стабільні режими);
- нестаціонарні режими - це режими тяги або гальмування, в яких робоча точка знаходиться на падаючій ділянці (нестабільна зона, нестабільні режими, тобто, режими буксування і юза);
- режими реалізації граничних тягових зусиль - це режими роботи поблизу максимуму характеристики зчеплення (або мінімуму в режимі гальмування).

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В процесі флуктуацій через динамічні явища в ТЕП робоча точка поперемінно потрапляє і у висхідну, і в спадну область графіка.

Збільшення вертикального навантаження  $N$  (в формулах 1.1, 1.4), що передається від колеса локомотива на колії, підвищує максимально можливі тягові зусилля, але обмежується динамічним впливом на шлях. Крім того, робота тягових двигунів, створювані ними електромагнітні моменти, викликають перерозподіл вертикальних навантажень осей (і коліс), яке істотно залежить від конструкції механічної частини [2, 12]. Тому першою досягає граничного зчеплення вісь менш навантажена (вісь, що лімітує) при однаковому значенні електромагнітних моментів двигунів. У той же час у осей з більшою вертикальним навантаженням ще залишається запас по зчепленню, і їх тягові можливості використовуються не повністю.

Необхідно, щоб система управління утримувала ТЕП поблизу максимуму характеристики (рис. 1.1-1.3) для кожної осі, не дуже «заїжджаючи» при цьому на спадаючу ділянку. Це досить складно і вимагає досконалості СУ ТЕП, враховуючи випадковий розкид значень коефіцієнта зчеплення (рис. 1.2), нерівномірність навантажень осей, відмінність діаметрів коліс, відмінність параметрів тягових двигунів, динамічні коливання ланок МЧ, зміна погодних умов та забруднень рейок (рис. 1.3), нерівності.

Тягові двигуни можуть отримувати живлення від загального перетворювача частоти, на рис.1.4, наприклад, АТД кожної з візків електровоза підключені попарно до одного автономному інвертору напруги (АІН) і мають в кожен момент часу однакову частоту і напругу (спільне або групове регулювання) [6].

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		





від схеми СУ можуть аналізуватися струми машин, ЕРС, похідні цих величин та інш., за їхніми зміни, а також порівняно для різних двигунів робляться висновки про виникнення буксування [4; 6; 10; 11; 13; 14; 16].

2. За зміною швидкості роторів та її похідних [12] або за зміною швидкості ковзання коліс [19; 21].

3. За посиленню вібрацій в тяговій передачі в певних частотних діапазонах.

Можливо також поєднання цих способів: 1 і 3; 2 і 3.

Якщо процес буксування (юз) вчасно не виявлений, не зупинений і вже досить розвинувся, то виникає відчутне зниження тягових (або) гальмівних зусиль. На локомотивах, у яких системи захисту від буксування (юза) не володіють необхідною швидкодією і допускають розвиток процесу, досвідчені машиністи можуть підсипати пісок або зменшувати зусилля тяги в разі виникнення вібрації або коливань показання амперметра. Тому найпростішими (але досить грубими) способами захисту від буксування є дозована підсипка піску під колеса (або іншого реагенту, що підвищує зчеплення) і скидання позицій контролера машиніста (або відключення двигунів). Однак, при несприятливому поєднанні факторів вільний розвиток буксування (юза) за 1,6 - 2,5 с може привести до неприпустимих динамічним навантаженням і поломок в тяговій передачі [2]. Так як спочатку принципи виявлення буксування і захисту від буксування відпрацьовувалися на локомотивах з тяговими двигунами постійного струму, як приклад можна привести привід з двигунами постійного струму послідовного збудження, паралельно з'єднаними до тягового генератора через некерований випрямляч (рис. 1.6). Багато серійних вантажних і пасажирських тепловозів мають таку систему ТЕП.

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

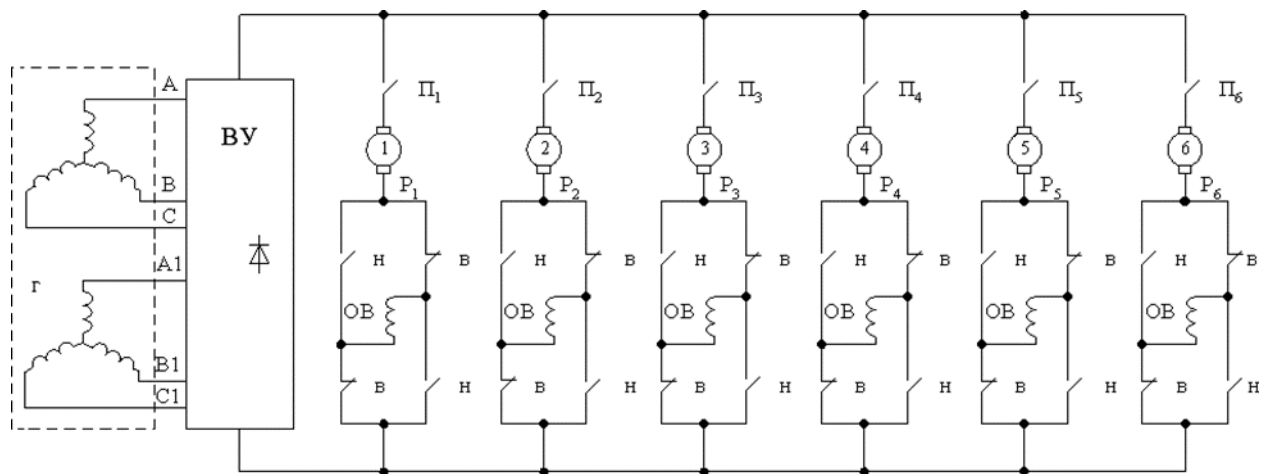


Рисунок 1.6. - Принципова схема ТЭП тепловоза з двигунами постійного струму

Регулювання потужності тягового генератора при відсутності буксування в даних схемах виконується при постійній потужності дизель-генератора для кожної позиції контролера. Захист від буксування здійснюється шляхом зниження потужності генератора при заданій відмінності струмів паралельно включених двигунів. У такого захисту низька чутливість, так як є розкид параметрів ланцюгів двигунів, розкид діаметрів бандажів коліс. Для стандартних уставок даного захисту на тепловозах зниження потужності на першій стадії захисту відбувається при швидкості прослизання коліс 6-8 км/год, на другій стадії - при швидкості прослизання 10-12 км/ч. Сила тяги тепловоза, зокрема, 2ТЕ116, знижується при цьому на 28-30% і 35-38% відповідно.

Для поліпшення протибоксовочних властивостей в ряді робіт [11, 12] пропонувалося підвищити жорсткість характеристик тягового генератора, впливаючи на його систему збудження тим, щоб автоматично перейти при буксуванні від регулювання генератора при підтримці постійної потужності до регулювання при підтримці постійної напруги. Однак, сталості напруги недостатньо, адже, як відомо, двигуни послідовного збудження мають м'які природні характеристики, тому ТЭП з такими двигунами схильні до розвитку розносного буксування при недосконалому захисту.

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>					

Як показано в роботах [2, 4, 6; 15], для підвищення тягових якостей локомотива та запобігання розносного буксування, доцільно підвищувати жорсткість тягових характеристик двигуна, тобто, надавати його характеристикам такий вид, коли мала зміна швидкості двигуна (а відповідно, і коліс) викликає істотне зниження зусилля тяги (або гальмування). При буксуванні двигунів послідовного збудження необхідно для збільшення жорсткості їх характеристик запобігти зниженню магнітного потоку, тобто, підтримувати струм збудження постійним, як у двигунів незалежного збудження [21]. Або для придушення буксування слід, як на тепловозі 2ТЕ25К, знижувати швидкість буксуючих осей, регулюючи напругу двигунів.

Так як для придушення буксування жорсткість природної електромеханічної характеристики двигуна повинна бути вище, ніж жорсткість характеристики зчеплення [2; 4], то в ТЕП для поліпшення властивостей проти буксування доцільно застосовувати двигуни з жорсткими природними механічними характеристиками: асинхронні, синхронні, незалежного збудження, вентильно - індукторні [19].

Найбільшого поширення набули АТД в силу простоти і надійності конструкції, а також ряду інших відомих переваг [6; 19].

Відпрацювання алгоритмів захисту від буксування почалася одночасно з відпрацюванням алгоритмів управління ТЕП на перших локомотивах зі скалярним керуванням АТД [13; 16; 18]. На рис. 1.7 як приклад приведена функціональна схема для ТЕП осі електровоза ВЛ80<sup>А</sup> - першого електровоза з АТД.

У силовому каналі ТЕП ВЛ80<sup>А</sup> застосовані керований випрямляч (УВ), автономний інвертор напруги (АІН), виготовлені з використанням звичайних тиристорів. Для вентилів УВ і АІН керуючі сигнали виробляються відповідними блоками управління СУ: (БУВ) і (БУІ). Команди на завдання величини напруги надходять в БУВ з контролером машиніста (КМ), задати величину напруги потрібно для створення необхідної сили тяги.

					<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

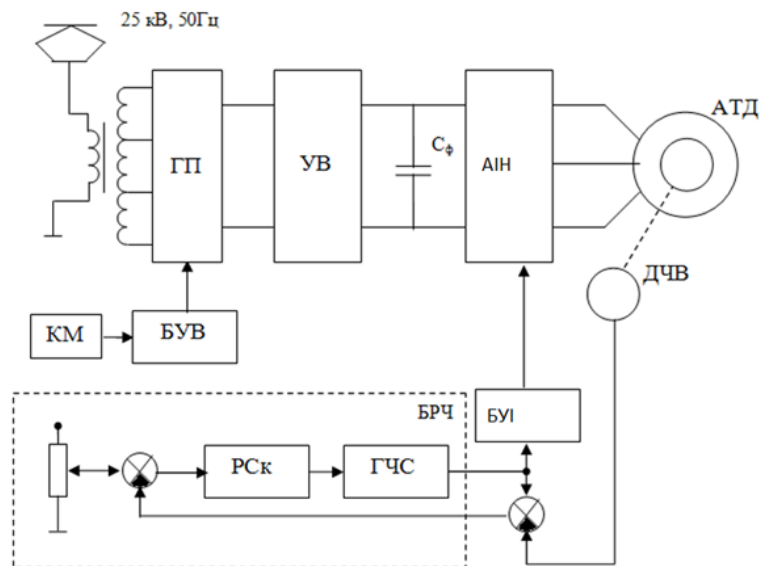


Рисунок 1.7 - Функціональна схема для ТЕП електровоза ВЛ80<sup>А</sup> з індивідуальним регулюванням АТД

Блок регулювання частоти (БРЧ) виконує регулювання частоти напруги, забезпечує постійну величину абсолютного ковзання  $f_2$  в процесі розгону. Це виконується з використанням порівняння приведеної до частоти напруги статора частоти обертання ротора  $f_{об}$  з необхідним значенням частоти напруги (струму) статора  $f_1$ , необхідної для підтримки заданої величини  $f_2$ .

Якщо ковзання не відповідає заданому, то генератор частоти (ГЧС) коректує  $f_1$  в автоматичному режимі. Швидкість (кутову частоту) обертання ротора вимірює датчик частоти (ДЧ). Момент АТД регулюється шляхом зміни амплітуди напруги статора АД за допомогою УВ за сигналами КМ [17]. Сигнал протибуксувального захисту також впливає на величину вихідної напруги УВ [7].

Схема (рис. 1.7) наведена спеціально, щоб проілюструвати першу реалізацію скалярного управління АТД на локомотиві і відзначити її недоліки: не контролюється стан магнітної системи АТ, що знижує точність і швидкодію; відсутній облік зміни параметрів двигуна при зміні температури і коригування абсолютного ковзання; в схемі не передбачено автоматичне регулювання моменту АД при буксуванні, машиніст сам виконує цю функцію, спостерігаючи величину струму АД на амперметрі і змінюючи вихідну напругу УВ.

											Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>						

Схеми управління ТЕП з АТ удосконалювалися, як в нашій країні, так і на зарубіжних локомотивах [6; 7; 15; 18; 19; 20]. Цьому сприяв розвиток елементної бази силової електроніки - поява потужних замикаючих тиристорів (GTO), потім силових біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT). Одночасно йшов розвиток теорії електроприводу - створення систем векторного керування АТД та систем розривного керування, зокрема, систем прямого керування моментом (DTC). Разом з тим, необхідно відзначити, що системи скалярного керування успішно застосовуються в ТЕП і в даний час в поєднанні з різними видами широтноімпульсної модуляції (ШІМ). Так, наприклад в асинхронному тяговому електроприводі тепловоза 2ТЭ25А [88; 90], де кожен АТД живиться від індивідуального АІН на IGBT, в ряді режимів використовується скалярне управління АТД в поєднанні з векторної ШІМ (SWM).

Для розуміння роботи ТЕП з АТ при виникненні буксування або юза необхідно враховувати, що незалежно від способу і системи управління, в АТД завжди існує обумовлений принципом дії асинхронного двигуна зв'язок [6]:

$$f_1 = f_{06} \mp f_2.$$

(1.5)

У формулі (1.5) "+" застосовують в режимі тяги; «-» застосовують в режимі гальмування АД. Частота  $f_2$  в залежності від прийнятого закону регулювання і умов роботи АТД може бути або постійною, або змінюватися.

Найпростішим як у тягових, так і в загальнопромислових електроприводах є закон скалярного управління:

$$\frac{U_s}{f_1} = \text{const},$$

(1.6)

- відомий закон М.П. Костенко [6], який використовується в зоні пуску АД при стабільності моменту.

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коли в ТЕП з АТ виникає буксування, то  $f_{об}$  збільшується, і якщо при цьому частота напруги  $f_1$  регулюється відносно швидкості обертання буксуючого двигуна, то, навіть при сталості амплітуди напруги  $U_s$ , механічна характеристика АТД (і тягова характеристика) буде м'якою, як у двигуна послідовного збудження (або практично абсолютно м'якою, якщо  $U_s$  продовжує збільшуватися, дотримуючись закон (1.6)). При юзі аналогічно для гальмівної характеристики.

Тому в системах захисту від буксування (і юза), щоб забезпечити роботу АТД по природною жорсткої характеристиці, яку двигун має при  $U_s = \text{const}$ ;  $f_1 = \text{const}$ , прийнято регулювання (ведення) частоти по швидкості АД, який обертається повільніше інших (НЕ буксує) - це в режимі тяги, - і за швидкістю АД, який обертається швидше за інших (у нього немає юза), - це в режимі гальмування.

У ряді робіт з цією ж метою пропонується ведення частоти за швидкістю локомотива [13]:

$$f_1 = f_{л\_вр} \pm f_2, \quad (1.7)$$

де  $f_{л\_вр}$  - швидкість локомотива, приведена до частоти струму статора.

Це дозволяє мати стійку точку відліку і забезпечити жорсткість характеристик при буксуванні всіх осей. Такий підхід може застосовуватися і при індивідуальному, і при спільному управлінні АТД. В цьому випадку розносне буксування запобігає, але фрикційні автоколивання можуть виникати.

Виникнення релаксаційних автоколивань проілюстровано в роботах (рис. 1.8), в даному випадку управління скалярне, частота струму обчислюється за швидкістю локомотива, показані процеси в ТЕП першої осі.

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

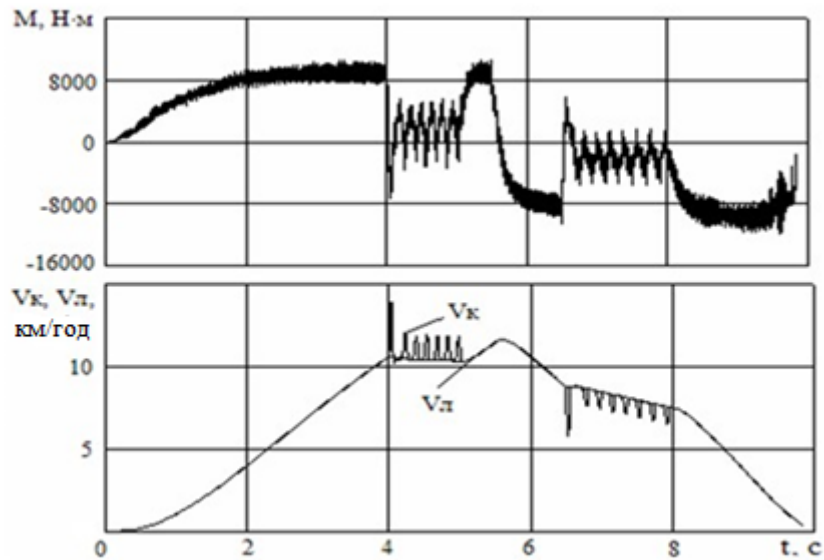


Рисунок 1.8 - Результати моделювання розгону електричного гальмування чотирьохвісного локомотива при скалярному керуванні та пониженні потенціального коефіцієнта зчеплення  $\psi_0$  до 0,1 в інтервалі часу;  
 $M$  – електромагнітний момент АДТ;  $V_k$  – швидкості колеса осі,  $V_l$  – швидкість локомотива

Релаксаційні автоколивання обумовлені тим, що робоча точка при буксуванні періодично потрапляє на спадаючу гілку характеристики зчеплення, при цьому зменшується навантаження (момент опору) АДТ, що викликає зниження електромагнітного моменту за природній характеристиці АТ. При цьому прослизання коліс зменшується, зчеплення відновлюється, а далі разом з цим збільшується електромагнітний момент відповідно до заданого значенням  $f_2$  у формулі (1.6), і потім зчеплення зривається знову, якщо не покращилися погодні умови (або СУ не вжито заходів для зниження моменту). Залежно від швидкості локомотива, а також нахилу спадаючого ділянки характеристики зчеплення частота релаксаційних авто коливань становить 4 ... 8 Гц. Якщо в МЧ ТЕП є висока демпфірування, то автоколивання можуть затухати.

Накладатися на релаксаційні коливання можуть інші форми фрикційних автоколивань, наприклад, коливання лівого і правого колеса з вузлом на осі

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



постійного струму, при підвищенні ковзання коліс вище заданої величини спрацьовує протибоксовочний захист, при придушенні буксування враховується не тільки сигнал прослизання, а й сигнал прискорення ротора АТД

$$f_2 = f_{20} - k_s (f_{об} - f_{об\_оп}) - k_{sa} \varepsilon, \quad (1.9)$$

де  $k_{sa}$  – коефіцієнт пропорційності для регулювання абсолютного ковзання по прискоренню;

$\varepsilon$  – кутове прискорення ротора АТД (визначається з використанням відфільтрованого сигналу  $f_{об}$ ).

При цьому частота напруги статора може регулюватися за законом (1.5) або (1.7), напруга по (1.6) або за висловом.

$$U_s = U_0 + k_u \cdot f_1, \quad (1.10)$$

де  $U_0$  - початкова амплітуда статорної напруги;

$k_u$  - спеціальний коефіцієнт пропорційності для зміни напруги.

В області розробки ТЕП з АТ провідні позиції в світі займають такі фірми як Siemens (Німеччина), Bombardier Transportation (Швейцарія, Німеччина, Швеція), GEC Alstom (Франція, Англія), Міцубісі (Японія).

На початковому етапі розвитку ТЕП з АТ скалярні СУ при живленні АТД локомотивів від автономних інверторів напруги (АІН) переважно використовувалися фірмою Bombardier Transportation, застосовувалися вони також у вітчизняних СУ АТД з індивідуальним регулюванням двигунів.

Спільне регулювання АТД на вітчизняному локомотиві з автономним інвертором струму (RTA) вперше застосовано на маневровому тепловозі ТЕМ21. Цей тепловоз виготовлений і випущений в 2001 році на БМЗ. У разі застосування звичайних тиристорів перетворювач з АІТ реалізується простіше, ніж статичний перетворювач з АІН, однією з основних причин застосування силової схеми з

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інвертором струму послужило саме це, хоча не можна заперечувати, що схеми з АІТ мають і ряд інших переваг.

На рис. (1.10) представлена функціональна схема ТЕРП візка ТЕМ21. У неї входить дизель-генератор (Д - СГ), керований випрямляч (УВ), реактор  $L_d$ , і АІТ; два АТД двовісного візка підключені до АІТ паралельно.

Блоком управління випрямляча (БУВ) формуються сигнали управління для УВ, блоком управління інвертора (БУІ) - сигнали управління АІТ.

Від контролера машиніста (КМ) надходить сигнал в блок завдання струму (БЗТ), і до нього ж приходить сигнал від блоку обчислення моменту (БОМ). БЗТ реалізований у вигляді електронної таблиці  $I_d = f(M_3)$ , що враховує також положення КМ. У БОМ обчислюється завдання моменту  $M_3$  з урахуванням вільної потужності дизеля, яка визначається за допомогою регулятора потужності (РМ). СУ ТЕРП по двох каналах регулює дві основні величини: модуль вектора статорного струму і частоту статорної струму АД. Регулятором струму (РС) виконується регулювання статорної струму по відхиленню за допомогою управління випрямлячем.

Регулювання частоти статорної струму до швидкості 10 км/год виконується за допомогою регулятора модуля потокозчеплення ротора, це на схемі не показано; коли швидкість перевищує 10 км/год використовується регулятор модуля ЕРС

					<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

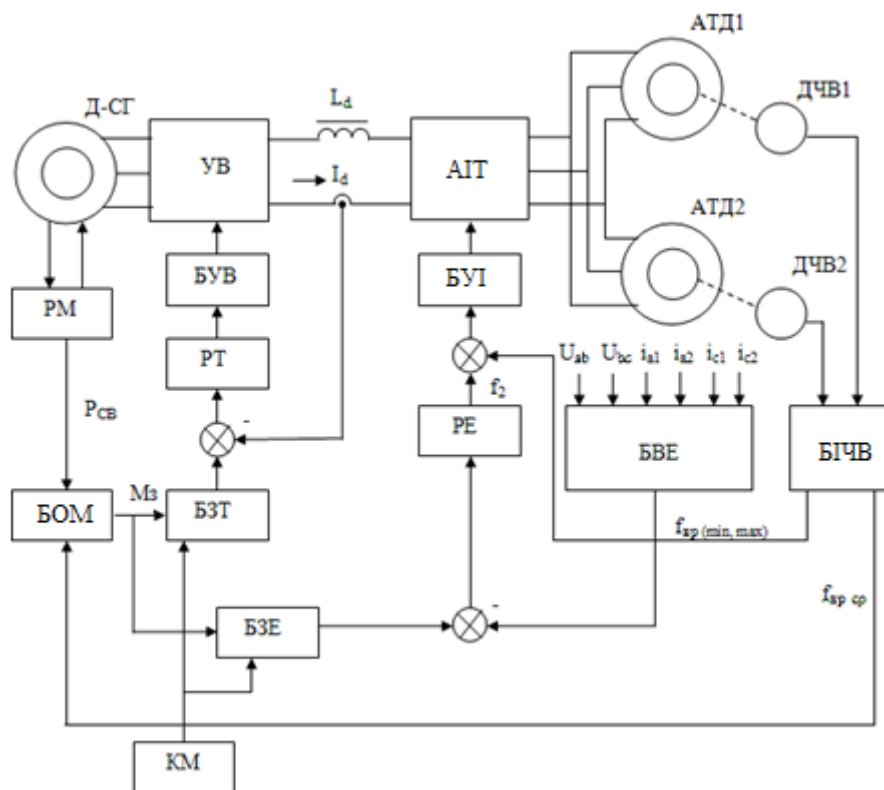


Рисунок 1.10 – Функціональна схема ТЕП тепловоза ТЕМ21 зі спільним регулюванням АТД візка

Задане значення ЕРС, індукованої полем ротора в статорі (яке будемо називати ЕРС ротора) визначається блоком завдання ЕРС (БЗЕ) по позиції КМ і величиною МЗ. Певне в БЗЕ завдання ЕРС порівнюється з фактичним значенням ЕРС, яке визначається в БВЕ за результатами вимірювання струмів і напруг, порівнюється із заданим, обчисленим в БУІ. Найявна неузгодженість надходить до регулятора ЕРС (РЕ), з якого знімається необхідне абсолютне ковзання  $f_2$ , складається з частотою обертання ротора, яка визначається ДЧВ і попередньо приводиться до частоти струму, таким чином, за висловом (1.5) визначаємо задану частоту  $f_1$ .

Для режиму тяги в СУ використовується мінімальна частота обертання АД, для режиму гальмування - максимальна, там самим поліпшуються протитюзова і протибуксовочна властивості.

Для захисту від буксування в разі зниження коефіцієнта зчеплення

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>				

зменшується абсолютне ковзання  $f_2$ . Подібні СУ використовувалися на електропоїзді ЕНЗ (Росія), електровозі 182001 (ФРН). Схеми з АТ при спільному регулюванні АТД успішно застосовувалися за кордоном і фірмою Siemens [6].

Глибокий аналіз особливостей паралельної роботи АТД і автономних інверторів на локомотивах виконаний в роботі [6]. Зокрема, показано вплив відмінності діаметрів колісних пар на розподіл струмових навантажень АТД і тягові зусилля. На рис.1.11 показані АТД1, АТД2 візка через зубчасту передачу з'єднані через редуктори з колісними парами, діаметри коліс яких рівні  $D_{к1}$  і  $D_{к2}$ .

За нормативами для колісних пар діаметри бандажів можуть відрізнятися максимально на 10 мм. Відзначається [6], що при обчисленні частоти  $f_1$  за формулами (1.5), краще в СУ використовувати частоту обертання АТД тієї колісної пари, яка має менший діаметр, так як в цьому випадку розподіл навантаження між АТД візки буде більш рівномірним, ніж при сигналі від АТ колісної пари, що має більший діаметр. Сила тяги при цьому, що реалізується колесами з меншим діаметром, буде менше, ніж розвивається колісною парою з великим діаметром.

Це покращує протибоксовочну властивість локомотива, так як знижує ймовірність буксування колісної пари з великим діаметром.

В роботі [6] зазначається також, що в умовах експлуатації розбіжність навантажень паралельно працюючих тягових двигунів може бути викликана не тільки різницею діаметрів коліс, але і перерозподілом при роботі АТД вертикальних навантажень на колісні пари локомотива.

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

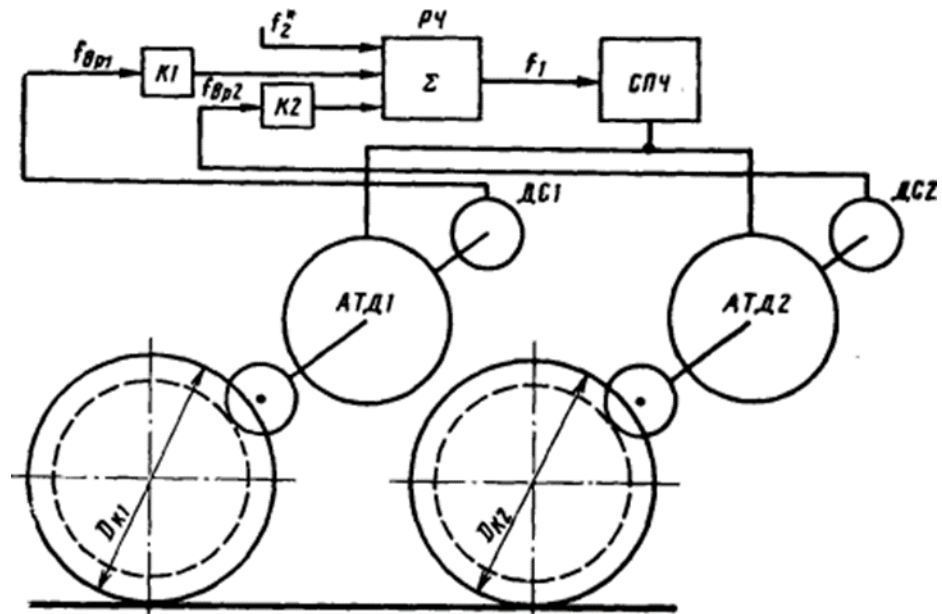


Рисунок 1.11 - Функціональна схема спільного регулювання АТД візка

Вирівнювання діаметрів колісних пар буде поступово відбуватися в експлуатації, так як колісна пара більшого діаметра реалізує великі тягові зусилля, і тому вона має підвищений знос [6]. Цікаво також те, що зі збільшенням навантаження ТЕП (і прослизання коліс) вплив різниці діаметрів бандажів колісних пар знижується, а вплив нерівномірності вертикальних навантажень підвищується, так як збільшуються електромагнітні моменти двигунів, якими сама ця нерівномірність і викликана.

У ряді робіт розглянуті системи векторного керування ТЕП з АТ при харчуванні від АІН, в якості прикладу можна навести векторну систему управління зі спільним регулюванням двох АТД (рис. 1.12) при постійному потокозчеплення ротора.

В даній схемі є характерним для векторних систем роздільне регулювання потокозчеплення ротора і електромагнітного моменту АТД, що забезпечує високо динамічною управління моментом двигуна в нестационарних режимах.

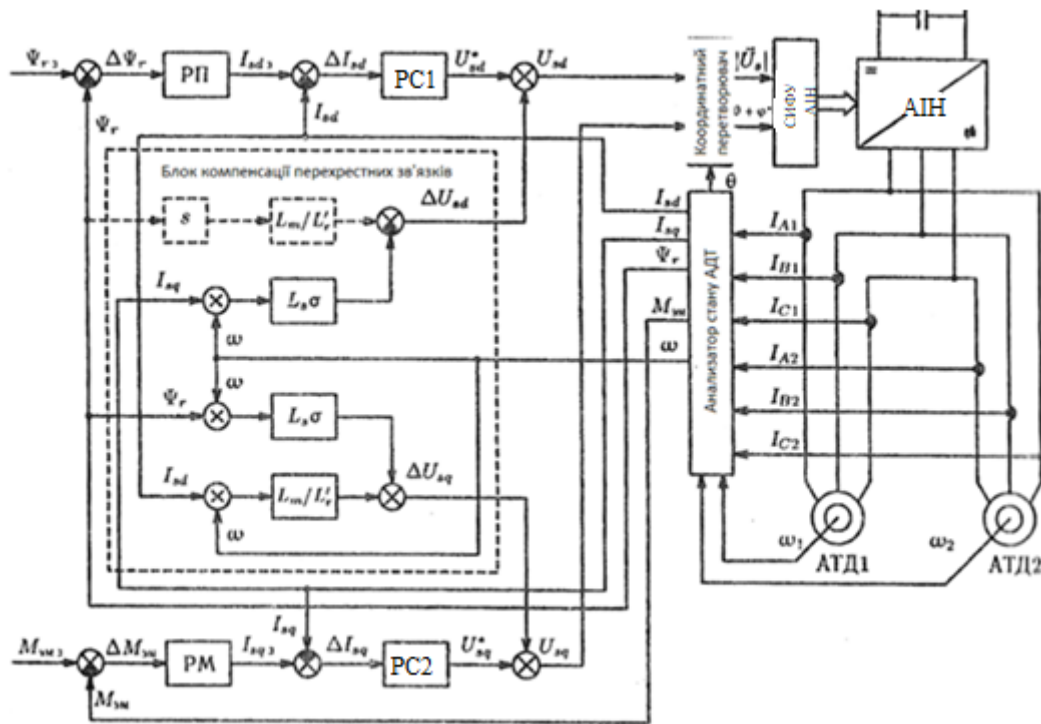


Рисунок 1.12 - Функціональна схема векторної СУ ТЭП візка локомотива при спільному регулюванні АТД, що живляться від АІН

В системі з використанням датчиків і аналізатора стану визначаються змінні стану кожного двигуна і далі з урахуванням частоти обертання роторів вибирається, частоту обертання якого АТ використовувати в СУ. Після цього на вхід відповідних блоків системи автоматичного регулювання надходять сигнали струму статора, поточозчеплення, частоти обертання цього двигуна.

Автором запропонований спосіб регулювання декількох АТД, підключених паралельно до одного АІН, при якому в режимі тяги в СУ ТЭП пропонується вести управління по двигуну з найменшою частотою обертання, як і в роботах [6; 13; 16; 18], щоб двигуни з більшою частотою обертання при досягненні межі зчеплення починали працювати по природній характеристиці.

Але, разом з тим, автор в роботах вказує, що в механічній частини електровозів швидкість обертання роторів АТД може мати коливання з частотою декількох Герц, і це вимагає з тією ж частотою передавати управління від одного двигуна до іншого, що при передачі управління при рівності частот обертання

АТД призводить до коливань в електромагнітній системі, в зв'язку з чим в цьому способі пропонується передавати управління при рівності електромагнітних моментів двигунів.

За основну ознаку початку буксування в приймається збільшення значення прослизання колісної пари, а за додатковий критерій її кутове прискорення. Вказується, що в якості опорного сигналу можна використовувати найменшу частоту обертання АД, але в цьому випадку, якщо буксують усі колісні пари, буксування придушити не вдається.

Переважно використовувати сигнал лінійної швидкості локомотива, який можна отримати, застосувавши системи космічного позиціонування (GPS, ГЛОНАС) або відійдуть методи, засновані на вимірі нерівномірності структури шляху. З метою придушення буксування пропонується зниження завдання на момент в СУ ТЕП (рис. 1.12) з певною інтенсивністю, поки не сповільниться до потрібного рівня обертання колісної пари (КП), про що буде свідчити зміна знаку прискорення КП. Далі електромагнітний момент можна підвищувати з заданою інтенсивністю.

Крім розглянутих алгоритмів захисту від буксування існують і застосовуються на зарубіжних локомотивах алгоритми, спеціально виводять ТЕП на межу по зчепленню, звані також алгоритмами реалізації реального (або потенційного) коефіцієнта зчеплення.

## 1.2 Алгоритми реалізації потенційного коефіцієнта зчеплення

Алгоритми, що відносяться до цієї групи, припускають спеціальне регулювання тяги і гальмування з високим (максимально можливим) використанням сил зчеплення.

Це важливо для ведення великовагових складів, забезпечення руху до необхідного прискорення і уповільнення.

Крім того, це дозволяє здійснити зрушення з місця в важких погодних умовах або з неповною кількістю тягових двигунів при виникненні відмов в ТЕП.

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Так на дослідному вітчизняному тепловозі 2ЕВ120 з індивідуальним регулюванням АТД осей, що складається з двох чотиривісних секцій для компенсації зниження тяги при відмові АТ однією з осей введений бустерний режим зрушення з місця, а також розгону, який електровозу дозволяє, як подолати ділянки зі складними підйомами при семи тягових осях, так і зрушити поїзд з місця після вимушеної зупинки на складному підйомі [96]. Максимальна сила тяги при рушанні для електровоза ЕП10 - 375 кН (в бустерний режимі - 425 кН). Тягове електрообладнання для цих локомотивів поставляється компанією Bombardier Transportation.

Зарубіжний досвід [19] говорить про те, що найкращі тягові і гальмівні якості дозволяють отримати СУ, що передбачають регулювання і контроль ковзання коліс в контактні колесо-рейка. Такі системи змінюють електромагнітний момент двигунів, погоджуючи обертаючі моменти регульованих АТД з реальними умовами зчеплення коліс осей, за якими ведеться управління. Вони використовуються і при спільному, і при індивідуальному регулюванні артеріального тиску ТЕП.

В даний час можна умовно виділити кілька основних алгоритмів, які використовуються в таких системах:

- 1) безпосереднє регулювання прослизання коліс в заданому діапазоні;
- 2) самоналаштування на максимум характеристики зчеплення (екстремальне регулювання);
- 3) регулювання прослизання або екстремальне регулювання з придушенням фрикційних автоколивань;
- 4) періодичне наближення до максимуму характеристики зчеплення (наближене «намацування» максимуму).

Необхідно відзначити, що для реалізації всіх чотирьох перерахованих варіантів необхідно високою динамічною регулювання електромагнітного моменту АТД по відхиленню, яке не можуть забезпечити скалярні СУ. Для цього потрібні СУ АТД з найбільш точні та високою динамічності, в роботах обґрунтовано, що для використання ТЕП потенційних умов зчеплення не менше, ніж на 90% постійна

						<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

часу електромеханічного перетворювача (до якого входять статичний перетворювач з СУ і живиться від нього АТД), в залежності від параметрів механічної частини ТЕП повинна бути менше 4 - 5 мс

Нагадаємо, що СУ АТД зазвичай поділяють на три великі групи (рис. 1.13), які розташовані на малюнку в порядку створення (появи) відповідних систем.



Рисунок 1.13 - Основні типи СУ АТД

У скалярних системах регулюються тільки модулі базових векторів АТД; в векторних СУ регулюється модуль і точне положення векторів на площині координат; в системах розривного керування регулюється модуль і сектор площині координат, в якому знаходиться контрольований вектор.

Порівняння основних характеристик трьох названих типів СУ АТД приведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Технічні характеристики СУ АТД

Вид СУ Параметр	Скалярна СУ по принципу $U/F=\text{const}$ (без ДЧВ)	Векторна СУ з підлеглим регулюванням (с ДЧВ и ШИМ)	СУ з розривним керуванням	
			ДТС (с ДЧВ)	ДТС (без ДЧВ)
Час наростання	150	10...20	1...2	1...2
Статична помилка	$\pm (1...3)$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm (0,1...0,5)$
Динамічна помилка	3	0,3	0,1	0,4

Порівняння показує, що найкращими властивостями по швидкодії і точності наділені системи ДТС при наявності датчика частоти обертання, тому вони можуть бути використані в ТЕП з АТ для високо динамічного регулювання

моменту і швидкості АТД в нестационарних режимах. Крім того, вони менш чутливі до збурень і зміни параметрів, ніж векторні. Подібні системи, власне, і були вперше запропоновані для тягового електроприводу М. Депенброком і в даний час знаходять застосування в зарубіжному тяговому електроприводі.

Як приклад розглянемо принципи функціонування декількох систем реалізації граничного коефіцієнта зчеплення. Функціональна схема ТЕП з регулюванням прослизання і придушенням коливань наведена на рис. 1.14. В системі управління є зовнішній контур регулювання по відхиленню частоти обертання АТД і внутрішній контур управління моментом. Для визначення завдання частоти обертання АД, наведеної до лінійної швидкості колеса, виконується інтегрування завдання прискорення. Проводиться вибір завдання прискорення між двома значеннями:  $a_0$  і  $a_1$ . Причому  $a_0$  в тяговому режимі менше прискорення локомотива  $a_{л}$  на величину  $\Delta a$ , а  $a_1$  – більше на величину  $\Delta a$  ( в режимі гальмування навпаки). Вихідний сигнал регулятора частоти є входним для внутрішнього контуру управління моментом, при цьому в СУ верхнього рівня передбачене обмеження моменту в залежності від позиції контролера машиніста.

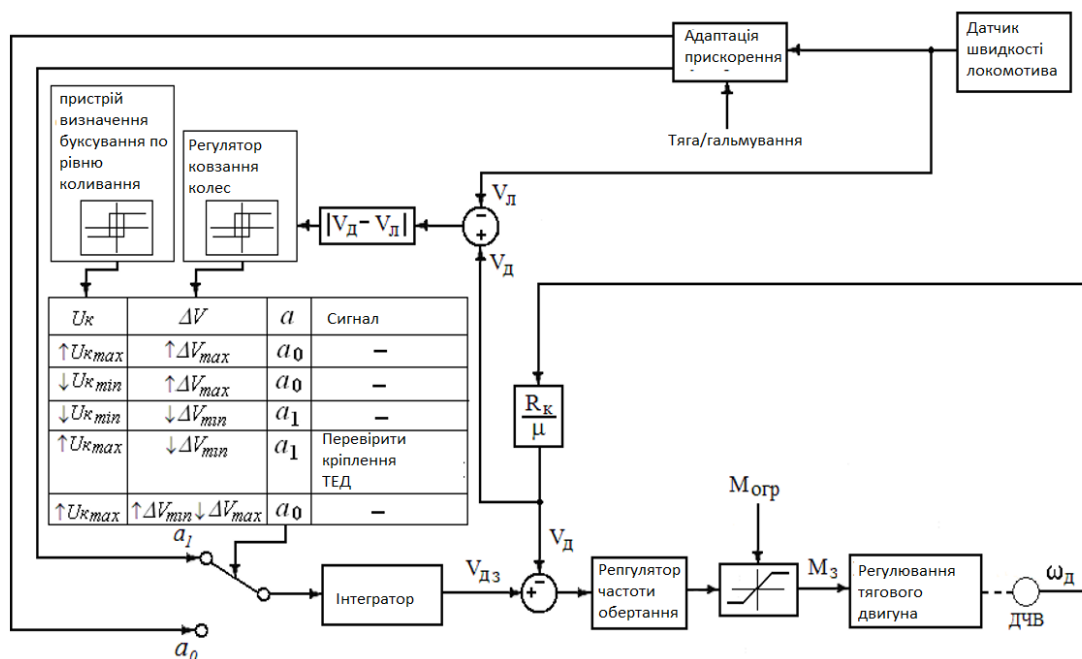


Рисунок 1.14 – Функціональна схема СУ ТЕП з регулюванням прослизання

СУ здійснює вибір між величинами прискорення  $a_1$  і  $a_0$  по логічній таблиці перемикачів (рис. 1.14), на яку передаються сигнали релейного регулятора ковзання коліс і пристрої контролю коливань, також має релейний характеристику і відслідковує рівень коливань корпусу АТ в заданих частотних діапазонах. Значення величини  $\Delta a$ , яке складається з  $a_{\Delta}$  або віднімається з величини прискорення локомотива в процесі регулювання прослизання, адаптується до маси складу за методикою, прийнятою на зарубіжних локомотивах, заснованої на зіставленні сили тяги і вимірюваного прискорення. У блоці регулювання моменту АТД, на який надходить завдання моменту  $M_3$  з регулятора швидкості (рис. 1.14) має виконуватися найбільш динамічною СУ АТД (табл.1.1). Регулятори швидкості (частоти обертання) при цьому пропонується використовувати пропорційні (П), пропорційно-інтегральні (ПІ) і навіть модальні.

Таким чином, швидкість колеса періодично зростає по відношенню до швидкості локомотива, збільшуючи прослизання і коефіцієнт зчеплення (рис. 1.1) до максимального (і злегка заходячи в нестабільну зону, де знижується коефіцієнт зчеплення і збільшуються вібрації), після чого швидкість колеса знижується, знову зменшуючи прослизання, підвищуючи коефіцієнт зчеплення і пригнічуючи вібрації в ТЕП.

Значення прослизання (мінімального і максимального) встановлюються попередньо на основі натурних випробувань, а потім СУ може виконати їх адаптацію в процесі руху локомотива в залежності від швидкості. У свою чергу необхідне для роботи СУ значення лінійної швидкості можна визначати побічно, використовуючи так звану псевдобігункову вісь, або вимірювати спеціальним датчиком. З використанням значень лінійної швидкості в задані проміжки часу обчислюється прискорення локомотива, визначати його шляхом диференціювання швидкості недоцільно, так як це може призводити до великих погрешностей.

Так як оптимальне прослизання залежить від багатьох факторів, і, крім того, прослизання вельми складно вимірювати, застосовується також екстремальне регулювання (самоналаштування на максимум).

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У самоналагоджувальних системах регулювання ковзання здійснюється поступовим збільшенням електромагнітного моменту АД і по ходу цього збільшення СУ фіксується перехід колісної пари з пружного (при малих прослизаннях на висхідній гілці) в дійсне ковзання (на падаючу гілку характеристики, рис 1.1). Сам перехід фіксується по відхиленню завдання моменту  $M_{дз}$  від екстремального значення, що визначається за допомогою блоків «накопичувач екстремальних значень» і «логіка пошуку» на задане значення  $\Delta M$  (рис. 1.15). При цьому СУ реагує на що стався перехід зниженням електромагнітного моменту, що допомагає утримати колеса в області максимуму зчеплення. Це відбувається до тих пір, поки сила тяги не стане менше граничної по зчепленню. Подібні системи екстремального регулювання випробовувалися за кордоном не тільки на електровозах (серій 120, 182 001), а й на трамвайних вагонах і успішно застосовуються.

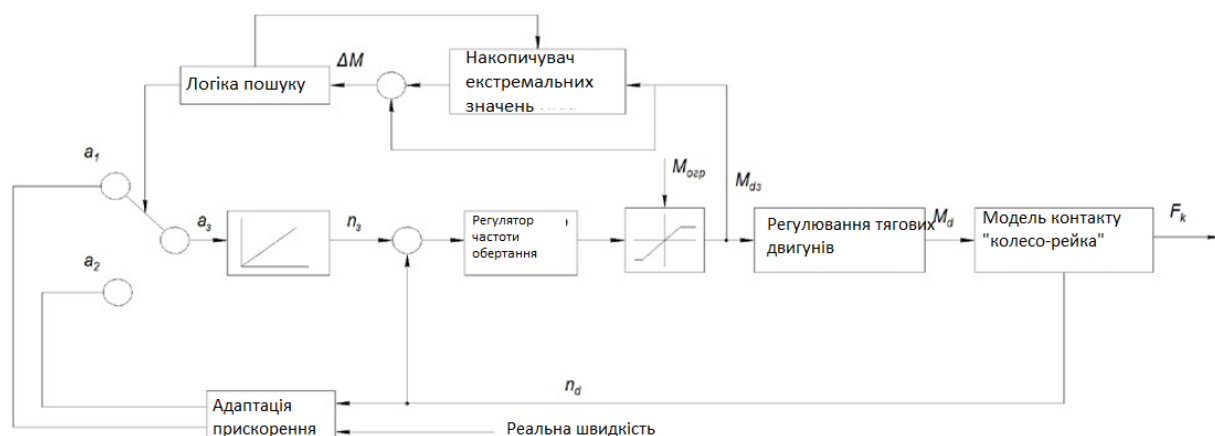


Рисунок 1.15 - Схема, яка пояснює принцип екстремального регулювання

При індивідуальному управлінні АТ в системах з регулюванням прослизання або самоналагоджувальних на екстремум системах на межу по зчепленню виводиться ТЕП кожній осі. При спільному управлінні двигунами, які підключені до одного інвертору, можливі різні способи і алгоритми управління: по двигуну першої осі візка; по двигуну другий осі візка; по найбільш швидко обертається двигуну; з урахуванням енергозберігаючого регулювання

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потокзчеплення статора і ін., в тому числі, розроблені і досліджені при безпосередній участі автора.

У ряді робіт з метою зниження зносу елементів механічної частини ТЕП автори пропонують не виходити на максимум зчеплення, де  $k = 1$  (рис. 1.1) і ймовірно потрапляння ТЕП в нестабільну зону автоколивання, а регулювати ТЕП при  $k = 0,8-0,9$ . У даних системах знижується швидкість збільшення моменту АТД; в разі непередбаченого збільшення прослизання коліс передбачено активне придушення коливань тягової передачі.

Існують і менш точні алгоритми періодичного наближення до максимального використання сил зчеплення. Їх можна пояснити на основі рис. 1.16, де умовно зображені максимальний момент, який можна реалізувати в даних умовах зчеплення (екстремум кривої кріпа), і момент АТД, який забезпечує СУ.



Рисунок 1.16 - Опис алгоритмів наближеного «намацування» максимуму характеристики зчеплення

Спочатку момент збільшується, колесо проходить висхідну частину кривої кріпа, екстремум і далі потрапляє на падаючу частину кривої, ця подія фіксується, і момент АТД зменшується, але зменшується не до того рівня, з якого почався його зростання, а до більшого, потім знову все повторюється. Виходить пилоподібна крива, «ялинка» (рис. 1.16), причому з великою частотою (близько 100 Гц). Кожного разу момент знижується менше, ніж минулого. Коли розмах цих

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>				

коливань зменшується до деякої заданої величини, момент знижується в останній раз, і деякий час локомотив спокійно їде з тим же завданням моменту (це горизонтальні ділянки на рис. 1.16). Але дуже скоро СУ починає «турбуватися», чи не покращали умови зчеплення? І знову різко піднімається момент, і все починається спочатку. При цьому СУ прагне уникати резонансних частот систем колесо-колесо, колісна пара-ротор і ін.

Подібні алгоритми були випробувані при випробуваннях електровоза ЕП10 і гібридного маневрововивізного тепловоза ТЕМ9Н, але вони супроводжуються істотними вібраціями і динамічними навантаженнями в механічній частині, вимагають спеціальної жорсткої конструкції механічної передачі і тому були впроваджені на даних локомотивах.

### **1.3 Класифікація алгоритмів управління ТЕП в режимі реалізації граничних зусиль і постановка задачі**

Підсумовуючи вищевикладений матеріал, можна класифікувати алгоритми управління ТЕП в режимі реалізації граничних тягових зусиль, розділивши їх за принципом функціонування на дві великі групи:

- 1) алгоритми захисту від буксування і юза;
- 2) алгоритми реалізації потенційного коефіцієнта зчеплення (рис. 1.17).

Алгоритми першої групи починають функціонувати тільки в разі зміщення робочої точки на спадну гілку характеристики зчеплення в зону буксування і завжди включають в себе два етапи: а) виявлення буксування (або юза); б) придушення надлишкового проковзування (повернення робочої точки на висхідний ділянку). Алгоритми другої групи вбудовуються в систему регулювання швидкості тягових двигунів, забезпечуючи при необхідності реалізацію граничного коефіцієнта зчеплення.

Реалізація ТЕП граничного коефіцієнта зчеплення при індивідуальному регулюванні АТД найбільш відпрацьована, виводить кожну вісь на межу по зчепленню і дозволяє отримати максимальні тягові зусилля. Але, в той же час наявна ля АТД можливість паралельного включення (яке іноді називаю

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



3. Розробка математичної і комп'ютерної моделі СУ ТЕП з спільним управлінням паралельно включених АД на межі зчеплення.

4. Розробка для механічної підсистеми ТЕП гібридного маневрово-вивізного тепловоза ТЕМ9Н математичних і комп'ютерних моделей і аналіз на їх основі динамічних процесів в ТЕП.

5. Створення електромеханічної комп'ютерної моделі ТЕП гібридного маневрово-вивізного тепловоза і дослідження на основі чисельних експериментів алгоритмів управління розгоном і електричним гальмуванням локомотива з спільним регулюванням АТД в режимі реалізації граничних зусиль.

При дослідженні ТЕП з АТ, живити в силовому каналі від статичних перетворювачів частоти зі складною системою управління, застосування аналітичних методів в силу значної нелінійності системи утруднено. Тому в якості основних методів і засобів дослідження обрані методи математичного та комп'ютерного моделювання електричних і механічних систем з урахуванням положень теорії електричних машин, теорії електроприводу, теорії автоматичного управління, а також апробовані на вирішенні складних дослідницьких завдань програмні комплекси: MatLab / Simulink і «Універсальний механізм» (UM).

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 СПОСІБ УПРАВЛІННЯ І МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕП ІЗ СИСТЕМОЮ СПІЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ АТ

Розвиток асинхронного тягового електроприводу і впровадження його на вітчизняних локомотивах вимагає вдосконалення алгоритмів керування асинхронними тяговими двигунами як при індивідуальному живленні двигуна кожної осі від окремого автономного інвертора, так і при паралельному підключенні двигунів візка до загального автономного інвертора. На нових локомотивах впроваджуються сучасні системи управління асинхронними двигунами: векторне управління, пряме керування моментом (DTC). У цих системах передбачається використання адаптивних моделей двигунів для обчислення ряду регульованих вихідних параметрів (потокозчеплення, електромагнітного моменту і ін.) На основі вимірюваних змінних стану АТД (фазних струмів, напруги в проміжному контурі і ін.)

Індивідуальне регулювання осей дозволяє одночасно врахувати в системі управління змінні стану кожного двигуна, що покращує динаміку управління і підвищує реалізовані тягові і гальмівні зусилля. Однак досить часто з економічних міркувань і умов розміщення, застосовують спільне регулювання двигунів в межах візка, в цьому випадку виміряні змінні стану АТД, що надходять в систему управління ТЕП (рис. 2.1), не можуть бути враховані одночасно для кожного двигуна необхідним оптимальним чином. У зв'язку з цим необхідно відпрацювати алгоритми управління при спільному регулюванні, які дозволяють забезпечити високі тягові якості локомотива і виключають нестационарні динамічні режими (буксування і юз), що супроводжуються підвищеними динамічними навантаженнями.

В рамках пілотного проекту тепловозобудівним заводом, було розроблено гібридний маневрово-вивізний тепловоз з спільним регулюванням АТД в межах візка, один з варіантів функціональної схеми якого наведено на рис. 2.1 (акумуляторна батарея на даній схемі не зображена). тепловоза при використанні датчиків струму в ланцюзі кожного АТД.

					<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

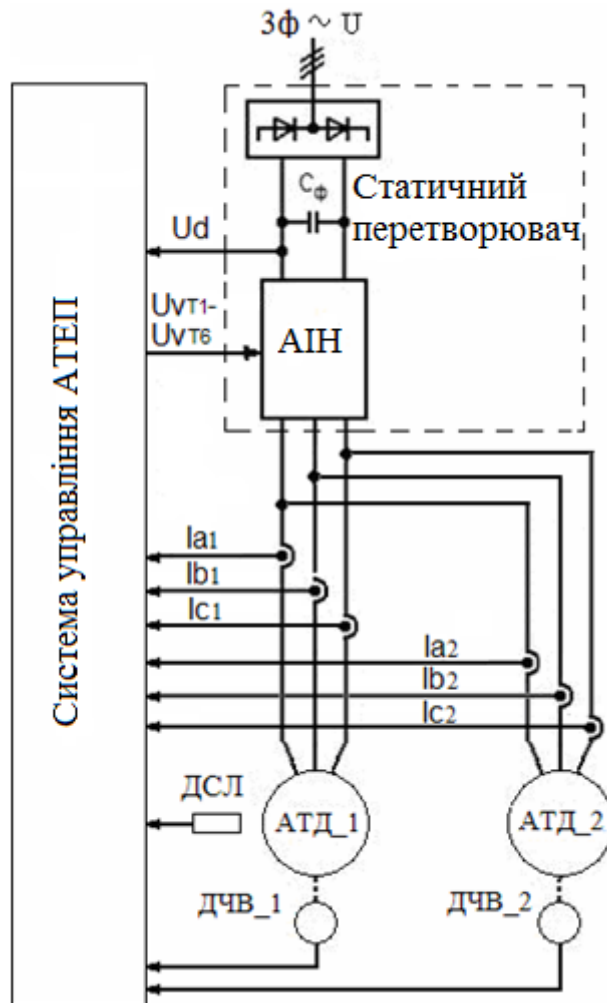


Рисунок 2.1. Узагальнена функціональна схема ТЕП двовісного візка

У СУ ТЕП гібридного тепловоза ТЕМ9Н впроваджені найбільш динамічні алгоритми розривного керування АТД при регулюванні потужності статора, що дозволяють реалізувати і випробувати різні варіанти управління приводом на межі зчеплення при спільному регулюванні. Стратегія розривного керування тягою запозичена, її основними перевагами є:

- 1) досягнення граничної фізично можливої швидкості зміни моменту, що дозволяє побудувати систему використання реального коефіцієнта зчеплення;

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>				

- 2) мінімізація частоти перемикання приладів;
- 3) отримання максимально можливої першої гармоніки напруги (відповідно, величини потоку, в режимі одноразової комутації).

Крім того, завдяки використанню розривного керування АТД з релейними регуляторами моменту і потокозчеплення забезпечується висока стабільність роботи тягового приводу при коливаннях напруги в проміжному контурі статичного перетворювача і зміні параметрів об'єкта управління.

## 2.1 Спосіб і алгоритми управління ТЕП гібридного тепловоза в режимі реалізації граничних зусиль

У процесі досліджень і проектування був обраний альтернативний варіант електричної схеми з одним датчиком струму на два паралельно працюючих АТД як більш простий і дешевий (рис. 2.2).

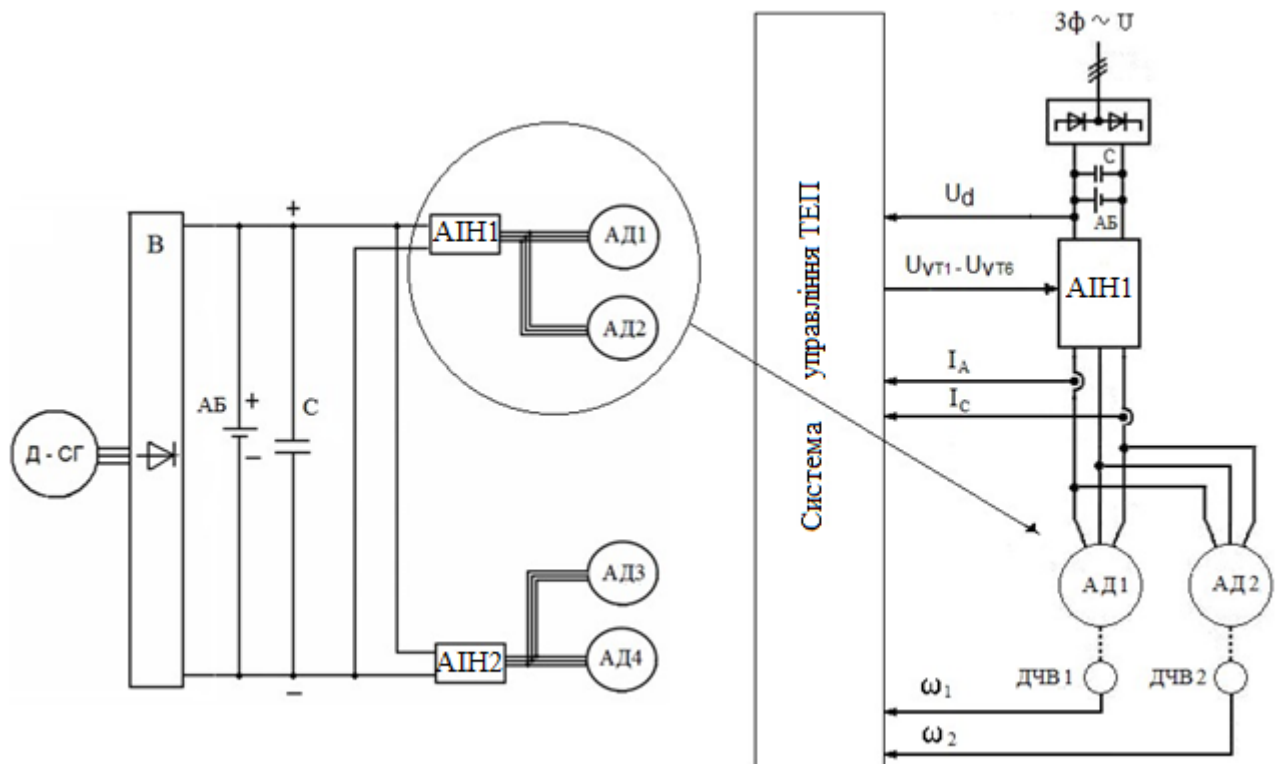


Рисунок 2.2. Узагальнена функціональна схема електричної частини ТЕП тепловоза ТЕМ9Н

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В сучасних умовах доцільно, поряд з впровадженням імпорتنих систем управління, створювати і удосконалювати з урахуванням світових досягнень власні алгоритми управління ТЕП, використовуючи для їх відпрацювання, як вже наявні зразки локомотивів, так і нові комп'ютерні технології. З нашої точки зору для цих цілей добре підходить чотиривісний гібридний маневрово-вивізний тепловоз ТЕМ9Н.

Локомотив має спільне регулювання ТЕП з підключенням двох АТ візка до автономного інвертору напруги і комплекс технічних рішень в системі електроживлення, що знімають ряд обмежень по управлінню тяговим електроприводом в пускових режимах в порівнянні зі звичайним електроприводом тепловоза. Застосування в системі електроживлення акумуляторної літій-іонної батареї (АБ) з величезним енергозапасом (300 кВт \* годин) і суперконденсаторів (С) дозволяє відійти від традиційного ступеневого (позиційного) регулювання потужності дизеля на тягу і реалізувати мрію - регулювати силу тяги, а не підтримувати добуток сили тяги на швидкість постійним, відповідно до позиції контролера машиніста. (Двонаправлений перетворювач заряду-розряду, через який підключена акумуляторна батарея, на схемі не показаний).

Функціональна схема СУ ТЕП ТЕМ9Н, модифікована з урахуванням запропонованого способу і алгоритмів регулювання ковзання коліс, наведена на рис. 2.3, причому, на рисунку показана схема СУ ТЕП першого візка, для двигунів другого візка (АТД3, АТД4) схема аналогічна.

При пуску локомотива контролером машиніста (КМ) для СУ ТЕП спочатку задається максимальна сила тяги, яка надходить в блок обчислення завдання моменту з урахуванням обмежень (БОЗМ) і фактично визначає обмеження моменту АТД в контурі регулювання моменту. Але сигнал завдання моменту (отже, і сам момент дорівнюють нулю), поки немає завдання на швидкість. Далі за допомогою КМ задається необхідна швидкість локомотива, що надходить в блок обчислення завдання швидкості

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>					

(БОЗШ) і визначає обмеження завдання на частоту обертання АД в контурі швидкості. Після цього з'являється завдання моменту на виході регулятора частоти обертання АД, і локомотив починає розгін, поступово збільшуючи силу тяги (до заданої максимальної величини, якщо дозволяє зчеплення) і намагається досягти встановленої КМ швидкості.

З урахуванням зарубіжного та вітчизняного досвіду обчислення завдання частоти обертання АД (рис.2.3), наведеної до швидкості колеса.

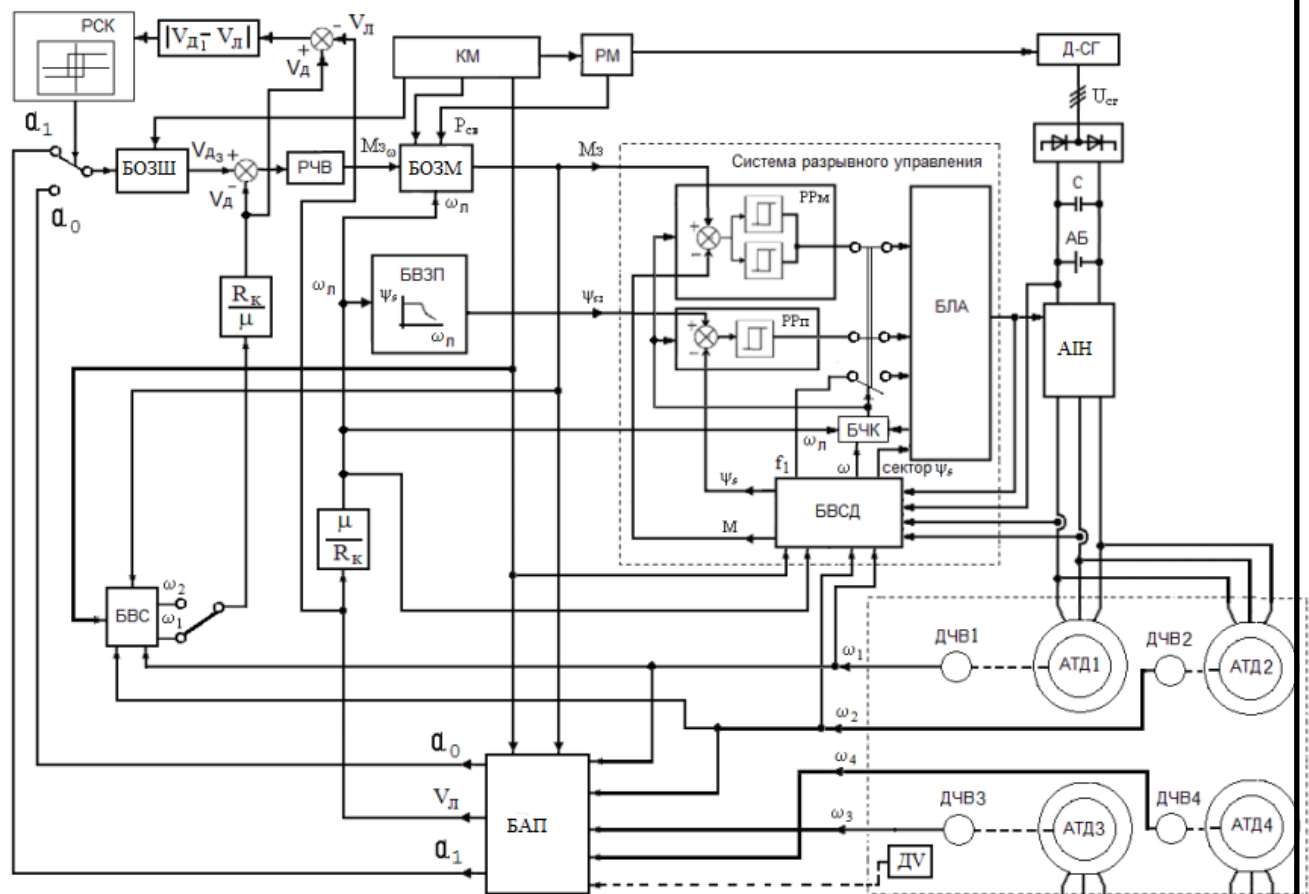


Рисунок 2.3 - Функціональна схема СУ ТЕП тепловоза ТЕМ9Н, модифікована з урахуванням регулювання ковзання коліс

( $V_{Дз}$ ), проводиться в БВЗС за допомогою інтегрування завдання прискорення колісної пари ( $a_1$  або  $a_0$ ). Це завдання, в свою чергу, обчислюється в БАП (блоці адаптації прискорення). Воно жорстко прив'язане до прискорення локомотива, що дозволяє або підняти колесо (збільшити

				Арк.	
<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

його ковзання щодо швидкості локомотива), або уповільнити, щоб виїхати із зони буксування при тяговому режимі або юза при гальмівному:

- тяговому режимі

$$a_1 = a_{л} + \Delta a_{k1}; \quad a_0 = a_{л} - \Delta a_{k2};$$

(2.1)

- гальмівному режимі

$$a_1 = a_{л} - \Delta a_{k1}; \quad a_0 = a_{л} + \Delta a_{k2},$$

(2.2)

де  $a_{л}$  – прискорення локомотива;

$a_1, a_0$  – завдання на прискорення коліс;

$\Delta a_{k1}, \Delta a_{k2}$  – невеликі позитивні величини, що адаптуються до маси складу

і умов руху.

Прискорення локомотива  $a_{л}$ , змінюється в процесі руху, постійно обчислюється в БАУ зі зміни оціночної швидкості локомотива  $V_{л}$  (Яка визначається за виміряним частотам обертання роторів АТД  $\omega_1 - \omega_4$ ) за задані проміжки часу  $\Delta t$  ( $a_{л} = \Delta V_{л} / \Delta t$ ). Якщо на локомотиві встановлений датчик лінійної швидкості (ДV), його сигнал показаний пунктиром на рис. 2.3, то для обчислення прискорення локомотива краще використовувати цей сигнал.

Перемикання між значеннями  $a_1$  і  $a_0$  здійснюється під контролем релейного регулятора ковзання коліс (РСК) з адаптивним гістерезисних допуском. Для зниження фрикційних автоколивань на вхід РСК в режимі тяги подається абсолютна величина різниці між частотою обертання двигуна першого (по ходу руху) осі візка (має менше вертикальне навантаження), наведеної до лінійної швидкості колеса (ДV<sub>1</sub>), і швидкістю локомотива ( $V_{л}$ ). Тобто, в даному випадку для першого візка (рис. 2.3) використовується абсолютна величина ковзання коліс першої осі (в режимі гальмування - другої осі візка, так як в цьому режимі друга вісь має менше вертикальне

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навантаження). Поки величина ковзання не перевищить допустимий верхній поріг РСК, БОЗШ в режимі тяги інтегрує величину  $a_1$ , після перевищення порога величину  $a_0$  (в режимі гальмування навпаки). Зворотнє перемикання з  $a_0$  на  $a_1$  відбудеться, коли ковзання коліс стане менше нижнього порогу, заданого в РСК.

Завдання на швидкість  $V_{Д1}$ , обчислене БОЗШ шляхом інтегрування  $a_1$  чи  $a_0$ :

$$V_{Дз} = \int a_m dt, m=0; 1.$$

(2.3)

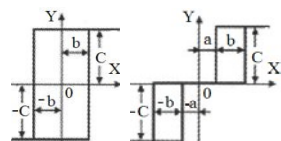
порівнюється з вимірюваною наведеною частотою обертання ротора  $V_{Д1}$ , і отриманий сигнал надходить до регулятора частоти обертання (РЧО), обчислюють завдання на момент ( $M_{з\omega}$ ), яке потім обмежується в БОЗМ на необхідному рівні (МОЗ). Розглядалися два варіанти РЧО: пропорційний (П) і пропорційно-інтегральний (ПІ).

Отримані завдання на момент  $M_з$ , а також завдання на модуль вектора потокозчеплення статора  $\Psi_s$ , визначається в блоці обчислення завдання потокозчеплення (БОЗП) в залежності від швидкості локомотива, подаються в систему розривного керування (РК). Система РК містить трипозиційні релейні регулятори моменту (РРМ) і двопозиційні релейні регулятори потокозчеплення (РРП), блок обчислення стану двигуна (БОСД), блок логічного автомату (БЛА) та блок частоти комутацій (БЧК). При повному полі БЛА здійснює вибір сигналів на перемикання транзисторів АІН в залежності від стану релейних регуляторів і сектора площини координат, де в даний час знаходиться вектор потокозчеплення статора (таблиця 2.1). (В таблиці  $U_1 - U_7$  - базові вектори дворівневого АІН).

					<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 - Перемикання АІН при багаторазовій комутації ключів за сигналами

РРМ, РРП і сектору  $\Psi_s$



$\Delta\Psi_s$		Сектор $\bar{\Psi}_s$					
		I	II	III	IV	V	VI
↑	↑	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	$U_1$
	0	$U_7$	$U_0$	$U_7$	$U_0$	$U_7$	$U_0$
	↓	$U_6$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$
↓	↑	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	$U_1$	$U_2$
	0	$U_0$	$U_7$	$U_0$	$U_7$	$U_0$	$U_7$
	↓	$U_5$	$U_6$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$

БЧК контролює частоту комутацій транзисторів АІН і подає сигнали на зміну ширини гістерезису допусків релейних регуляторів або перехід до одноразової комутації транзисторів на періоді (повноблочному режиму) при ослабленні поля. У режимі ослаблення поля БЛА виробляє сигнали перемикання транзисторів в залежності від положення вектора потокозчеплення і необхідної частоти напруги статора  $f_1$  (рис. 2.3, табл. 2.2).

Таблиця 2.2 - Таблиця перемикань АІН при одноразовій комутації ключів по сектору вектора потокозчеплення статора  $\Psi_s$  і куту повороту вектора

напруги статора  $U_s$

Умова перемикання	Сектор $\bar{\Psi}_s$					
	I	II	III	IV	V	VI
Зміна кута повороту $\bar{U}_s$ $\Psi_1$ на $\pi/3$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	$U_1$	$U_2$



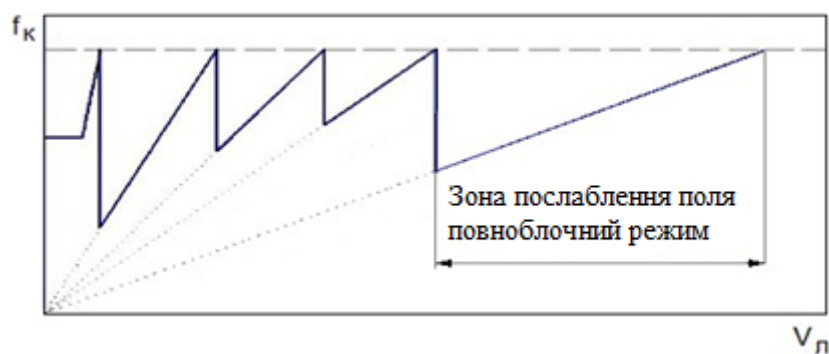


Рисунок 2.4 - Графік, що пояснює принцип зміни частоти перемикань транзисторів АІН при зміні швидкості локомотива:

$f_k$  – частота комутацій;  $v_l$  – швидкість локомотива

Контроль стану АТД і визначення поточних обчислюваних змінних машини за моделлю здійснюється в блоці, умовно названому БОСД. Для цього на вхід цього блоку подається поточна напруга проміжного контуру (dc-link) і матриця стану ключів АІН для визначення миттєвого значення фазних напруг; струми двох фаз АІН, споживані двома двигунами візка (АТД1, АТД2 для першого візка), швидкості роторів АТД візка ( $\omega_1$  і  $\omega_2$ ), за якими визначається середня швидкість ротора ( $\omega$ ) для моделі АТД. Модель АТД, загальна для двох двигунів візка (усереднена) [102], побудована в нерухомих осях  $\alpha$ - $\beta$  по рівняннях :

$$\frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} = -\frac{R_s}{\sigma L_s} \psi_{s\alpha} + \frac{R_s L_\mu}{\sigma L_s L_r} \psi_{r\alpha} + U_\alpha,$$

$$\frac{d\psi_{s\beta}}{dt} = -\frac{R_s}{\sigma L_s} \psi_{s\beta} + \frac{R_s L_\mu}{\sigma L_s L_r} \psi_{r\beta} + U_\beta,$$

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{R_r L_\mu}{\sigma L_s L_r} \psi_{s\alpha} - \frac{R_r}{\sigma L_r} \psi_{r\alpha} -$$

$p_n \omega \psi_{r\beta},$

(2.5)

$$\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = \frac{R_r L_\mu}{\sigma L_s L_r} \psi_{s\beta} - \frac{R_r}{\sigma L_r} \psi_{r\beta} + p_n \omega \psi_{r\alpha},$$

$$M = \frac{3}{2} p_n \frac{L_\mu}{\sigma L_s L_r} (\psi_{s\beta} \psi_{r\alpha} - \psi_{s\alpha} \psi_{r\beta}),$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

0032.206303.000.04MP.ПЗ

де  $U_\alpha, U_\beta$  – напруги статора по осях  $\alpha, \beta$  відповідно;

$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_s L_r}$  – коефіцієнт розсіювання двигуна усередненої моделі;

$L_\mu$  – взаємоіндуктивність усередненої моделі АД між обмотками статора і ротора;

$L_s$  – власна індуктивність для обмотки статора;

$L_r$  – власна індуктивність усередненої моделі АД для обмотки ротора, приведена до обмотці статора;

$R_s, R_r$  – активний опір фази статора і приведений опір ротора усередненої моделі;

$\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}$  – потокозчеплення обмоток статора усередненої моделі;

$\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$  – потокозчеплення обмоток ротора усередненої моделі;

$\omega$  – середня швидкість роторів двигунів візка;

$p_n$  – число пар полюсів двигуна;

$M$  – електромагнітний момент усередненої моделі двигуна.

Наприклад, параметри середньої моделі АТД для першого візка:

$$R_s = \frac{R_{sATD1} + R_{sATD2}}{2}; R_r = \frac{R_{rATD1} + R_{rATD2}}{2}; \omega = \frac{\omega_{ATD1} + \omega_{ATD2}}{2};$$

$$L_s = \frac{L_{sATD1} + L_{sATD2}}{2}; L_r = \frac{L_{rATD1} + L_{rATD2}}{2}; L_\mu = \frac{L_{\mu ATD1} + L_{\mu ATD2}}{2},$$

(2.6)

де  $R_{sATD1}, R_{sATD2}, R_{rATD1}, R_{rATD2}, L_{sATD1}, L_{sATD2}, L_{rATD1}, L_{rATD2}, L_{\mu ATD1}, L_{\mu ATD2}$  – відповідні параметри АТД1 и АТД2;

$\omega_{ATD1}, \omega_{ATD2}$  – частоти обертання роторів АТД1 і АТД2 відповідно.

Трифазні напруги перетворюються на двофазну систему  $\alpha, \beta$  за рівняннями:

$$U_\alpha = U_a;$$

$$U_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} (U_b - U_c),$$

(2.7)

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $U_a, U_b, U_c$ , - фазні напруги АТД.

Струми середньої двофазної моделі двигуна візка по осях  $\alpha$  і  $\beta$  визначаються через потокозчеплення, знайдені при вирішенні (2.5) з системи алгебраїчних рівнянь.

$$\begin{aligned} i_{s\alpha} &= \frac{\psi_{s\alpha}L_r - \psi_{r\alpha}L_\mu}{L_sL_r - L_\mu^2}; & i_{s\beta} &= \frac{\psi_{s\beta}L_r - \psi_{r\beta}L_\mu}{L_sL_r - L_\mu^2}; \\ i_{r\alpha} &= \frac{\psi_{r\alpha}L_s - \psi_{s\alpha}L_\mu}{L_sL_r - L_\mu^2}; & i_{r\beta} &= \frac{\psi_{r\beta}L_s - \psi_{s\beta}L_\mu}{L_sL_r - L_\mu^2}, \end{aligned} \quad (2.8)$$

де  $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$  - струми обмоток статора АТД по осях  $\alpha, \beta$  відповідно;  
 $i_{r\alpha}, i_{r\beta}$  - струми обмоток ротора АТД по осях  $\alpha, \beta$  відповідно.

За ним обчислюється модуль і положення вектора модельного струму статора (рис. 2.5)

$$|\vec{I}_s| = \sqrt{i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2}; \quad \cos \gamma_{I_s} = \frac{i_{s\alpha}}{|\vec{I}_s|}; \quad \sin \gamma_{I_s} = \frac{i_{s\beta}}{|\vec{I}_s|}; \quad (2.9)$$

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

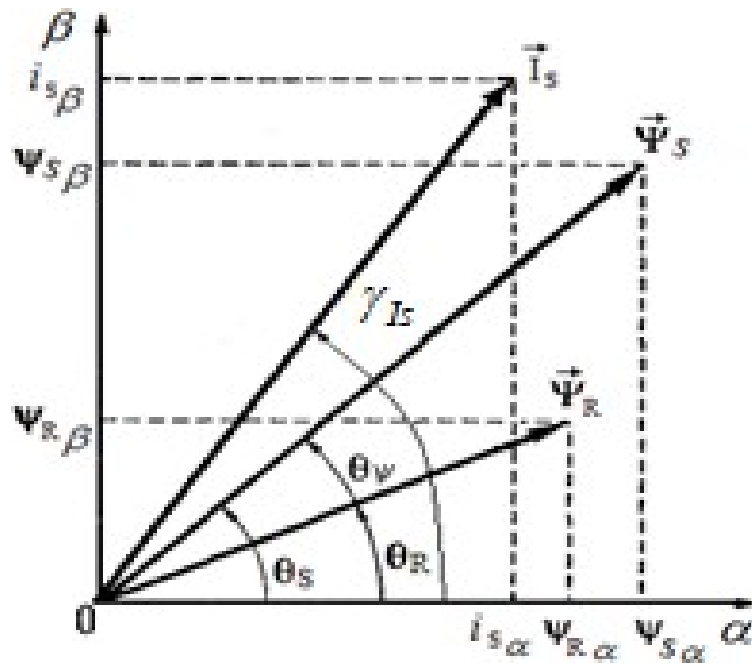


Рисунок 2.5 - Векторна діаграма потокозчеплення статора і ротора і струму статора

Аналогічно для модельного потокозчеплення статора (рис. 2.5)

$$|\vec{\Psi}_s| = \sqrt{\Psi_{s\alpha}^2 + \Psi_{s\beta}^2}; \quad \cos \theta_s = \frac{\Psi_{s\alpha}}{|\vec{\Psi}_s|}; \quad \sin \theta_s = \frac{\Psi_{s\beta}}{|\vec{\Psi}_s|}, \quad (2.10)$$

Як уже зазначалося, в запропонованому способі управління ТЕП локомотива при реалізації граничних зусиль виводиться на межу по зчепленню вісь візка з меншою вертикальним навантаженням: в тяговому режимі - це перша вісь і в гальмівному режимі друга вісь. Передача управління і відповідно перемикання в блоці обчислення швидкості (БВС) СУ (рис. 2.3) сигналу частоти обертання с  $\omega_1$  на  $\omega_2$  (І навпаки) відбувається при зміні режиму руху (тяга / гальмування) зі зміни знака завдання на момент  $M_3$  на протилежний (негативний в при переході від тяги до гальмування і позитивний при переході від гальмування до тязі). Застосування при цьому в СУ загальною усередненою моделі (2.5 - 2.10) для двох двигунів візка

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>				

виключає коливання електромагнітних (і механічних) змінних стану при передачі управління з одного АТД на інший, які можуть виникати в системах із застосуванням окремих моделей для кожного АТД.

Момент двигуна, який визначається за допомогою рішення диференціальних рівнянь (2.5), пропорційний добутку модулів вектора потокозчеплення статора і потокозчеплення ротора на синус кута між цими векторами.

$$M = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{\sigma L_S L_R} |\vec{\Psi}_S| |\vec{\Psi}_R| \sin(\theta_\psi),$$

(2.11)

де  $M$  – електромагнітний момент;

$p$  – число пар полюсів;

$L_S, L_R, L_m$  – індуктивності фази статора, ротора і взаємна індуктивність відповідно;

$\sigma$  – коефіцієнт розсіювання;

$\vec{\Psi}_S, \vec{\Psi}_R$  – вектори потокозчеплення ротора та статора;

$\theta_\psi$  – кут між вектором потокозчеплення статора і вектором потокозчеплення ротора.

Для ротора постійна часу досить велика, тому модуль потокозчеплення у нього змінюється повільно. Якщо взяти маленький проміжок часу, то і для статора модуль потокозчеплення теж можна умовно вважати постійним. В силу цього можна здійснювати управління моментом АТД, змінюючи поточний кут між потокозчепленням. Досягти цього можна, вибираючи потрібний вектор напруги (табл. 2.1). Цей вектор забезпечить потрібне взаємоположення векторів потокозчеплення і необхідну зміну моменту і потокозчеплення статора АД. При цьому координатна площина розділяється на 6 секторів, в кожному з яких в певний момент часу можна вибрати необхідний вектор, який викличе потрібну зміну моменту і потокозчеплення

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>					

статора. В системі використовуються лише релейні регулятори, а векторні перетворення, перерахунок систем координат, як в СУ з векторним керуванням, не виробляються. Але в підсумку забезпечується максимально швидке регулювання електромагнітного моменту, підтримання необхідного значення потокозчеплення статора і обертання вектора потокозчеплення з потрібною частотою.

Контроль стану машини проводиться з використанням фактичних значень струму, швидкості роторів і фазних напруг, датчиків температури обмоток АТД. Датчики струму (2 на пару паралельних моторів, рис. 2.3) використовуються для того, щоб бачити відміну основний спостерігається координати, вектора середнього струму двигунів візка, від модельного струму. Фактичний струм фази С =  $i_{sCf} - i_{sAf} i_{sBf}$ , де  $i_{sAf}$ ,  $i_{sBf}$  - фактичні струми фаз А і В, виміряні датчиками.

Середні струми АТД візка по осях  $\alpha$ ,  $\beta$

$$i_{s\alpha f} = \frac{i_{sAf}}{2}; i_{s\beta f} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{(i_{sBf} - i_{sCf})}{2}.$$

(2.12)

Положення і модуль фактичного вектора середнього струму двигунів візка визначається за формулами

$$|\vec{I}_{sf}| = \sqrt{i_{s\alpha f}^2 + i_{s\beta f}^2}; \cos \gamma_{I_{sf}} = \frac{i_{s\alpha f}}{|\vec{I}_{sf}|}; \sin \gamma_{I_{sf}} = \frac{i_{s\beta f}}{|\vec{I}_{sf}|}.$$

(2.13)

Фактичний вектор середнього струму, визначений за (2.12; 2.13) порівнюється з модельним. Якщо модельний струм не там, де очікувалося означає, що і потокозчеплення не там, і момент не той, тож потрібно тепер зрозуміти, де потокозчеплення насправді і який момент, внести корективи.

Це можна зробити, наприклад, з використанням виразів для

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>				

потокозчеплення і моменту з урахуванням фактичного струму на основі порівняння їх з виразами для аналогічних модельних величин (2.5).

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{saf}}{dt} &= U_{\alpha} - i_{saf} R_s; \\ \frac{d\psi_{s\beta f}}{dt} &= U_{\beta} - i_{s\beta f} R_s; \end{aligned}$$

(2.14)

$$M = \frac{3}{2} p (\psi_{saf} i_{s\beta f} - \psi_{s\beta f} i_{saf}).$$

Тобто, модель (2.5) повинна бути адаптованою і тим або іншим чином підлаштовуватися під реалії. На локомотиві ТЕМ9Н коригуються кілька параметрів моделі машини. Але навіть при корекції єдиного параметра, опори статора, система вже стабільна, стійка і робастна, але є проблеми з деякими відмінностями реального середнього моменту від запланованого значення. При повному відключенні корекції система довгий час зберігає стабільність з поступовим зниженням якості управління аж до втрати керованості.

## 2.2 Математичне і комп'ютерне моделювання СУ ТЕП з спільним регулюванням АТД

Щоб дослідити різні алгоритми управління ТЕП на моделі, в математичну і комп'ютерну модель СУ ТЕП, як і в реальну систему, повинні входити моделі складових її основних вузлів: АТД, напівпровідникового статичного перетворювача і використовуваних блоків і регуляторів, що реалізують запропоновані алгоритми.

Математична модель АТД виконана на основі двофазної узагальненої машини з урахуванням прийнятих при такому поданні АТ традиційних припущень на основі тих же рівнянь, що і усереднена модель-спостерігач (2.52.8). Відмінністю є те, що в модель підставляються параметри відповідних двигунів візків для того, щоб можна було змоделювати розкид

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

параметрів АТД. Параметри двигуна АД917УХЛ1 наведені в додатку 1 (за даними заводу-виробника).

Для моделювання сучасних напівпровідникових систем ТЕП з АТ добре підходить і використовується ПК MatLab / Simulink, орієнтований на моделювання електромеханічних перетворювачів напівпровідникових систем. Тому комп'ютерне моделювання виконано в основній бібліотеці MatLab / Simulink з використанням методу підсистем: в більші підсистеми входять дрібніші за принципом «матрьошки».

Блок-діаграми моделі АТД складені за рівняннями (2.5-2.8), як приклад на рис. 2.6 приведена блок-діаграма однією з підсистем моделі двигуна. Її можна назвати підсистемою другого рівня, так як вона сама входить до головної параметризованої підсистеми АТД верхнього рівня, де задаються параметри АТД (які можна змінювати в процесі розрахунку) і куди підводиться напруга. Вкладені блоки підсистем Subsystem1 - Subsystem4 (підсистеми третього рівня) складені по перших чотирьох рівнянь системи (2.5) для обмоток статора і ротора.

Блок-діаграма усередненої моделі АТД візка має такий же вигляд (рис. 2.6), але в неї підставляються параметри, які обчислюють за формулами (2.6).

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

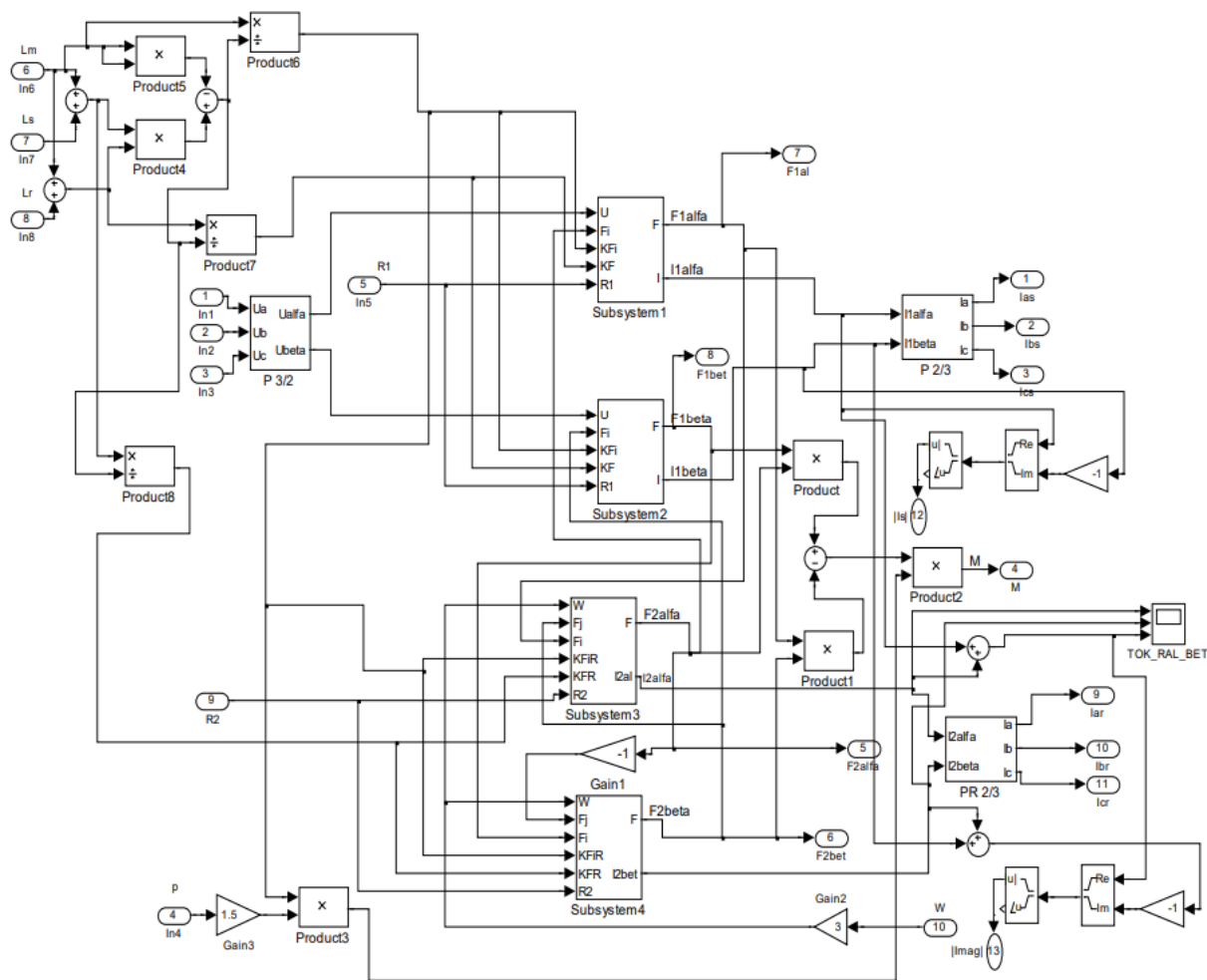


Рисунок 2.6 - Зміст моделі підсистеми АТД

При моделюванні нестационарних режимів і подальшого поєднання моделі ТЕП з моделлю механічної частини для скорочення часу розрахунку прийнято рішення обмежитися моделюванням статичного перетворювача на основі комутаційних функцій.

У системах розв'язного керування, як і при просторовекторній ШІМ в системах векторного керування вентиля інвертора перемикаються між декількома певними станами. Для мостового дворівневого АІН (рис. 2.7) існує відомий набір векторів напруги, званих базовими векторами (табл. 2.1; 2.2). Кожен вектор відповідає певному стану АІН (рис. 2.8).

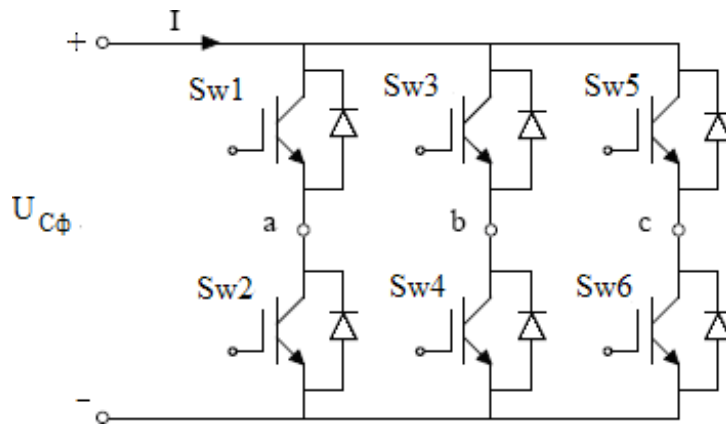


Рисунок 2.7 - Схема силова принципова для дворівневого АІН

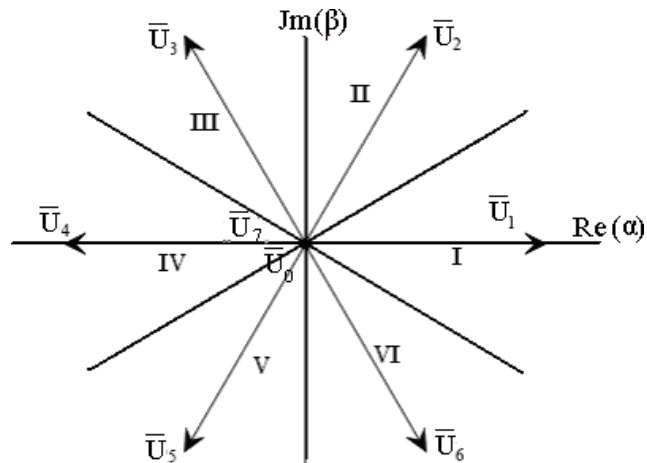


Рисунок 2.8 - Базові вектори дворівневого АІН

У таблиці 2.3 відображені логічні стани вентилів АІН і відповідні їм вектори вихідних напруг. Комутаційна функція ( $S$ ) для кожної фази АІН має значення 1 або 0 в залежності від стану вентилів ("On", "Викл"). Вихідні лінійні напруги АІН визначаються при цьому наступним чином:

$$u_{ab} = U_{C\phi} [S_a(t) - S_b(t)];$$

$$u_{bc} = U_{C\phi} [S_b(t) - S_c(t)];$$

(2.15)

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

$$u_{ca} = U_{C\phi} [S_c(t) - S_a(t)],$$

де  $U_{C\phi}$  амплітудне значення вхідної напруги АІН.

Таблиця 2.3 - Таблиця відповідності векторів вихідної напруги і логічних станів вентилів

Sw1	Sw2	Sw3	Sw4	Sw5	Sw6	S <sub>a</sub> (t)	S <sub>b</sub> (t)	S <sub>c</sub> (t)	$\bar{U}_k(t)$
Викл	Вкл	Викл	Вкл	Викл	Вкл	0	0	0	$\bar{U}_0$
Вкл	Викл	Викл	Вкл	Викл	Вкл	1	0	0	$\bar{U}_1$
Вкл	Викл	Вкл	Викл	Викл	Вкл	1	1	0	$\bar{U}_2$
Викл	Вкл	Вкл	Викл	Викл	Вкл	0	1	0	$\bar{U}_3$
Викл	Вкл	Вкл	Викл	Вкл	Викл	0	1	1	$\bar{U}_4$
Викл	Вкл	Викл	Вкл	Вкл	Викл	0	0	1	$\bar{U}_5$
Вкл	Викл	Викл	Вкл	Вкл	Викл	1	0	1	$\bar{U}_6$
Вкл	Викл	Вкл	Викл	Вкл	Викл	1	1	1	$\bar{U}_7$

При включенні фаз АД в зірку фазна напруга АДД:

$$u_a = \frac{2u_{ab} + u_{bc}}{3};$$

$$u_b = \frac{u_{bc} - u_{ab}}{3};$$

(2.16)

$$u_c = \frac{-u_{ab} - 2u_{bc}}{3}.$$

З використанням формул (2.15) і (2.16) і таблиці (2.3) для різних станів АІН при вхідній напрузі  $U_{C\phi} = 1$  залишена таблиця (табл. 2.4) значень вихідної напруги.

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.4 - Вихідні напруги АІН для різних станів при  $U_{C\phi}=1$

1	2	3	4	5	6	7
$\bar{U}_k(t)$	$u_a$	$u_b$	$u_c$	$u_{ab}$	$u_{bc}$	$u_{ca}$
$\bar{U}_0$	0	0	0	0	0	0
$\bar{U}_1$	2/3	-1/3	-1/3	1	0	-1
$\bar{U}_2$	1/3	1/3	-2/3	0	1	-1
$\bar{U}_3$	-1/3	2/3	-1/3	-1	1	0
$\bar{U}_4$	-2/3	1/3	1/3	-1	0	1
1	2	3	4	5	6	7
$\bar{U}_5$	-1/3	-1/3	2/3	0	-1	1
$\bar{U}_6$	1/3	-2/3	1/3	1	-1	0
$\bar{U}_7$	0	0	0	0	0	0

Миттєві значення напруг фаз АТД отримують шляхом множення комутаційних функцій (коефіцієнтів табл. 2.4) на поточну величину напруги конденсатора фільтра  $U_{C\phi}$ . Саме таким чином проводиться моделювання АІН комутаційними функціями.

У схемі СУ ТЕП (рис. 2.3) управління ключами інвертора здійснюється за сигналами системи розривного керування АТД відповідно до таблиць 2.1 (при повному полі і багаторазової комутації) і 2.2 (при ослабленні поля і одноразової комутації), які реалізовані в БЛА (рис. 2.3).

Модель блоку логічного автомата, що реалізує таблицю (табл.2.1) перемикаць ключів АІН можна виконати по-різному. У представленій блок-діаграмі використані елементи основний бібліотеки MatLab / Simulink: Look-Up Table (2-D) і Multiport Switch, це значно зручніше застосування простих логічних елементів. Модель підсистеми логічного автомата в разі подання інвертора комутаційними функціями приведена на рис. 2.9.

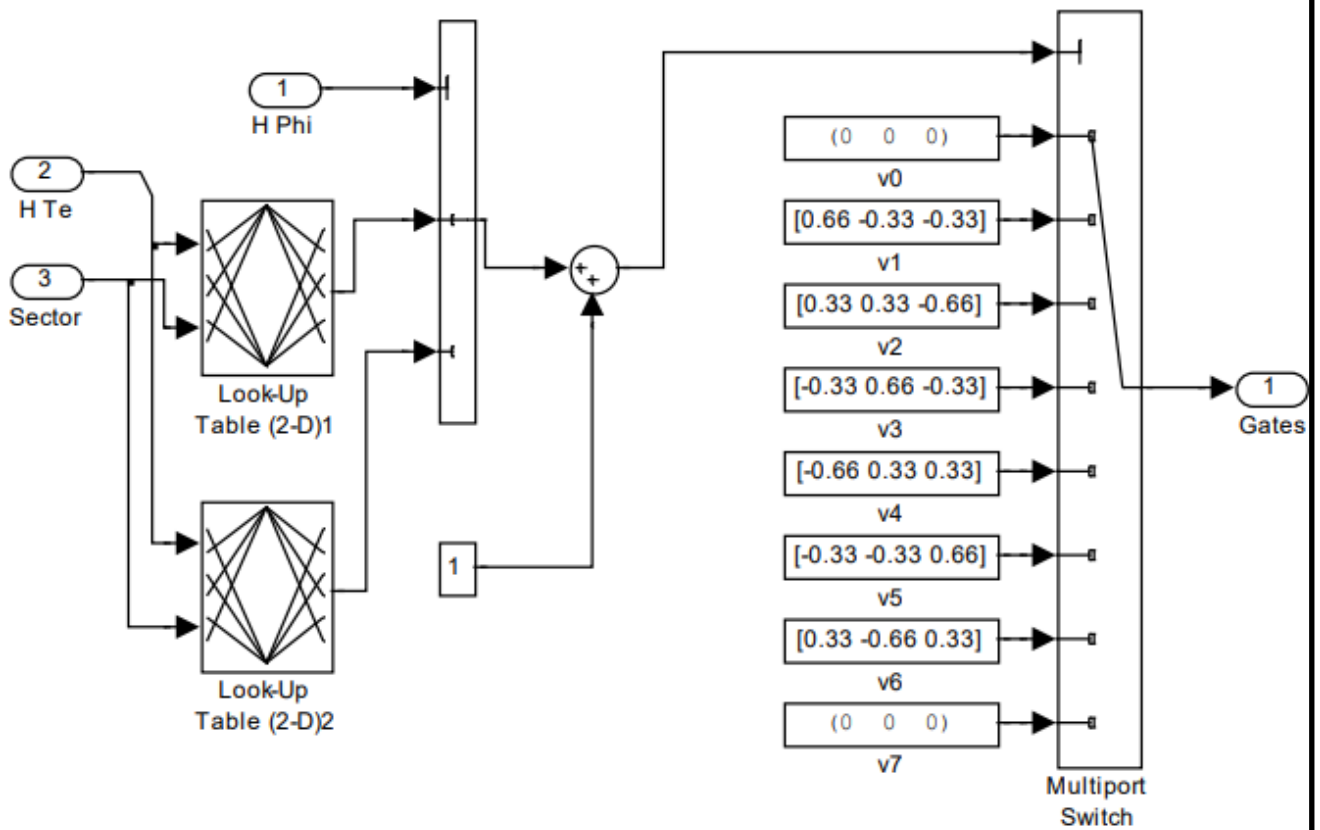


Рисунок 2.9 - Підсистема моделі блоку логічного автомата, що реалізує таблицю 2.1 перемикань АІН при багаторазовій комутації на періоді

Миттєве значення фазної напруги обчислюється шляхом множення комутаційної функції, одержуваної на виході підсистеми рис. 2.9 на напругу проміжної ланки постійного струму  $U_{C\phi}$ .

Для пояснення моделі, що реалізує табл. перемикань 2.2 з урахуванням рівнянь (1.5) і (2.4) необхідно розглянути векторну діаграму АТД, представлену на рис. 2.10, зіставивши її з системою базових векторів (рис. 2.8). Кожен із секторів координатної площини на рис. 2.8 займає кут  $60^\circ$ , і якщо порівняти це з взаємним становищем векторів потокозчеплення і напруги статора (рис. 2.10), то видно, що напруга випереджає потокозчеплення на два сектори.

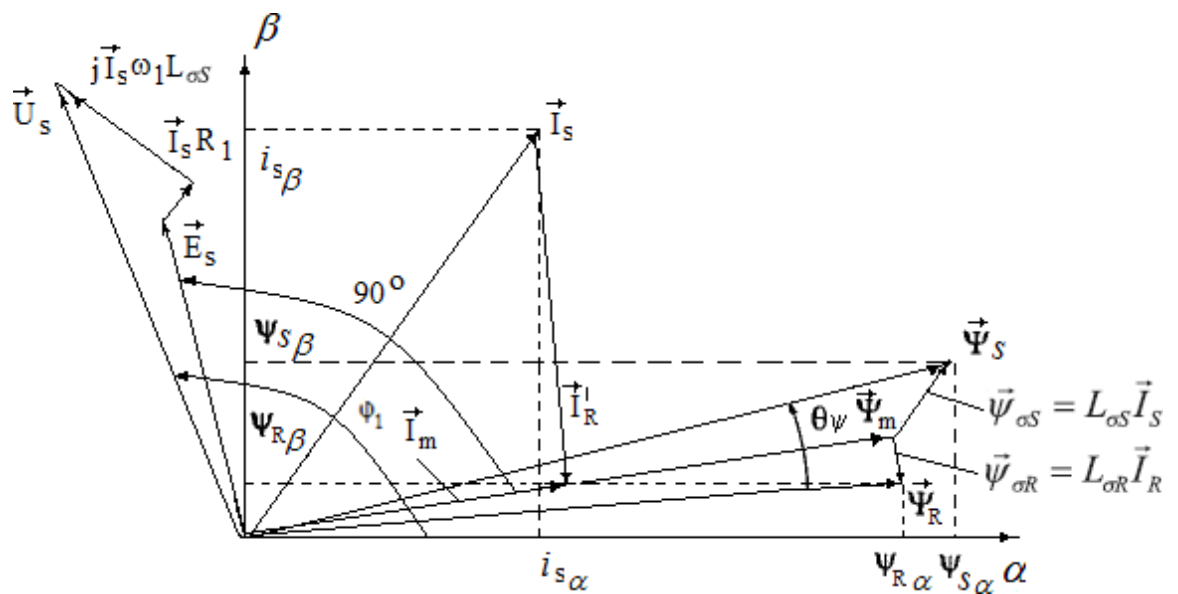


Рисунок 2.10 - Векторна діаграма напруг, потокозчеплення і струмів АТД

І далі зрозуміло, як організувати обертання магнітного поля статора при одноразовій комутації АІН (табл. 2.2) відповідно до необхідної частотою  $f_1$  (1.5), кутом (1.6) і поточним сектором потокозчеплення, який обчислюється СУ (рис. 1.10).

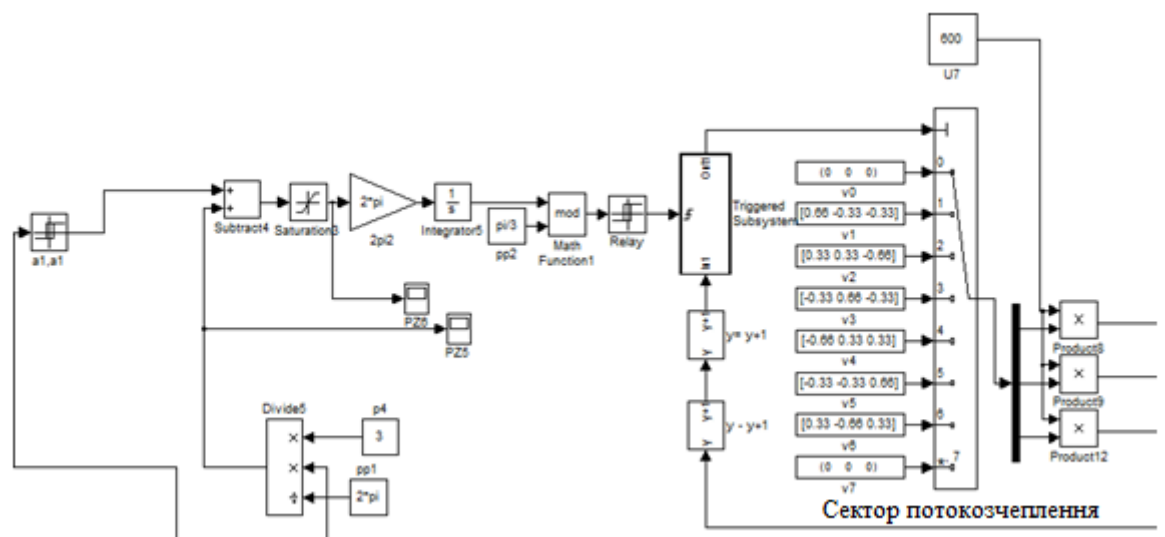


Рисунок 2.11 - Фрагмент моделі, яка реалізує табл. 2.2 перемикань АІН при одноразовій комутації за період

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

0032.206303.000.04MP.ПЗ

Арк.





регуляторів виникає сигнал у вигляді наступних прямокутних почергово імпульсів, що мають одиничну амплітуду. Частота, з якої йдуть імпульси, залежить переважно від внутрішніх параметрів динамічних ланок, що входять в контур. Якщо в контурі використовується двопозиційний релейний регулятор без зони нечутливості (рис. 2.12 а), а об'єкт, що регулюється, є аперіодичною ланкою першого порядку, то для контуру релейного регулювання структурна схема має наступний вигляд (рис. 2.13).

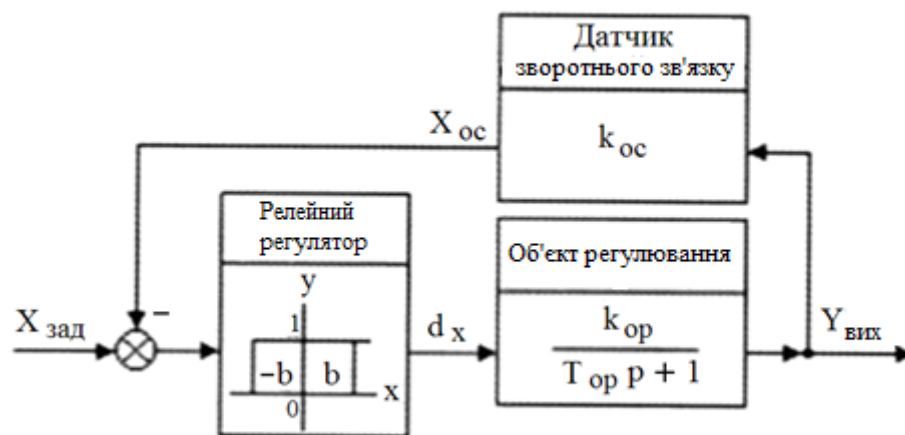


Рисунок 2.13 - Схема структурна контуру для контуру з релейним регулятором, представленим на рис. 2.12а

Для релейного регулятора частота імпульсів на виході  $f_{рег}$  може бути визначена за формулою:

$$(2.20) \quad F_{рег} = \frac{k_{ор} \cdot k_{ос}}{2\pi \cdot (2b) \cdot T_{ор}}$$

де  $k_{ор}$  - коефіцієнт посилення для об'єкта регулювання (ОР);

$T_{ор}$  - постійна часу ЗР;

$k_{ос}$  - коефіцієнт посилення лінійного датчика в колі зворотного зв'язку.

Визначення для сталого значення вихідного параметра  $Y_{уст}$  амплітуди

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>				

відхилень  $\Delta Y$  від даного значення при роботі релейного регулятора обчислюється за формулою:

$$\Delta Y = \frac{2b}{k_{oc}} \cdot Y_{уст.}$$

(2.21)

Оптимальну настройку для контуру з релейним регулятором можна знайти, вирішивши спільно рівняння (2.20) і (2.21).

Коли об'єкт регулювання можна представити апериодическим ланкою другого порядку, а релейний регулятор є двохпозиційним реле з гістерезисних допуском і зоною нечутливості (рис.2.12б), то протікають процеси і налаштування більш складні, і структурну схему об'єкта можна представити в наступному вигляді (рис. 2.14).

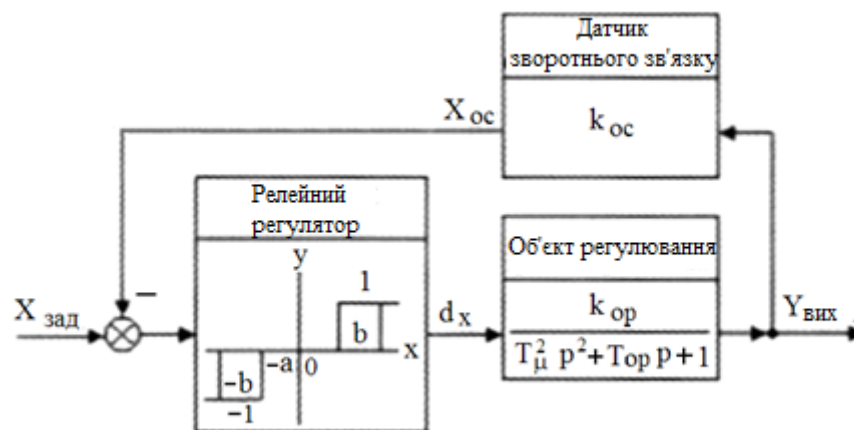


Рисунок 2.14 - Структурна схема для контуру з релейним регулятором, представленим на рис. 2.12б

Для забезпечення стійкості функціонування контуру з будь-яким релейним регулятором необхідно підтримувати автоколивальний режим роботи релейного регулятора. В іншому випадку відбувається втрата працездатності системи.

У функціональній схемі (рис.2.3) є також релейний регулятор прослизання коліс РСК (рис. 2.15)

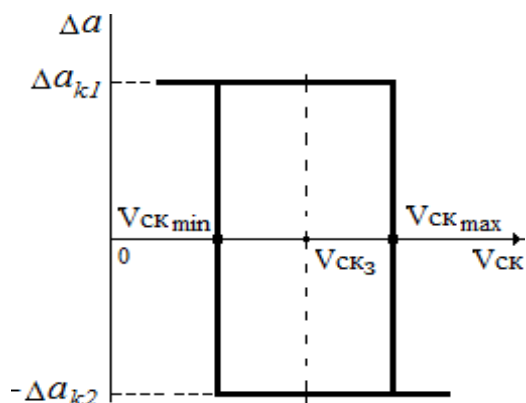


Рисунок 2.15 - Двопозиційний релейний регулятор прослизання коліс  
Функціонування РСК описується наступними рівняннями:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\Delta a_{к2} \text{ при } v_{СК} > v_{СКmax} \\ \Delta a_{к1} \text{ при } v_{СК} \leq v_{СКmax} \end{array} \right\} \text{ при } (dv_{СК}/dt) > 0;$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -\Delta a_{к2} \text{ при } v_{СК} > v_{СКmin} \\ \Delta a_{к1} \text{ при } v_{СК} \leq v_{СКmin} \end{array} \right\} \text{ при } (dv_{СК}/dt) < 0.$$

(2.22)

Крім нелінійних релейних регуляторів СУ ТЕП (рис. 2.3) має регулятор швидкості в зовнішньому по відношенню до моменту контурі швидкості. Цей регулятор є лінійним, зазвичай це пропорційний (П) або пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор. Але можливо також застосування пропорційно-інтегрально диференціального (ПІД) регулятора. В цілому це замкнутий контур зі зворотним зв'язком по кутовий швидкості АД. Для отримання сигналу доцільно використовувати датчик швидкості (частоти роцення) наприклад, імпульсний. Можлива і бездатчикова система, де частота обертання ротора обчислюється за моделлю АД з використанням вимірних

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>					

значень фазних напруг і струмів. Однак застосування такої системи знижує точність і діапазон регулювання, тому в системах з реалізацією граничного зчеплення її застосовувати не варто, переважно використовувати датчик.

У ряді робіт зроблена наближена аналітична оцінка параметрів СУ ТЕП, необхідних для використання потенційних умов зчеплення на 90%. Для цих цілей система ТЕП представлена як джерело моменту аперіодичною ланкою (узагальненим перетворювачем) з постійною часу  $T_{емп}$

$$W_m(s) = \frac{1}{T_{емп}s + 1}$$

(2.23)

І з використанням такого уявлення отримані формули для наближеної оцінки коефіцієнта посилення пропорційного регулятора швидкості (частоти обертання) АТ і максимально допустимої постійної часу узагальненого перетворювача (джерела моменту) (2.23). Згідно виведеним співвідношенням коефіцієнт посилення для регулятора  $k_{рс}$  повинен бути більше наступної величини

$$k_{рс} > 5,4 \psi_0 N_0 \frac{R_k^2}{\mu k_{емп} k_{ос}}$$

(2.24)

Одночасно постійна часу джерела моменту не повинна перевищувати обчислюється з урахуванням параметрів ТЕП значення

$$T_{емп} < 0,09 \frac{J_{\Sigma}}{\psi_{0max} R_k^2 N_0}$$

(2.25)

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $\psi_{0\max} = 0,4$  – прийнятий умовно за максимальний коефіцієнт зчеплення;  
 $N_o$  – вертикальне навантаження осі;  
 $\mu$  – передавальне число для редуктора;  
 $R_k$  – радіус коліс осі;  
 $K_{\text{емп}}$  – коефіцієнт посилення узагальненого перетворювача,  
 одержуваний шляхом ділення максимального моменту АТД  
 на  
 завдання моменту;  
 $k_{oc}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку для контуру швидкості;  
 $J_{\Sigma}$  – приведений до осі коліс загальний момент інерції приводу.

$$J_{\Sigma} = J_{\text{бш}} + J_k + (J_{\text{мш}} + J_p) \times \mu^2, \quad (2.26)$$

де  $J_{\text{бш}}$ ,  $J_k$ ,  $J_{\text{мш}}$ ,  $J_p$  – моменти інерції великий шестерні, колісної пари, малої шестерні,  
 ротора відповідно.

Мінімальне значення коефіцієнта посилення пропорційного регулятора швидкості АТД для магістральних тепловозів 2те25а і маневрових тепловозів ТЕМ21, ТЕМ9Н знаходиться в діапазоні 110 - 180 (приблизно, як і у електровозів). У той же час постійна часу узагальненого перетворювача тепловозів повинна бути менше, ніж у електровозів, в діапазоні 0,0025 - 0,003 з через менший моменту інерції ТЕП для тепловозів. Тоді як у електровозів вона становить (0,004 - 0,005 с). Система розривного керування забезпечує найбільшу швидкодію, що обумовлює доцільність її застосування в тяговому електроприводі.

Так як у внутрішньому контурі ТЕП з ДТС використовується гістерезисний релейний регулятор, то можна налаштовувати лінійний регулятор частоти обертання АД по наближеним формулам, зокрема, для

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>					

пропорційно-інтегрального регулятора:

$$k_{pc} \approx \frac{J_{\Sigma} \cdot k_{om} \cdot f_{pm}}{4k_{oc} \cdot \psi_{sm}};$$
$$T_{pc} \approx \frac{32 \cdot k_{oc} \cdot \psi_{sm}}{J_{\Sigma} \cdot k_{om} \cdot f_{pm}^2},$$

(2.27)

де  $T_{pc}$  - постійна часу ПІ-регулятора;

$k_{pc}$  - коефіцієнт посилення ПІ регулятора;

$\psi_{sm}$  - амплітуда номінального потокозчеплення статора АД;

$f_{pm}$  - частота автоколивань регулятора моменту;

$k_{om}$  - коефіцієнт зворотного зв'язку по моменту АД.

Для забезпечення необхідної якості перехідних процесів, а також досягнення допустимого значення статичної помилки по швидкості при використанні пропорційного регулятора швидкості настройки даного регулятора можуть варіюватися в системах розривного керування в досить широких межах. Однак в цілому швидкодію СУ визначальним чином залежить від частоти автоколивань релейного гістерезисного регулятора контуру моменту АД.

На основі вищевикладеного складена модель електричної підсистеми приводу тепловоза ТЕМ9Н засобами основної бібліотеки MatLab / Simulink, виконані пробні розрахунки. На рис. 2.15 як приклад представлені результати моделювання динамічних процесів при переході з багаторазової комутації на одноразову комутацію вентилів АІН на періоді вихідної напруги. Моделювання виконано для ТЕП візка (рис. 2.3), причому модель, складена для електричної частини поєднана із спрощеною моделлю для механічної підсистеми приводу, математичний опис якої наведено в наступному розділі (розділі 3).

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При переході в другій зоні на одноразову комутацію, ми продовжуємо, перемикаючи вентиля інвертора, обертати вектор напруги (а значить, і потокозчеплення) статора (вектори показані на діаграмі рис. 2.10), з необхідною частотою, яка визначається по частоті обертання ротора ( $f_{об}$ ) і абсолютного ковзання  $f_2$  за формулою (1.5).

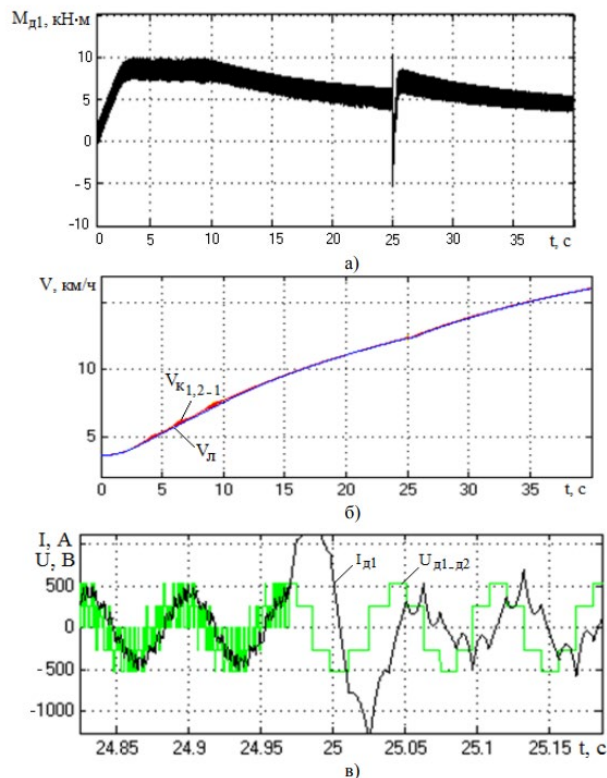


Рисунок 2.15. Результати моделювання динамічних процесів при переході з багаторазової на одноразову комутацію вентилів АІН: а) - крутний момент АТД1 ( $M_{д1}$ ); б) - швидкість локомотива ( $V_{л}$ ) і коліс першої осі ( $V_{к1,2-1}$ ); в) - напруга на двигунах першого візка ( $U_{д1-д2}$ ) і фазний струм АТД1 ( $I_{д1}$ ) (збільшено)

З графіків видно, що якісно картина очікувана, відбувається перехід на одноразову комутацію АІН, супроводжуваний перехідним процесом, який швидко згасає, локомотив продовжує розганятися. Кількісна оцінка достовірності результатів моделювання проводилася шляхом порівняння

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>				

розрахункових осцилограм (рис. 2.16) з експериментальними даними, отриманими при випробуваннях тепловоза ТЕМ9Н (рис. 2.17).

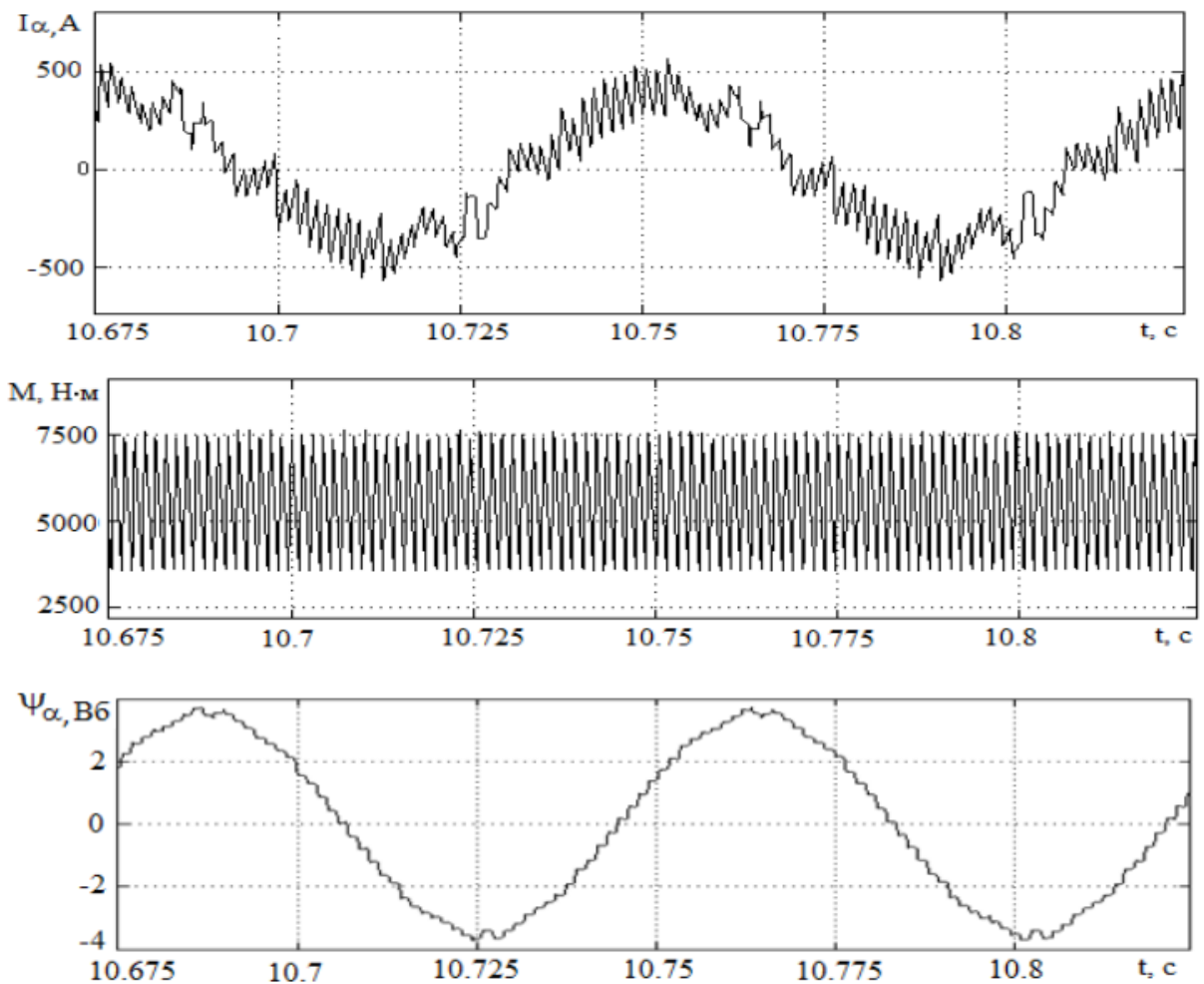


Рисунок 2.16 - Результати моделювання ТЕП ТЕМ9Н:  $I_{\alpha}$  - струм статора по осі ;  $M$  - електромагнітний момент;  $\psi_{\alpha}$  - потокозчеплення статора по осі

У модель були підставлені параметри асинхронного двигуна АД917УХЛ1, встановленого на ТЕМ9Н, моделювання проводилося при тих же значеннях напруги в проміжному контурі, швидкості локомотива і завдання на момент, що і в експерименті (рис. 2.17). Ширина релейного коридору для електромагнітного моменту АТД була підібрана такою ж, як на експериментальних осцилограмах, щоб забезпечити приблизно однакову

Арк.

**0032.206303.000.04МР.ПЗ**

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

частоту комутацій в експерименті та розрахунку.

напруга dc-link	1030	В	частота обертання ротора	257,1	об/хв
потік	3,7	Вб	ковзання	0,261	Гц
швидкість локомотиву	11,5	км/год	момент двигуна	5365	Нм
струм по першій гармоніці	424	А	потужність активна	160,7	кВт
напруга по першій гармоніці	313,1	В	діюче значення струму	311,6	А
частота поля статора	13,12	Гц	пікове значення струму	610	А

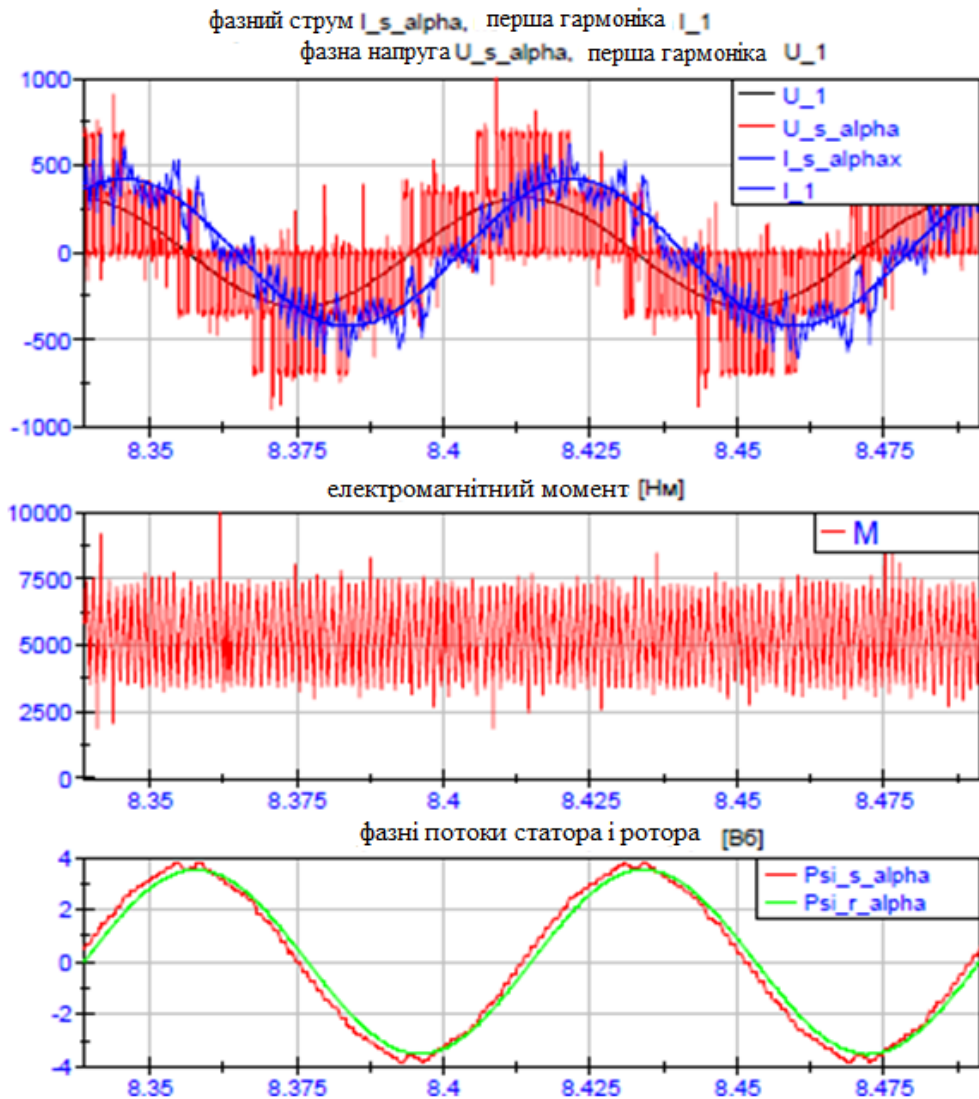


Рисунок 2.17 - Осцилограми натурних випробувань ТЕП ТЕМ9Н

Для скорочення часу розрахунку динаміки ТЕП при подальшому з'єднанні електричної підсистеми MatLab / Simulink з деталізованою моделлю механічної частини (МЧ) тепловоза, виконаної в ПК «Універсальний механізм» (УМ), моделювання роботи статичного перетворювача було

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>				

виконано з використанням комутаційних функцій (табл. 2.4; рис. 2.9). Результати моделювання (рис. 2.16) показують задовільний збіг розрахункових і експериментальних даних (розбіжність не перевищує 7%, якщо відкинути миттєві пікові значення струму і моменту), що підтверджує достовірність розрахунків і можливість використання моделі для аналізу динамічних процесів ТЕП ТЕМ9Н при реалізації граничних зусиль.

**Висновки до розділу.** Запропоновано спосіб управління ТЕП з реалізацією граничних зусиль АТД, підключеними паралельно до одному АІН.

1. Розроблено функціональну схему і алгоритми роботи СУ ТЕП гібридного маневрового тепловоза зі спільним регулюванням АД на межі зчеплення.

2. Розроблено математичні і комп'ютерні моделі електричної підсистеми ТЕП з спільним розривних регулюванням АД в режимі реалізації граничних зусиль.

Результати порівняння розрахункових осцилограм з експериментальними даними підтверджують достовірність результатів моделювання, розбіжність не перевищує 7%.

### 3 МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.206303.000.04МР.ПЗ				

## МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ТЕП ГІБРИДНОГО ТЕПЛОВОЗА

При регулюванні двигунів візка на межі зчеплення управління, як викладено в розділі 2, ведеться в кожному режимі по усередненій моделі АТД і частоті обертання ротора одного з двигунів.

У той же час, швидкості роторів паралельно включених АТД візка можуть відрізнятися з багатьох причин: неоднакові параметри двигунів, різниця діаметрів бандажів колісних пар, відмінність вертикальних навантажень коліс першої та другої осей, відмінність умов зчеплення коліс першої та другої осей, коливання в механічній передачі, викликані численними зовнішніми факторами (нерівності шляху, рейкові стики, коливання підресорених частин візка та ін.). Досить повно врахувати процеси в механічній частині ТЕП при регулюванні на межі по зчепленню дозволяє модель тепловоза ТЕМ9Н з високим ступенем деталізації, однак попередньо зручніше розглянути найбільш суттєві явища на спрощеній моделі.

### 3.1 Спрощене моделювання механічної підсистеми ТЕП

На маневрових і вантажних локомотивах застосовується переважно опорно-осьовий підвішування АТД, зокрема, таке підвішування застосовано на вітчизняних маневрових тепловозах ТЕМ21, на магістральних вантажних тепловозах 2те25а, причому, це підвішування зазвичай використовується і досліджувалося в роботах [13] з жорстким зубчастим колесом редуктора.

На гібридному маневрово-вивізному ТЕМ9Н застосовується опорно-осьовий підвішування з пружним зубчастим колесом редуктора. Цю конструктивну особливість слід врахувати при моделюванні, так як вважається, що пружне колесо, дещо демпфуючи коливання моменту, викликані роботою АІН, а також обурення від нерівності шляху може зіграти позитивну роль і знизити ймовірність резонансних явищ в ТЕП, що викликають підвищення навантажень. Але в той же час в системі «ротор-колісна пара» застосування в

					<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



осі колісної пари; сумарну масу шестерні і вінця пружного зубчастого колеса із загальним моментом інерції  $J_{шк}$  щодо осі шестерні; колісну пару з моментами інерції коліс  $J_{k1}$  і  $J_{k2}$  щодо власної осі і локомотив (і поїзд) масою  $m_d$ , що припадає на одну вісь. Пружно-дисипативні властивості валу ротора, підвіски остова двигуна і осі колісної пари враховуються введенням відповідних жорсткостей та коефіцієнтів демпфірування:  $C_p, C_k, C_o, C_d$  – кутові жорсткості валу ротора, пружних елементів зубчастого колеса редуктора, осі колісної пари і жорсткість підвіски двигуна відповідно;  $\beta_d, \beta_k$  – коефіцієнти еквівалентного в'язкого тертя підвіски двигуна і пружних елементів зубчастого колеса,  $\beta_r, \beta_o$  – коефіцієнти демпфірування вала ротора і осі колісної пари відповідно.

Розрахункова кінематична схема тягового приводу осі локомотива (рис. 3.1) складена при наступних основних припущеннях: враховувалися тільки кутові коливання системи ротор - острів АТД в поздовжній вертикальній площині по відношенню до осі колії; коливання підресорених частин екіпажу і візка, а також рейкової основи не враховувалися; впливи з боку шляху не враховувалися; динамічні процеси в приводі розглядалися без урахування зазору в зубчастому зчепленні тягового редуктора; в системі враховувалося в'язке тертя. Крім того, вважалося, що сили і моменти, що діють в розрахунковій схемі, прикладені в місці зосереджених мас; пружні ланки невагомі і мають піддатливість, що характеризується незмінним коефіцієнтом жорсткості; деформації підкоряються закону Гука [1]. Параметри елементів моделей механічної частини ТЕП приведені в додатку 3.

Система рівнянь механічної частини ТЕП осі, відповідна розрахунковій схемі (рис. 3.1), складена на основі принципу Даламбера з урахуванням ефекту планетарного механізму тягової передачі.

$$\left. \begin{aligned}
J_T \frac{d\omega_T}{dt} &= M - M_T - \beta_T [\omega_T - (\mu + 1)\omega_d - \mu\omega_{k1}]; \\
J_d \frac{d\omega_d}{dt} &= M_T(\mu + 1) + \beta_T(\mu + 1) [\omega_T - (\mu + 1)\omega_d - \mu\omega_{k1}] - M_d - \beta_d l_d^2 - M; \\
J_{\text{ШК}} \frac{d\omega_{\text{ШК}}}{dt} &= M_T + \beta_T [\omega_T - (\mu + 1)\omega_d - \omega_{\text{ШК}}] - M_{\text{ШК}} - \beta_K (\omega_{\text{ШК}} - \mu\omega_{k1}); \\
J_{k1} \frac{d\omega_{k1}}{dt} &= M_{\text{ШК}}\mu + \beta_K \cdot \mu [\omega_{\text{ШК}} - \mu\omega_{k1}] - M_{ok} - \beta_{ok} (\omega_{k1} - \omega_{k2}) - M_{k1}; \\
J_{k2} \frac{d\omega_{k2}}{dt} &= M_0 + \beta_0 (\omega_{k1} - \omega_{k2}) - M_{k2}; \\
m_{\text{л}} \frac{dv_{\text{л}}}{dt} &= F_{k1} + F_{k2} - F_0; \\
\frac{dM_T}{dt} &= C_T [\omega_T - (\mu + 1)\omega_d - \mu\omega_{\text{ШК}}]; \\
\frac{dM_d}{dt} &= C_d l_d^2 \omega_d; \\
\frac{dM_{\text{ШК}}}{dt} &= C_K (\omega_{\text{ШК}} - \mu\omega_{k1}); \\
\frac{dM_0}{dt} &= C_0 (\omega_{k1} - \omega_{k2}); \\
F_{k1} &= N_{k1} \psi_0 k_1; \\
F_{k2} &= N_{k2} \psi_0 k_2; \\
M_{k1} &= F_{k1} \frac{D_{k1}}{2}; \\
M_{k2} &= F_{k2} \frac{D_{k2}}{2},
\end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

де  $M$  – електромагнітний момент АТД;

$M_T, M_{\text{ШК}}, M_d, M_0$  – моменти пружних сил на валу ротора, в пружних елементах

зубчастого колеса, в підвісці корпусу і на осі колісної пари відповідно;

$\mu$  – передавальне число редуктора;

$\omega_r, \omega_{\text{ШК}}, \omega_{k1}, \omega_{k2}$  – кутові швидкості ротора, шестерні редуктора спільно з наведеної до неї масою вінця зубчастого колеса, першого

і

другого коліс щодо власних осей відповідно;

					<i>0032.206303000.04MP.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ док.м.</i>	<i>Піппис</i>	<i>Дата</i>		

$\omega_d$  – кутова швидкість корпусу щодо осі колісної пари;  
 $v_{л}$  – лінійна швидкість локомотива (і поїзда);  
 $l_d$  – база підвіски двигуна;  
 $D_k$  – діаметр колеса;  
 $F_c$  – сила опору руху поїзда;  
 $N_{k1}, N_{k2}$  – сили вертикального натискання коліс на рейки;  
 $M_{k1}, M_{k2}$  – тягові моменти першого і другого коліс відповідно;  
 $\psi_0$  – потенційний коефіцієнт зчеплення;  
 $k_1, k_2$  – коефіцієнти зчеплення першого і другого коліс з рейкою в  
 відносних  
 одиницях (рис. 1.1.

Пружні і дисипативні моменти:

$$M_r = C_r \cdot \varphi_{в1} = C_r [\varphi_r - (\mu+1)\varphi_d - \varphi_{шк}]; \quad (3.2)$$

$$M_{r\beta} = \frac{\beta_r \cdot d\varphi_{в1}}{dt} = \beta_r [\omega_r - (\mu+1)\omega_d - \omega_{шк}], \quad (3.3)$$

де  $\varphi_{в1} = \varphi_r - (\mu+1)\varphi_d - \varphi_{шк}$  – кут скручування валу АДМ;

$\varphi_{шк}$  – кутове переміщення шестірні.

Шляхом диференціювання (3.2) знаходимо вираз (3.1).

Моменти пружних ( $M_{шк}$ ) і в'язких ( $M_{шк\beta}$ ) взаємодій

$$M_{шк} = C_k (\varphi_{шк} - \mu \cdot \varphi_{к1}); \quad (3.4)$$

$$M_{шк\beta} = \beta_k (\dot{\varphi}_{шк} - \mu \cdot \dot{\varphi}_{к1}). \quad (3.5)$$

Нелінійна характеристика пружних елементів колеса представлена нижче (рис. 3.2).

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>					

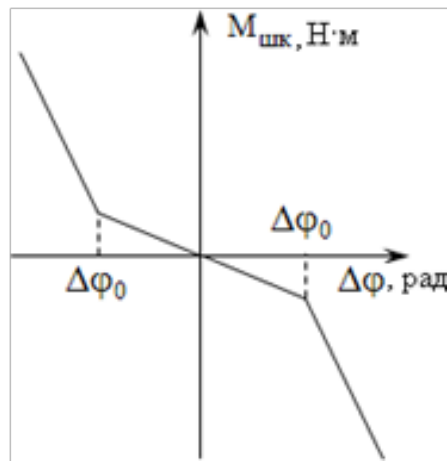


Рисунок 3.2. Нелінійна характеристика пружних елементів

Для корпусу АТ момент інерції обчислюється за наближеною формулою

$$J_d \approx 0,5m_d \cdot R_d^2 + m_d \cdot n^2 = m_d(0,5R_d^2 + n^2),$$

де  $m_d$  – маса корпусу;

$R_d$  – радіус корпусу АД;

$n$  – міжцентрова відстань.

Параметри підвішування корпусу ( $C_d, \beta_d$ ) справедливі лише при незначних лінійних переміщеннях, і при складанні математичної моделі МЧ отримані співвідношення між лінійними ( $L$ ) і кутовими деформаціями підвіски АТ (рис. 3.3).

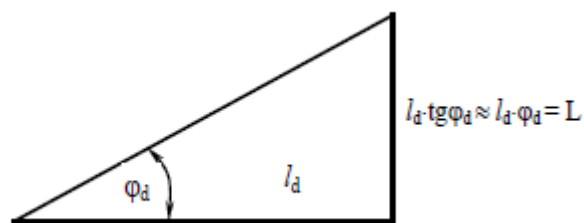


Рисунок 3.3. - Пояснення співвідношень деформацій підвіски

У цьому випадку такі рівняння сил пружності і дисипації підвіски

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>				

$$F_{dc} = C_d \cdot l_d \cdot \varphi_d;$$

$$F_{d\beta} = \beta_d \frac{dL}{dt} = \beta_d \cdot l_d \frac{d\varphi_d}{dt}.$$

Вирази моментів від даних пружних ( $M_d$ ) і дисипативних ( $M_{d\beta}$ ) сил:

$$M_d = C_d \cdot l_d \cdot \varphi_d \cdot l_d = C_d \cdot l_d^2 \cdot \varphi_d; \quad (3.6)$$

$$M_{d\beta} = \beta_d \cdot l_d \frac{d\varphi_d}{dt} l_d = \beta_d \cdot l_d^2 \frac{d\varphi_d}{dt} = \beta_d \cdot l_d^2 \cdot \omega_d. \quad (3.7)$$

Вирази для дисипативного та пружного моментів підвіски корпусу підставляються в загальну математичну модель МЧ (3.1). Щоб вивести співвідношення для пружного моменту підвіски АТ в диференціальної формі, використуваної для моментів пружних сил в (3.1), необхідно продиференціювати формулу пружного моменту підвішування.

Щодо корпусу, з урахуванням його лінійних переміщень і кутових переміщень пружного колеса редуктора, ротор рухається з наступною кутовий швидкістю.

$$\omega_{r-d} = 2\omega_r - (\mu + 1) \omega_d - \omega_{шк}. \quad (3.8)$$

Виходить, що ротор переміщається щодо корпусу двигуна не тільки за рахунок того, що він обертається навколо власної осі, але додатково враховуються переміщення корпусу АТ, який коливається на власному підвішування. Тому швидкість  $\omega_{r-d}$  визначає ковзання асинхронного двигуна, від якого залежить його електромагнітний момент, і включається в модель двигуна, обумовлюючи електромеханічну зв'язок в досліджуваній електричній машині.

З урахуванням пружності і дисипації осі обчислюється швидкість  $\omega_{k2}$  другого колеса. Незважаючи на те, що вісь колісної пари має досить високою жорсткістю, облік її пружності необхідний, щоб не втратити одну з основних форм коливань при зриві зчеплення.

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>					

Сили тяги коліс визначаються з одинадцятого і дванадцятого рівнянь системи (3.1) з урахуванням реалізації сили зчеплення, описаного в розділі 1 (рис. 1.1), формули (1.1)-(1.3).

При реалізації сил гальмування і тяги, як уже зазначалося, виникає кріп, прослизання коліс. При спрощеному моделюванні застосований розрахунок сил кріпа відповідно до методики Меншутіна з урахуванням робіт [2; 6]. Крива зчеплення локомотива (рис. 3.4) апроксимована трьома ділянками:

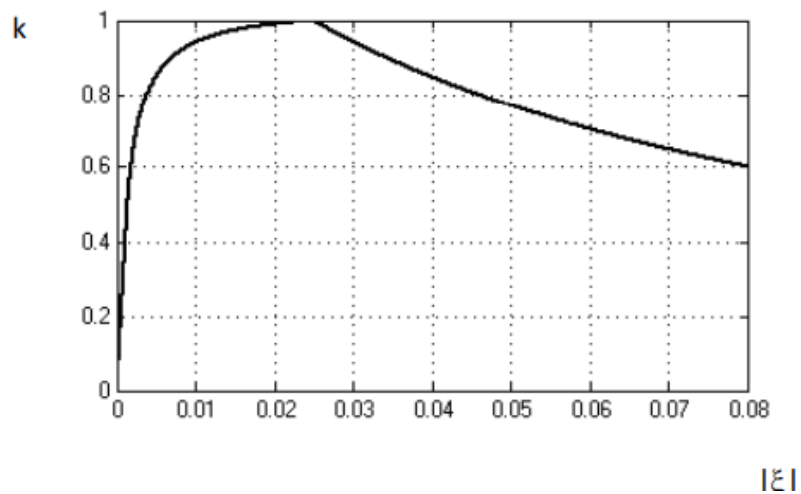


Рисунок 3.4 – Характеристика зчеплення

1)  $0 \leq |\xi| \leq 0,0014$  – ділянка пружного пропорційного прослизання:

2)

$$k = 359,61178 \cdot |\xi|; \quad (3.9)$$

3)  $0,0014 < |\xi| \leq 0,025$  – ділянка пружного прослизання:

4)

$$k = \frac{350 \cdot |\xi| - 0,155}{0,195 + 336 \cdot |\xi|}; \quad (3.10)$$

5)  $|\xi| > 0,025$  – ділянка надлишкового ковзання (буксування або юза)

$$k = \frac{1}{1 - \chi \cdot v_{л}(0,025 - |\xi|)}, \quad (3.11)$$

де  $v_{л}$  – швидкість локомотива, м/с;

						<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

$\chi$  – жорсткість третьої (падаючої) ділянки характеристики зчеплення, с/м;

$\xi$  – крип (швидкість ковзання колеса в відносних одиницях, що позначається також  $v_{ск}$ ).

Залежно від швидкості локомотива  $v_{л}$  жорсткість  $\chi$  набуває таких значень (табл. 3.1) :

Таблиця 3.1 – Жорсткість падаючої ділянки характеристики зчеплення

$v_{л}$ , км/год	0-5	5-20	20-40	40-120
$\chi$	0,9	0,6	0,5	0,35

Коефіцієнт зчеплення  $i$ -го колеса підставляється в рівняння системи (3.1) для обчислення сил тяги і тягових моментів коліс  $F_{ki}$  і  $M_{ki}$  відповідно.

На основі дослідних даних і літературних джерел відомо, що потенційний коефіцієнт  $\psi_0$  залежить від швидкості руху (табл. 3.2), це враховується при моделюванні.

Таблиця 3.2 – Зміна  $\psi_0$  від швидкості руху

$v_{л}$ , км/ч	0...5	10	20	40	60	80	100	120	Джерело даних
$\psi_0$	0,445	-	0,341	0,308	-	0,286	-	0,21	[118]
$\psi_0$	0,35...0,4	0,3...0,35	0,3	0,29	0,27	0,25	0,23	0,21	[59]
$\psi_0$	0,33...0,36	0,31	0,29	0,27	0,25	0,24	0,23	0,21	[119]

Щоб створити модель двовісного візка використовуються дві системи (3.1) для двох осей, для моделі ТЕМ9Н 4 системи (3.1) для чотирьох осей, при цьому сили тяги всіх коліс додаються.

### 3.2 Моделювання механічної частини гібридного тепловоза ТЕМ9Н з високим ступенем деталізації

Щоб більш повно врахувати параметри МЧ, зокрема, зміну вертикальних навантажень в гальмівних і тягових режимах локомотива, власні форми коливань, моделювання МЧ слід виконати з високим ступенем деталізації в розроблюваних для цих цілей ПК. Моделювання механічної підсистеми локомотива ТЕМ9Н виконано в ПК УМ . У цьому комплексі з успіхом застосовані методи моделювання динаміки систем тіл, рівняння синтезуються в символному вигляді автоматично після розробки моделі. У УМ є модуль UM Loco для створення моделей рейкових екіпажів.

При моделюванні МЧ локомотива в УМ екіпаж необхідно представити у вигляді просторової механічної системи, що складається з абсолютно твердих тіл, з'єднаних шарнірами і силовими елементами різних типів. Даними, що описують модельований об'єкт є: інерційні параметри тіл, шарніри, силові елементи і графічні образи. Далі по введених даних автоматично синтезуються системи рівнянь, висновок яких вручну традиційними методами практично неможливий.

Модель тепловоза ТЕМ9Н (рис. 3.4а), розроблена спільно з співробітниками лабораторії обчислювальної механіки БГТУ, має 66 ступенів свободи. Модель побудована за методом підсистем. У кузова 6 ступенів свободи, він представлений у вигляді твердого тіла. Підсистема кожного візка включає 30 ступенів свободи (рис.3.5; 3.6). До моделі тепловоза для імітації складу з метою правильного відображення перерозподілу вертикальних навантажень осей, яке дуже важливо при моделюванні зриву зчеплення, приєднані моделі вагонів (рис. 3.5б).

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



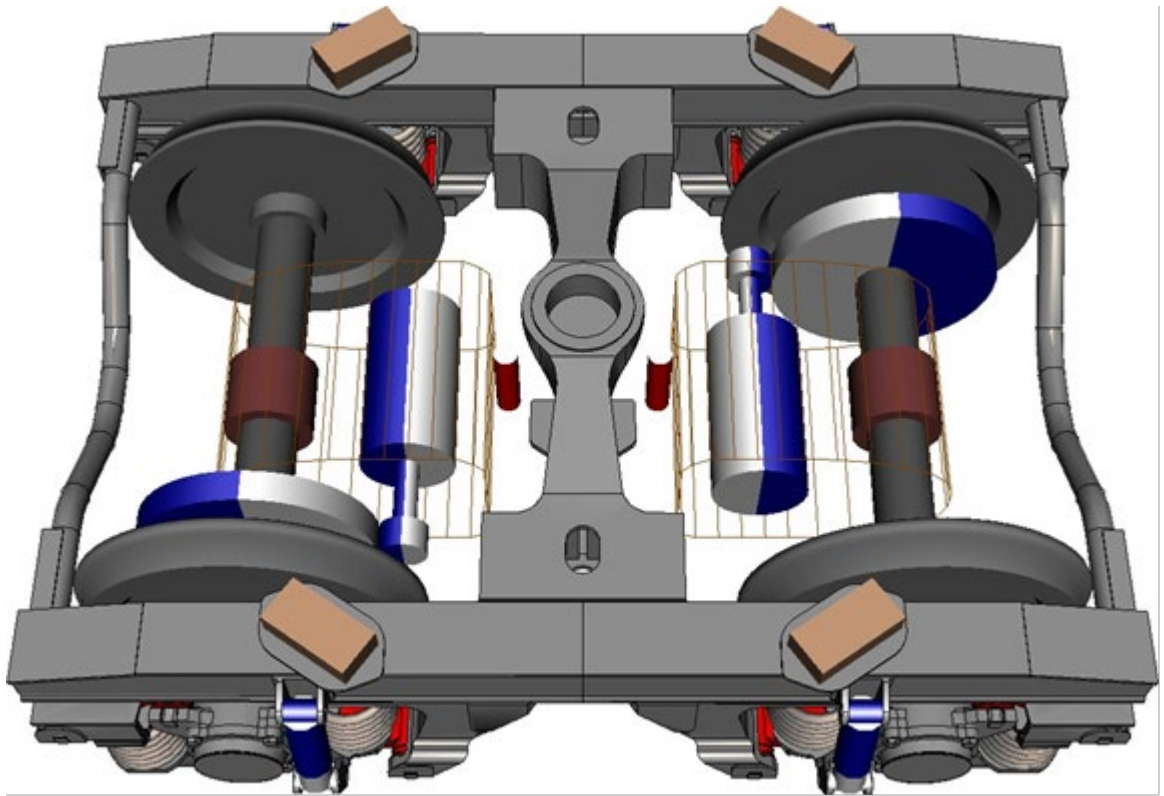


Рисунок 3.7 – Модель візка ТЕМ9Н, вигляд зверху

Локомотив має змішане розташування АТД візків (рис. 3.6, 3.7), в конструкції візків не передбачені похилі тяги або спеціальні довантажувачі для вирівнювання вертикальних навантажень осей в режимі тяги, що може призводити до суттєвої нерівномірності вертикальних навантажень, які погіршують використання зчіпної ваги локомотива.

Розглянемо особливості моделювання колісно-моторного блоку (рис. 3.8) з пружним зубчастим колесом редуктора. Колісна пара має 7 ступенів свободи: 6 ступенів свободи, як у твердого тіла і 1 обертальна ступінь свободи навколо осі.

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>					





Рисунок 3.9 - Пружна характеристика для зубчастого колеса

Для аналізу форм коливань колісної пари локомотива використовувалася кінцевоелементна модель колісної пари, представлена на рис. 3.10.

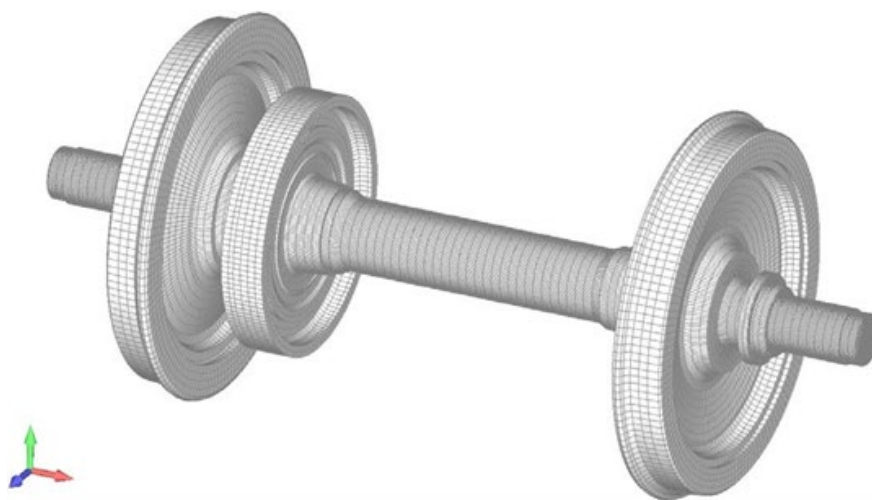


Рисунок 3.10 – Кінцевоелементна модель колісної пари

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



реалізації граничних тягових зусиль фрикційних автоколивань з вузлом на осі колісної пари.

Кутову жорсткість осі колісної пари знайдемо з формули для обчислення парціальної частоти:

$$k^2 = c \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2},$$

(3.12)

де  $k$  – частота крутильних коливань колісної пари, певна методом кінцевих елементів, рад/с;

$J_1$  – момент інерції відносно осі обертання половини колісної пари, кг·м<sup>2</sup>;

$J_2$  – сумарний момент інерції половини колісної пари і зубчастого колеса, кг·м<sup>2</sup>;

$c$  – кутова жорсткість осі колісної пари, приведена до центру осі, Нм/рад.

З формули (3.12) виразимо кутову жорсткість осі колісної пари  $c$ :

$$c = k^2 \frac{J_1 J_2}{J_1 + J_2}.$$

(3.13)

У вираз (3.13) підставимо наступні чисельні значення:

$$k = 81,94 \cdot 2\pi = 514,84 \text{ рад/с}; \quad J_1 = 114 \text{ кг}\cdot\text{м}^2; \quad J_2 = 98 \text{ кг}\cdot\text{м}^2,$$

і таким чином визначимо кутову жорсткість осі колісної пари  $c = 1,395 \cdot 10^7$  Нм/рад.

Залежність коефіцієнта зчеплення від швидкості ковзання на падаючому ділянці характеристики зчеплення розраховується в УМ за методикою О.

Полаха:

$$\psi = \psi_0 [(1-A)e^{(-B \cdot V_s)} + A], \quad (3.14)$$

де  $V_s = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_k}$ ,  $\varepsilon_i$  – поточна швидкість кріпа, м/с;

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>				

$\varepsilon_k$  – гранична швидкість для кріпа, перевищення якої викликає зрив зчеплення м/с;

$A$  – відношення коефіцієнтів тертя при нескінченній та нульовій швидкості прослизання:

$B$  – коефіцієнт експоненціального зменшення коефіцієнта тертя.

Моделювання контактних сил виконується за методом FastSim. Для вирішення диференціальних рівнянь використовується чисельний метод Парку, розраховується матриця Якобі.

Для ілюстрації зміни розподілу вертикальних навантажень осей, викликаного роботою тягових двигунів, на рис. 3.11 наведені результати моделювання перерозподілу вертикальних навантажень в режимі тяги (рис. 3.11, зліва) і електричного гальмування (рис. 3.11, справа) локомотива із составом 1000 т з 10-и вагонів.

Завдання на максимальний момент (обмеження по моменту) в даному експерименті одно в режимі тяги  $5400 \text{ Н} \cdot \text{м}$  і  $-5400$  (момент на роторах АТД наростає і знижується від нуля до максимуму за 1 с) в режимі гальмування. З графіків видно, що в режимі тяги осі локомотива 1 і 3 (перші осі візків) розвантажуються, а осі 2 і 4 (другі в візках) - навантажуються; в режимі гальмування навантажуються перші осі, розвантажуються – другі.

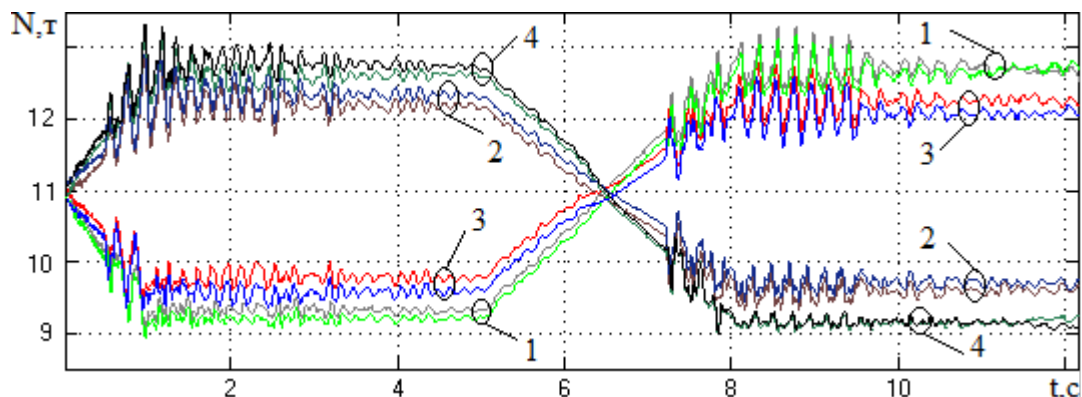


Рисунок 3.11 – Зміна вертикальних навантажень коліс 1-4 осей локомотива із составом

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>					

У пілотному варіанті ТЕМ9Н не передбачені похилі тяги в конструкції візків або спеціальні довантажувачі, які б дозволили вирівняти вертикальні навантаження. Отриманий розподіл вертикальних навантажень в тяговому і гальмівному режимах відповідає аналітичними прогнозами і викликано особливостями конструкції локомотива. Пилкоподібні коливання вертикальних навантажень викликані поздовжніми динамічними коливаннями локомотива і вагонів. Середні статичні вертикальні навантаження коліс на початку руху, - 10,98 тон, - підтверджуються аналітичним розрахунком і говорить про достовірності результатів моделювання (вага дизельного палива і піску при моделюванні не враховувалися).

Подальші дослідження реалізації тягових зусиль (на моделях, суміщених з електричної підсистемою, розділ 4) показують, що осі візків тепловоза ТЕМ9Н, обертаються паралельно підключеними до АН двигунами, по навантаженнях дуже істотно розрізняються, - до 10,8 Т при реалізації потенційного коефіцієнта зчеплення  $\psi_0 = 0,4$ , обертаючі моменти на валу АТД при цьому близькі до номінальних.

Для визначення резонансних частот механічної частини ТЕП було виконано моделювання розгону ТЕМ9Н без складу (на автозчеплення прикладена спеціальна сила опору) під дією експоненціально наростаючого моменту на роторах АТД (від 0 до 5400 Нм за 20 сек.). Причому, до експоненціального моменту ротора АТД1 першої осі, починаючи з  $t = 10$  сек., Була додана гармонійна складова амплітудою 2000 Нм з лінійно змінною частотою від 0 до 100 Гц за 10сек (рис. 3.12).

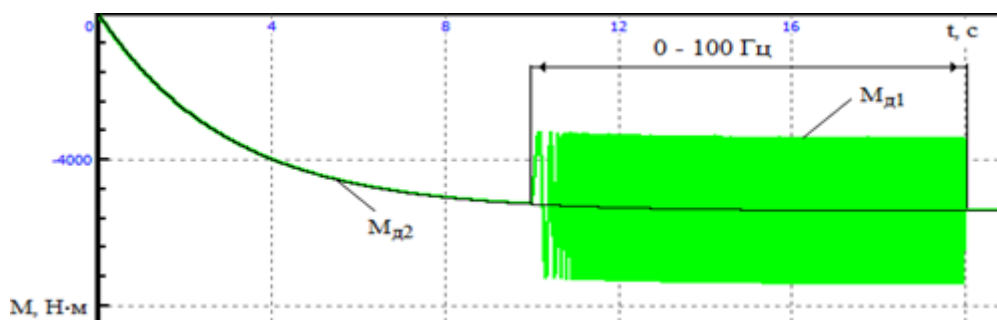
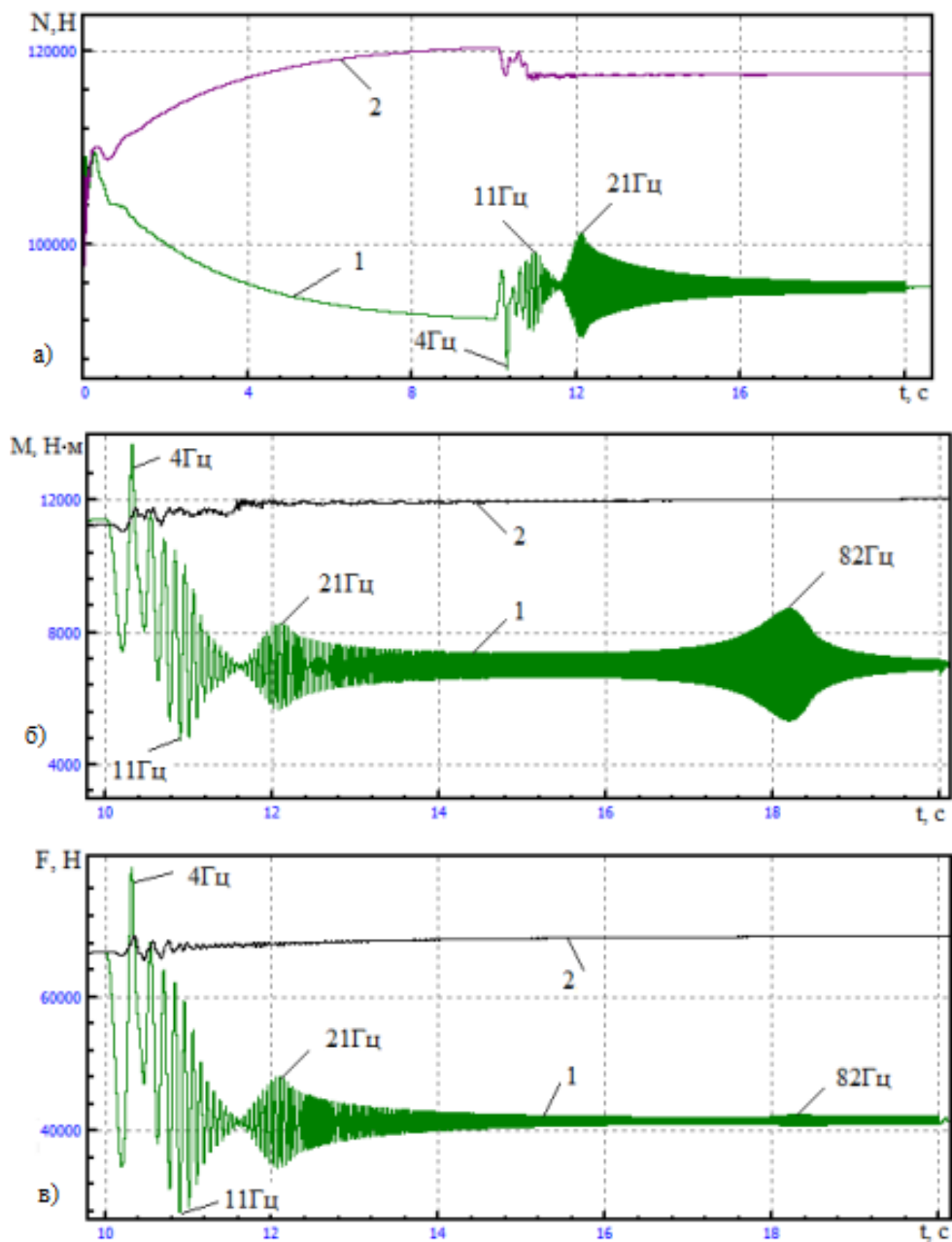


Рисунок 3.12 – Крутні моменти прикладені до роторів АТД

Дослідження виконано при  $\psi_0 = 0,35$  (рис. 3.13, без зриву зчеплення) і  $\psi_0 = 0,25$  (рис. 3.14, зі зривом зчеплення). Там, де частота вимушених коливань з лінійно наростаючою частотою збігається з власною частотою системи, спостерігаються резонанси.





розрахованої методом кінцевих елементів. При зриві зчеплення гармонійний склад резонансних частот дещо змінюється, що узгоджується з роботами.

У режимі без зриву зчеплення найістотніше виражені резонанси на частотах 4, 6, 21 і 42 Гц. При зриві зчеплення найбільші резонанси спостерігаються при частотах 4, 11, 21 і 82 Гц.

**Висновки до розділу.** 1. Розроблено математичні і комп'ютерні моделі механічної підсистеми ТЕП гібридного тепловоза ТЕМ9Н з опорно-осьової підвіскою АТД і пружним зубчастим колесом.

2. Певні при моделюванні середні статичні вертикальні навантаження коліс на початку руху складають 10,98 тон і відповідають аналітичних розрахунків.

3. Виявлена істотна нерівномірність розподілу вертикальних навантажень осей в гальмівних і тягових режимах, причому при збільшенні моментів АД вона зростає: в режимі тяги перші осі візків розвантажуються, другі - навантажуються. У режимі гальмування - навпаки. Такий розподіл навантажень при роботі АД визначається конструктивними особливостями локомотива і відповідає аналітичними прогнозами.

4. Різниця вертикальних навантажень між першою і другою віссю візка може доходити до 10,8 тон при номінальних обертають моменти на валу двигунів.

5. На основі моделювання визначено резонансні частоти механічної частини приводу: без зриву зчеплення найбільш яскраво виражені резонанси на частотах 4, 6, 21 і 42 Гц. При зриві зчеплення 4, 11, 21 і 82 Гц.

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## **4 КОМПЛЕКСНІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ МОДЕЛІ ТЕП З СПІЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ АТД І ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ГРАНИЧНИХ ЗУСИЛЬ**

Комплексні електромеханічні моделі припускають з'єднання моделей електричної (силової і керуючої) і механічною підсистем ТЕП в єдину модель, що враховують динаміку електричної і механічної частини ТЕП в їх взаємодії і взаємовплив. Комплексні моделі виконані, як зі спрощеної механічної підсистемою, в MatLab / Simulink, так і з деталізованим поданням механічної частини, на основі поєднання ПК MatLab / Simulink і UM за допомогою спеціального інтерфейсу CoSimulation.

### **4.1 Створення комплексних моделей ТЕП зі спільним регулюванням АТД**

На першому етапі логічною та методично правильною є розробка моделі ТЕП зі спрощеною механічною частиною. При створенні такої моделі по рівняннях (3.1-3.11) з урахуванням табл. 3.1, 3.2 в MatLab / Simulink з динамічних ланок складається блок-діаграма механічної підсистеми ТЕП для однієї осі локомотива і оформлюється у вигляді підсистеми. На виході підсистеми є розраховуються кутові швидкості і моменти всіх врахованих елементів розрахункової схеми (3.1), а також сили тяги коліс. Розроблена модель МЧ ТЕП осі дублюється для другої осі візка. На вхід моделей механічної частини першої та другої осей подаються електромагнітні моменти першого і другого АТД відповідно (АТД1 і АТД2, рис. 2.3) з моделі електричної підсистеми ТЕП візка, складеної на основі рівнянь (2.1-2.14; 2.17-2.19; 2.22-2.27 з урахуванням табл. 2.1, 2.2, 2.4). Далі підсумовуються сили тяги всіх чотирьох коліс візка і прикладаються до інерційної маси локомотива і екаду. Як приклад на рис. 4.1 приведена

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

комплексна електромеханічна модель ТЕП візка. Аналогічно складається модель ТЕП чотирьохвісного локомотива, що включає моделі ТЕП двох візків (рис. 4.2).

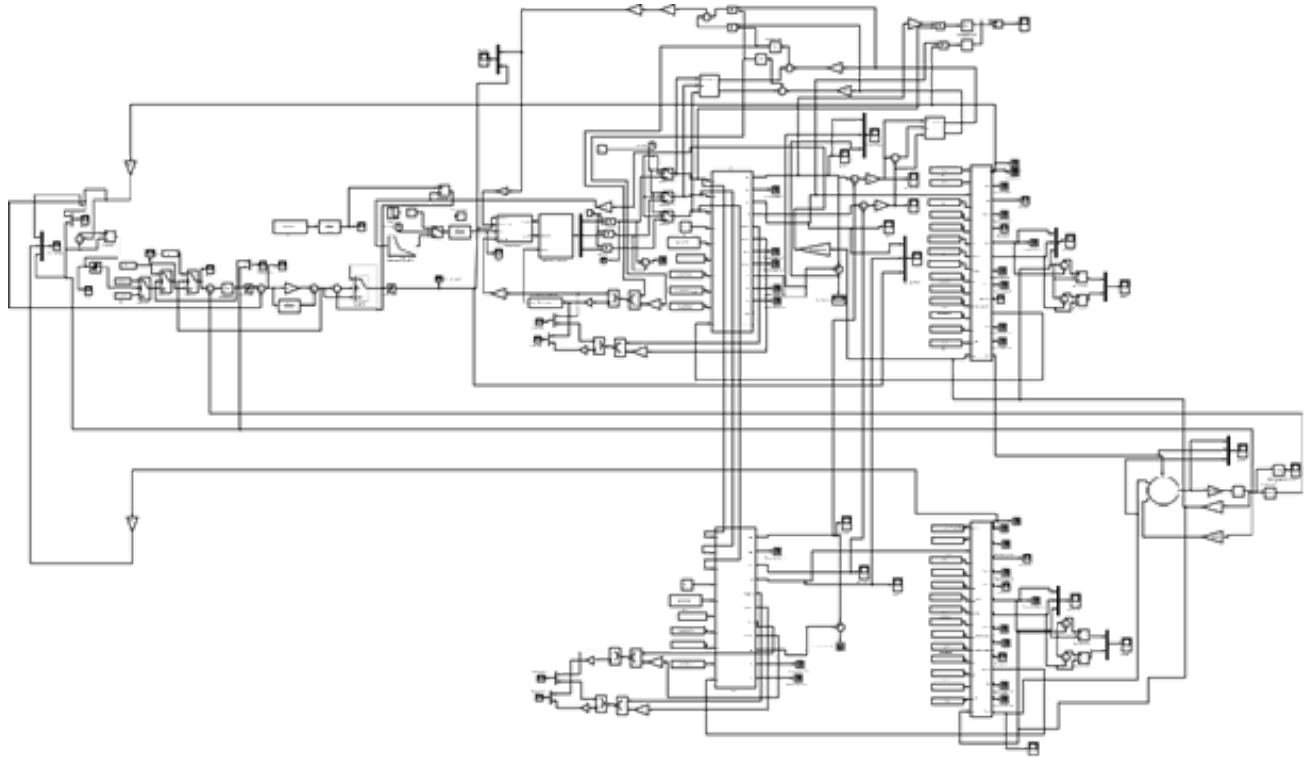


Рисунок 4.1 - Комплексна електромеханічна модель ТЕП візка при спрощеному моделюванні механічної частини

Модель виконана за методом підсистем. На рис. 4.1 праворуч в центрі розташовані елементи блок-діаграми, що моделюють сумарну масу локомотива і поїзда, до якої додаються сили тяги чотирьох коліс від двох підсистем механічної частини ТЕП осей візка (розташовані лівіше). І далі, ще лівіше, розташовані дві підсистеми паралельно підключених до інвертору (модельованому комутаційними функціями) асинхронних двигунів зі спільним регулюванням (загальною системою управління). Зрозуміло, така спрощена модель відображає тільки крутильні коливання основних елементів ТЕП і не враховує вертикальні коливання, а також динаміку перерозподілу навантажень, що важливо при регулюванні на межі

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>					

по зчепленню. Однак вона відображає і дозволяє зрозуміти суть явищ, що відбуваються. Перерозподіл вертикальних навантажень при такому моделюванні можна приблизно задати на основі дослідів, проведених в УМ.

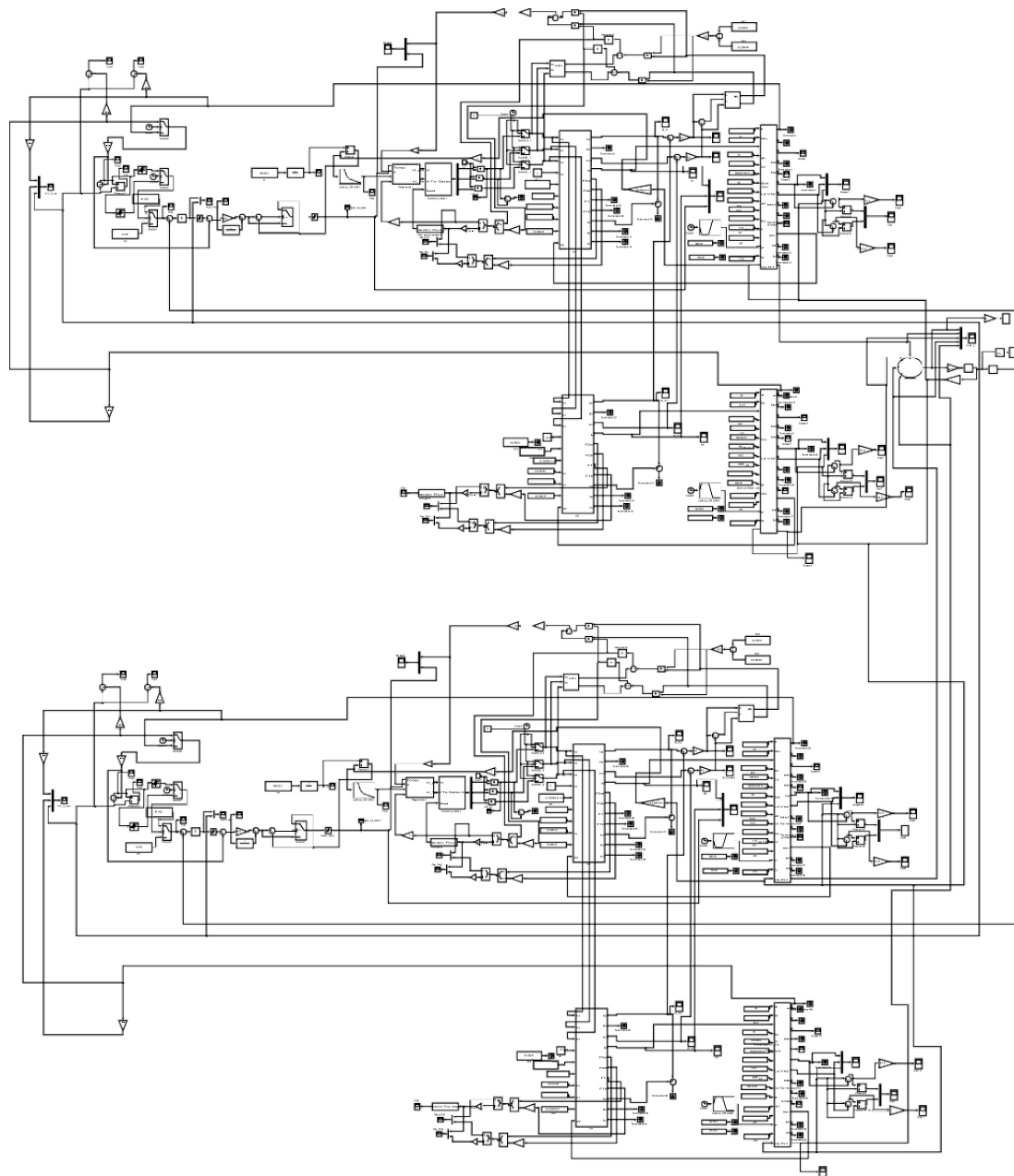


Рисунок 4.2 - Комплексна електромеханічна модель ТЕП чотирьохвісного локомотива при спрощеному моделюванні механічної частини

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

0032.206303.000.04MP.ПЗ

Арк.





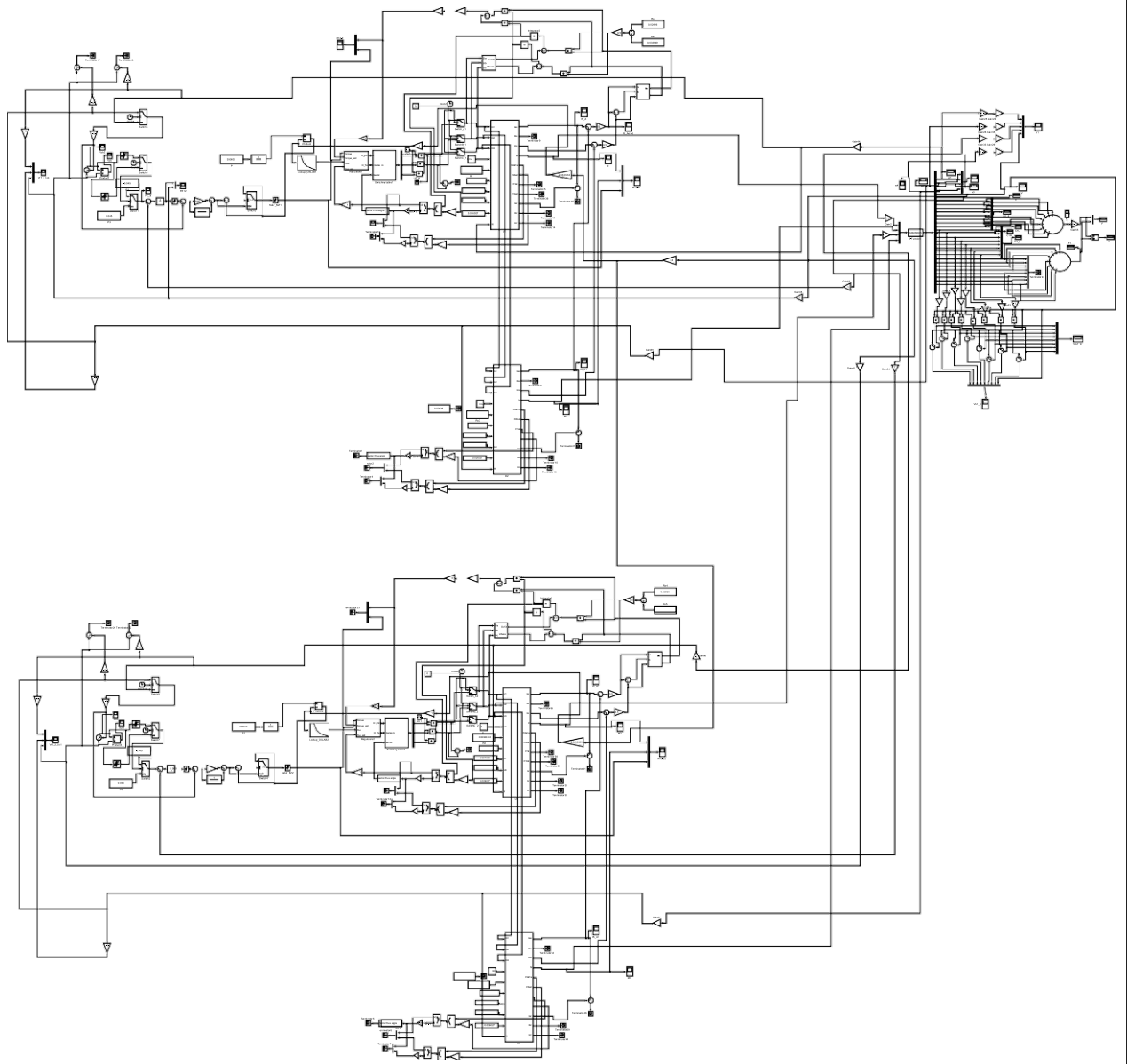


Рисунок 4.5 - Блок-діаграма комплексної моделі

Для можливості аналізу реалізації граничних тягових і гальмівних зусиль ТЕП локомотива і використання потенційних умов зчеплення нижній суматор (рис. 4.4) складає сили тяги (гальмування) всіх коліс, визначаючи загальну силу тяги (гальмування) локомотива, верхній суматор складає вертикальні навантаження коліс, визначаючи динамічний зчіпний вагу.

Помноживши динамічний зчіпний вагу на потенційний коефіцієнт зчеплення, визначаємо

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

граничну по зчепленню силу тяги (гальмування). Далі, розділивши загальну силу тяги (гальмування) локомотива на максимально можливу силу, визначаємо реалізований в кожний момент часу коефіцієнт зчеплення в відносних одиницях, тобто отримуємо в динаміці відсоткове використання потенційного коефіцієнта зчеплення.

#### **4.2 Попередній аналіз реалізації граничних зусиль на спрощених моделях ТЕП**

Дослідження пропонованих варіантів управління попередньо вироблено на комплексній моделі, що включає спрощену модель механічної частини ТЕП чотиривісного локомотива (рис. 4.2). У модель підставлені усереднені вертикальні навантаження коліс, обчислені на основі моделювання механічної підсистеми ТЕП в UM. У спрощеній моделі не враховуються коливання підресорених частин візка, екіпажу і рейкового підстави.

Як приклад на рис. 4.6, 4.7 представлені результати моделювання ТЕП першого візка при розгоні на межі зчеплення тепловоза ТЕМ9Н з склав 2000 Т. моделювати регулювання паралельно включених двигунів на межі по зчепленню: 1) за швидкістю АТД1 першої осі (рис. 4.6); 2) за швидкістю АТД2 другий (рис. 4.7). При цьому в першому ви падку в СУ застосовувалося обчислення змінних стану по осередненій моделі двигуна з використанням середнього струму АТД1 і АТД2 (рис. 4.6 а) або використовувалися змінні стану першого АТ (рис. 4.6 б).

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

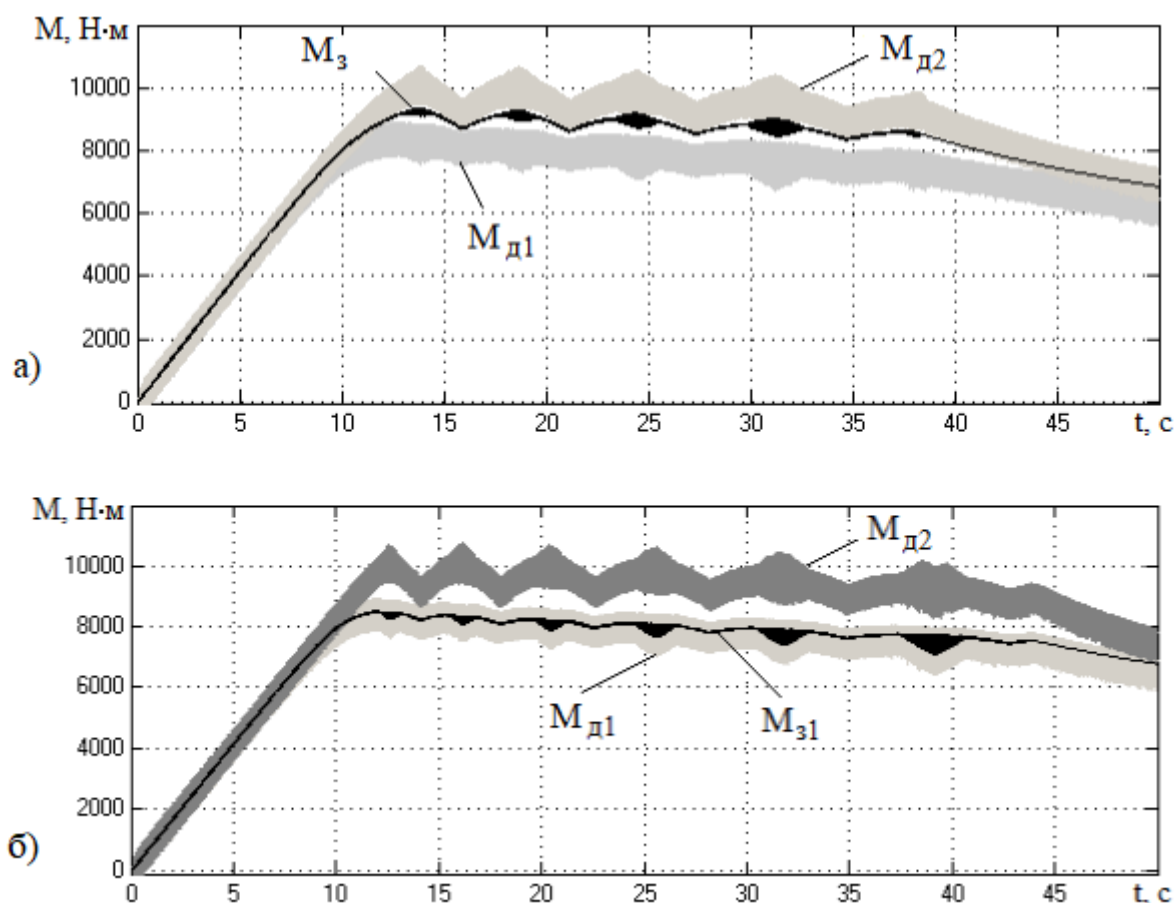
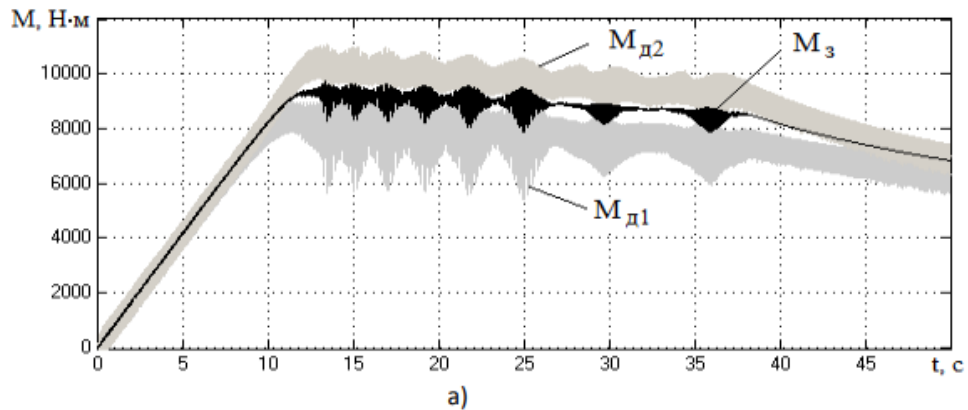


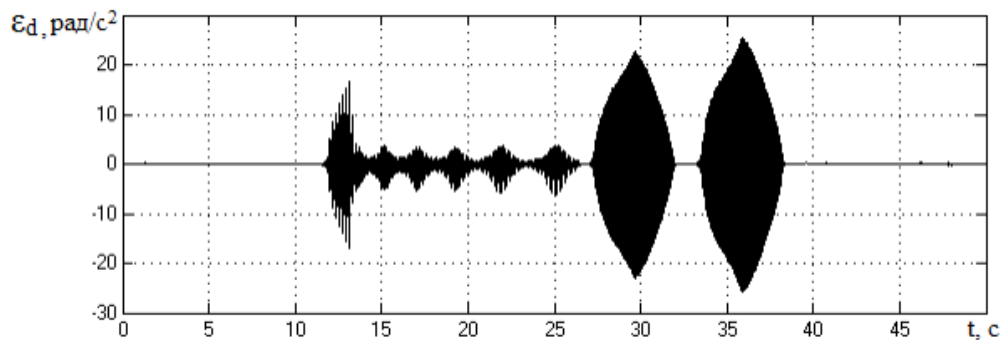
Рисунок 4.6 - Результати моделювання реалізації граничних тягових зусиль при розгоні тепловоза ТЕМ9Н зі складом 2000 т при регулюванні ТЕП візка за швидкістю АТД1: а) - при регулюванні ТЕП візка по змінним стану, який обчислюється за усередненою моделі двигуна; б) - при регулюванні ТЕП візка по змінним стану АТД1 ( $M_{д1}$  і  $M_{д2}$  - електромагнітні моменти АТД1 і АТД2 відповідно;  $M_3$  - завдання на момент, що обчислюється за усередненою моделі,  $M_{з1}$  - завдання на момент, що обчислюється за змінними стану АТД1)

Реалізація граничних сил пов'язана з регулюванням швидкості ротора АТД, наведеної до лінійної швидкості точки на ободі колеса (далі швидкість ротора), поблизу оптимального прослизання, що забезпечує максимальний коефіцієнт зчеплення. Так як величина оптимального прослизання має випадковий розкид, то на практиці застосовуються різні методики самоналаштування на максимум.

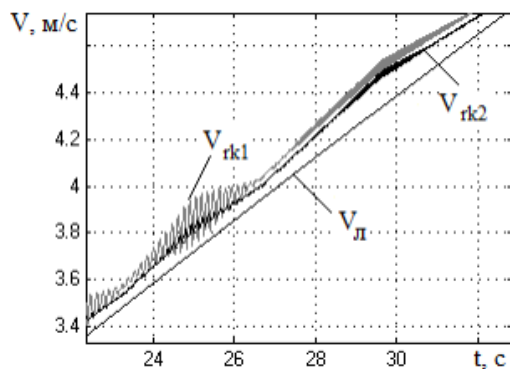
					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



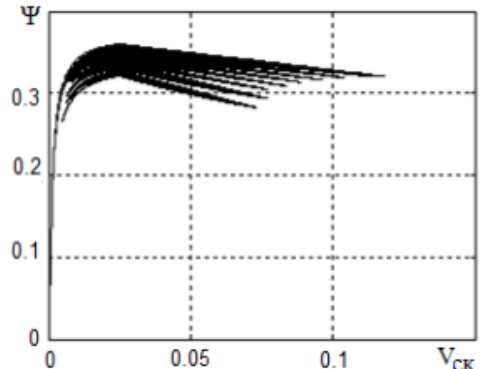
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.7 - Результати моделювання реалізації граничних тягових зусиль при розгоні тепловоза ТЕМ9Н зі складом 2000 т при регулюванні ТЕП візка за швидкістю АТД2 і змінним стану, який обчислюється з використанням загальних струмів  $I_A$  і  $I_C$ :

а) - електромагнітні моменти двигунів першої ( $M_{д1}$ ) і другої ( $M_{д2}$ ) осей і завдання на електромагнітний момент ( $M_3$ ); б) - віброприскорення корпусу АТД1; в) - швидкості роторів першого ( $V_{рк1}$ ) і другого ( $V_{рк2}$ ) двигунів, наведені до лінійної швидкості колеса, і швидкість локомотива ( $V_л$ ); г) - коефіцієнт зчеплення, який реалізується колесом першої осі

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При моделюванні використовувалося найбільш поширене обчислення завдання на швидкість ротора шляхом інтегрування заданого наведеного до прискорення колеса прискорення ротора АТД, що обчислюється за оціночним прискоренням локомотива. Якщо при розгоні задане прискорення ротора більше прискорення локомотива, то завдання на швидкість ротора збільшується швидше швидкості локомотива, відповідно зростає електромагнітний момент у внутрішньому контурі регулювання ТЕП (рис. 4.6а, б; 4.7а), і робоча точка зміщується вправо за характеристикою зчеплення (рис. 1.1а, 4.7г); якщо задане прискорення ротора менше прискорення локомотива на певну величину, електромагнітний момент відповідно знижується, і робоча точка на характеристиці зчеплення зміщується вліво. Таким чином, змінюючи стрибком задане прискорення ротора (прив'язане до прискорення локомотива) при переході моменту АТД через максимум і його фіксованому зниженні, ми утримуємо робочу точку поблизу максимуму характеристики зчеплення.

При регулюванні ТЕП по швидкості АТД1 першої осі (рис. 4.6) і обчисленні змінних стану двигуна за усередненою моделі з використанням загальних струмів паралельно включених двигунів ( $I_A$ ,  $I_C$ , рис. 2.2) завдання на момент  $M_{оз}$ , що знімається з регулятора швидкості і порівнюване з модельним моментом, має вигляд, представлений на рис. 4.6а. Інвертор напруги, до якого підключені обидва двигуни, регулюється з урахуванням отриманих за усередненою моделі значень, і двигуни АТД1 і АТД2 в кожен момент часу працюють за своїми природними механічними характеристиками, відповідним поточній частоті і напрузі АІН. Для представлених на рис. 4.6, 4.7 розрахункових варіантів параметрів АТД всіх осей, діаметри бандажів коліс і умови зчеплення прийняті однаковими. Тому АТД1 і АТД2 працюють за однаковими природними характеристиками, але за рахунок того, що вертикальне навантаження коліс першої осі менше, АТД1 обертається швидше і по природній характеристиці реалізує менший електромагнітний момент  $M_{д1}$ , ніж момент  $M_{д2}$  двигуна АТД2 другої осі, яка має велике вертикальне навантаження і обертається повільніше. Таким чином, вісь з більшим вертикальним навантаженням реалізує більший

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електромагнітний момент (рис. 4.6а), що в значній мірі компенсує негативний ефект зниження сили тяги через нерівномірне перерозподілу вертикальних навантажень тепловоза ТЕМ9Н. Однак в електричній частині при цьому АТД2 навантажується більшим струмом, ніж перший АТ.

Для порівняння (рис. 4.6б) дані результати розрахунку того ж режиму руху при використанні в адаптивній моделі двигуна струмів АТД1 замість усереднених струмів. У цьому випадку завдання на момент менше, і електромагнітний момент двигуна першої осі  $M_{д1}$  змінюється відповідно до завдання  $M_{з1}$ , як це і повинно бути, але в цілому результати аналогічні. При виході ТЕП на максимум зчеплення в механічній передачі посилюються власні форми коливань, які передаються на корпус двигуна (рис. 4.7б) і частково на ротор, це викликає відповідні компенсаційні коливальні зміни в завданнях на електромагнітний момент  $M_{оз}$ ,  $M_{з1}$  (на рис. 4.6, 4.7 сигнали наведені без фільтрації). При регулюванні по швидкості АТД1 першої осі ці коливання незначні і обумовлені, в основному, крутильними з вузлом на осі коливаннями коліс.

Істотне посилення власних форм коливань відбувається при регулюванні ТЕП за швидкістю двигуна другого осі АТД2 (рис. 4.7б). Реалізований АТД2 електромагнітний момент  $M_{д2}$  (рис. 4.7а) при такому управлінні більше, ніж в першому випадку, однак, виводячи АТД2 на межу по зчепленню, ми перевищуємо межу зчеплення для АТД1 і зміщуємо його в зону буксування (рис. 4.8). Працюючи за поточною природною характеристикою, ротор АТД1 збільшує швидкість  $V_{рк1}$  (рис. 4.7в), потрапляючи в зону буксування (рис. 4.7г), електромагнітний момент  $M_{д1}$  при цьому різко знижується (рис. 4.7а), обороти АТД1 і відповідно  $V_{рк1}$  падають, зчеплення відновлюється, електромагнітний момент  $M_{д1}$  знову наростає, і далі процес повторюється, виникають небажані фрикційні автоколивання, які можуть привести до підвищеного зносу і поломок.

					<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

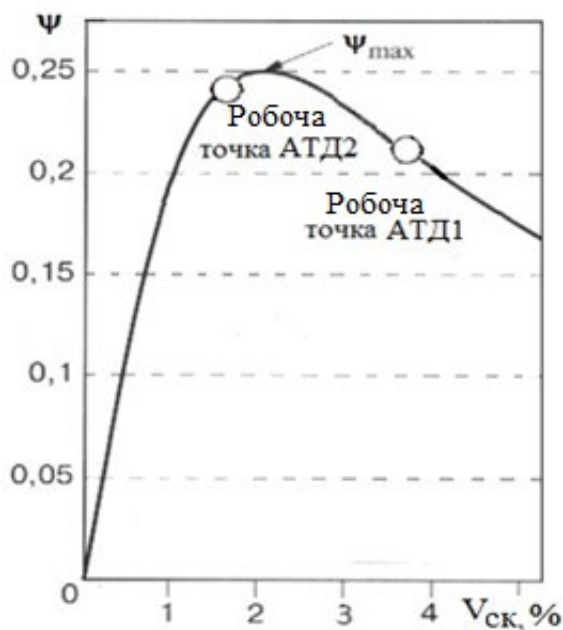


Рисунок 4.8 - Положення робочих точок при регулюванні двигуна другої осі (АТД2)

Посилення вібрації елементів ТЕП в певних частотних діапазонах при попаданні на падаючу гілку характеристики може служити додатковим індикатором для зниження завдання на прискорення ротора (отже, і зниження електромагнітного моменту), можливо також активне гасіння коливань з використанням модального регулювання, проте останнім вельми складно реалізувати.

#### 4.3 Дослідження динамічних процесів в ТЕП зі спільним розривним управлінням АТД при розгоні і гальмуванні на межі по зчепленню

На основі моделювання з використанням комплексної електромеханічної моделі з деталізованим поданням механічної частини була досліджена робота ТЕП зі спільним регулюванням АТД в різних режимах руху при варіюванні потенційного коефіцієнта зчеплення  $\psi_0$  в діапазоні від 0,4 до 0,1, моделювався розкид активних опорів обмоток

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



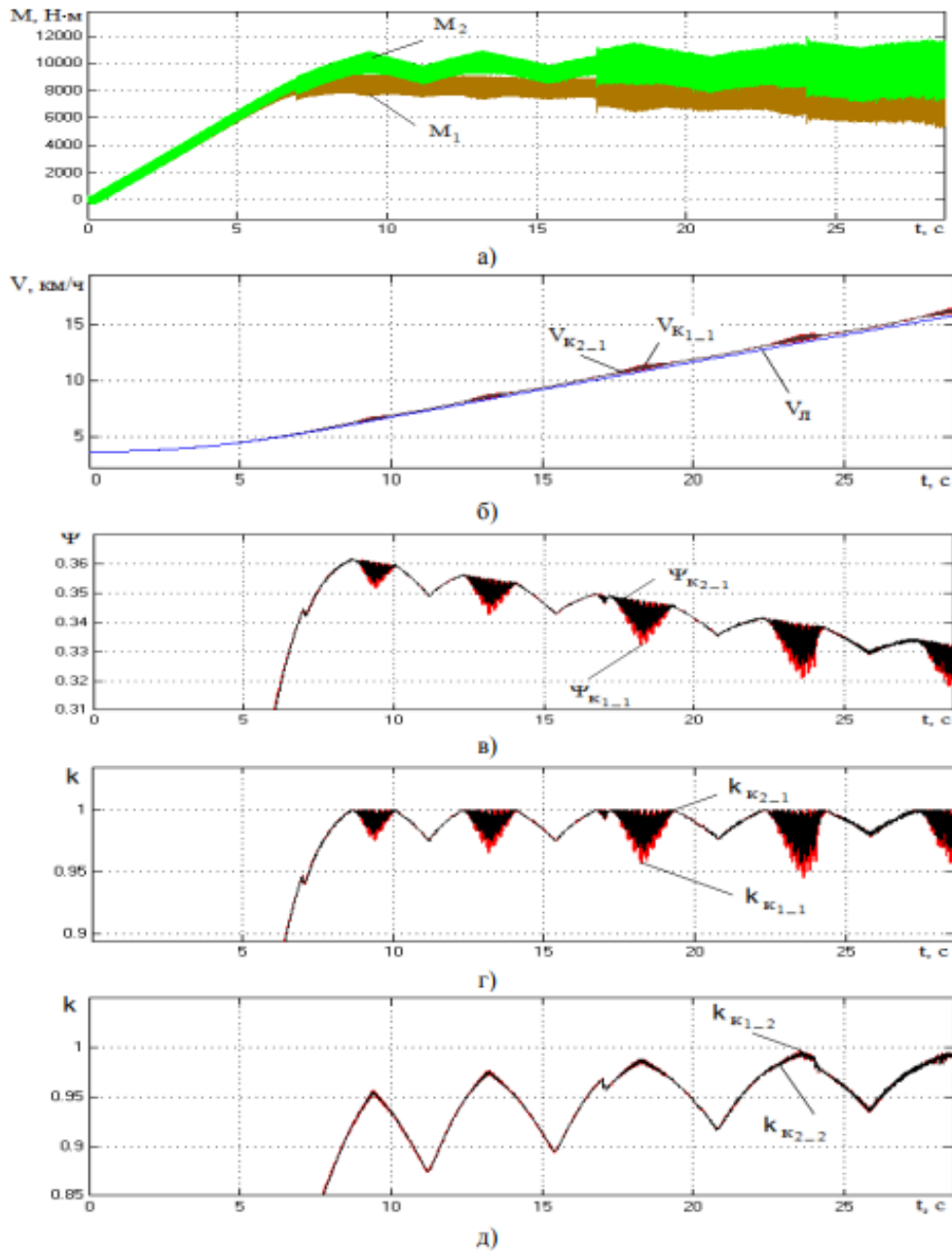


Рисунок 4.9 - Результати моделювання розгону тепловоза зі складом 1000т на прямолінійній горизонтальній ділянці при реалізації граничних тягових зусиль: а) - електромагнітні моменти АТД першої ( $M_1$ ) і другої ( $M_2$ ) осей; б) - швидкості коліс 1-ї осі ( $V_{к1-1}$  і  $V_{к2-1}$ ) і локомотива ( $V_{л}$ ); в) - коефіцієнти зчеплення коліс 1-ї осі ( $\Psi_{к1-1}$  і  $\Psi_{к2-1}$ ); г) - коефіцієнти зчеплення коліс 1-ї осі в відносних одиницях ( $k_{к1-1}$  і  $k_{к2-1}$ ); д) - коефіцієнти зчеплення коліс 2-ї осі в відносних одиницях ( $k_{к1-2}$  і  $k_{к2-2}$ )

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

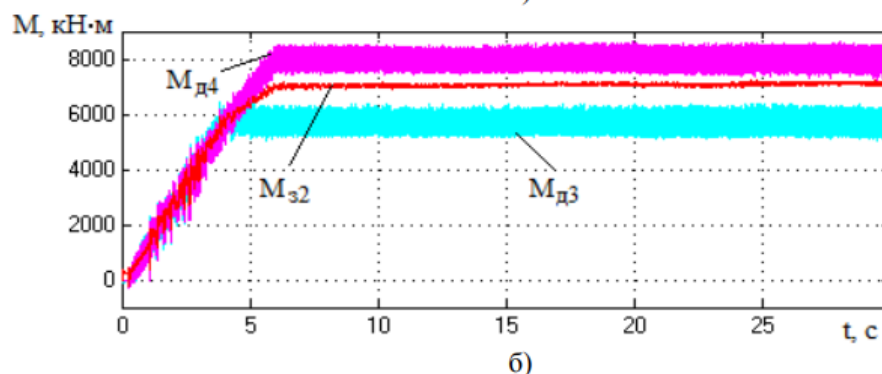
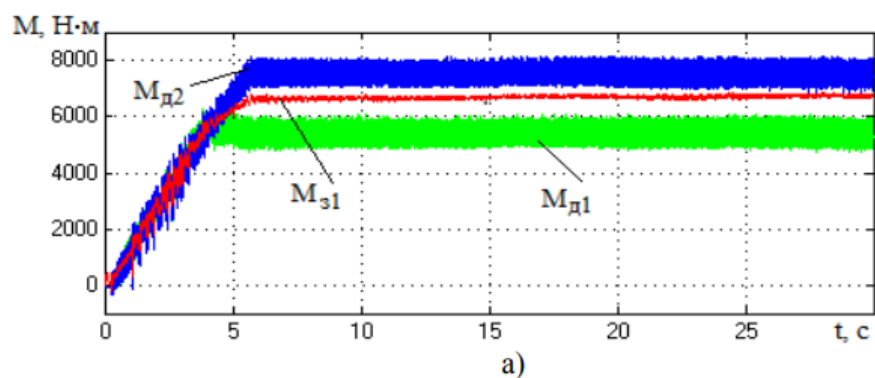
0032.206303.000.04MP.ПЗ

Арк.

При збільшенні ковзання розвиваються фрикційні коливання коліс першої осі з вузлом на осі (рис. 4.9б), через які виникають коливання абсолютного (рис. 4.9в) і відносного (рис. 4.9г) коефіцієнта зчеплення коліс першої осі. Колеса другої осі при цьому не досягають межі по зчепленню (рис. 4.9д), так як в режимі тяги друга вісь має велике вертикальне навантаження. За відведений час моделювання (рис. 4.9) локомотив не встигає розігнатися до заданої КМ швидкості, тому продовжує розганятися на межі по зчепленню в режимі повного поля.

Як видно з графіків 4.9г), д), в даному режимі при реалізації граничних зусиль, середній коефіцієнт зчеплення в відносних одиницях, що реалізовується ТЕП візки на опускається нижче 0,94, тобто забезпечується використання потенційних умов зчеплення не менше 94%.

Отримати використання умов зчеплення на 100% (рис. 4.10) вдається тільки при слабо падаючій кривій зчеплення практично без максимуму (рис. 1.3), що в реальних умовах може спостерігатися на вологих рейках.



					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

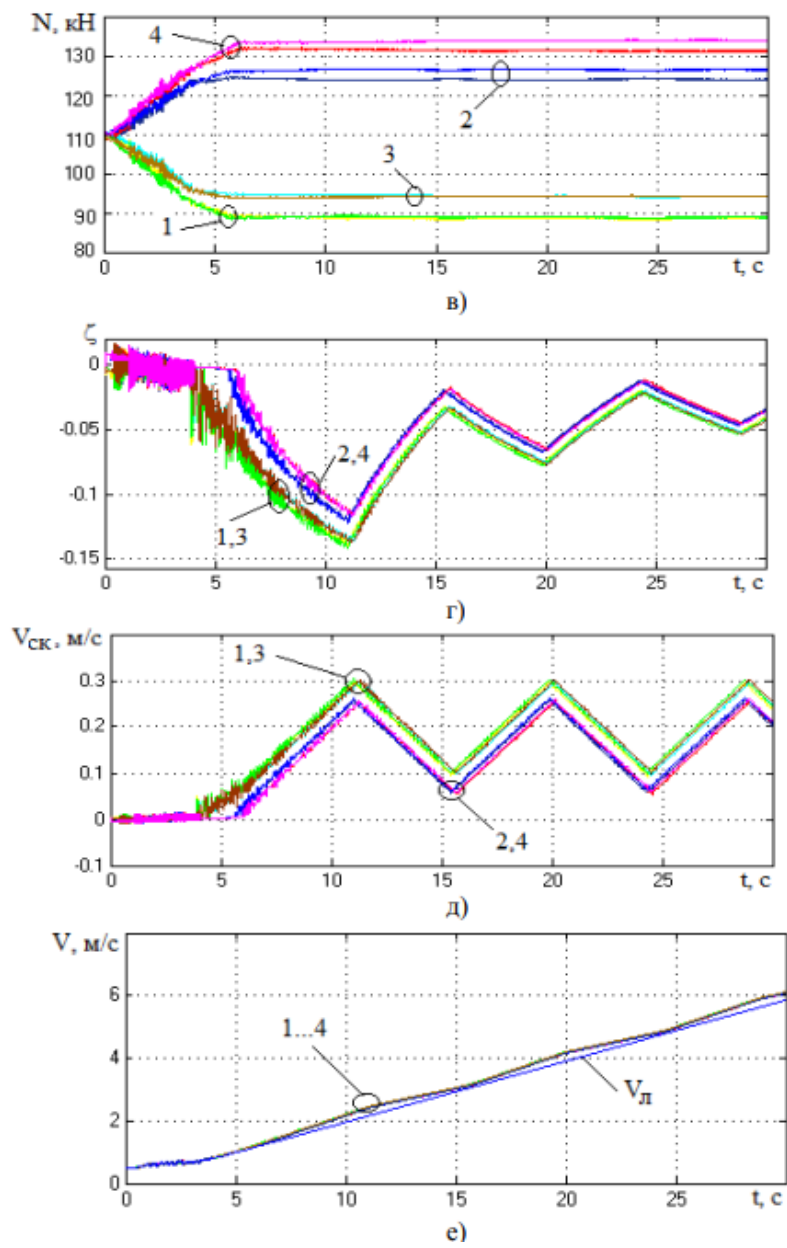
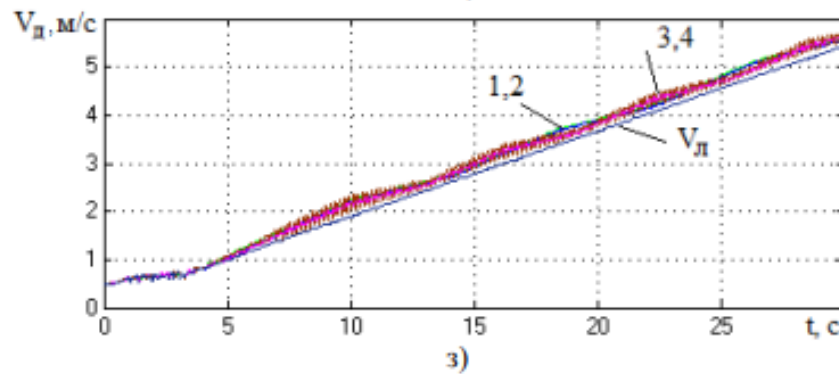
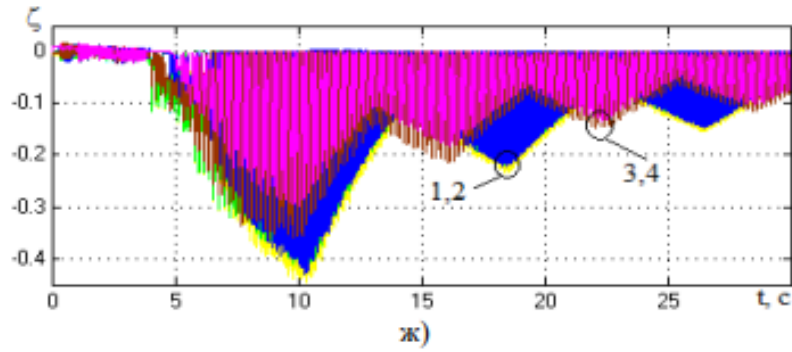
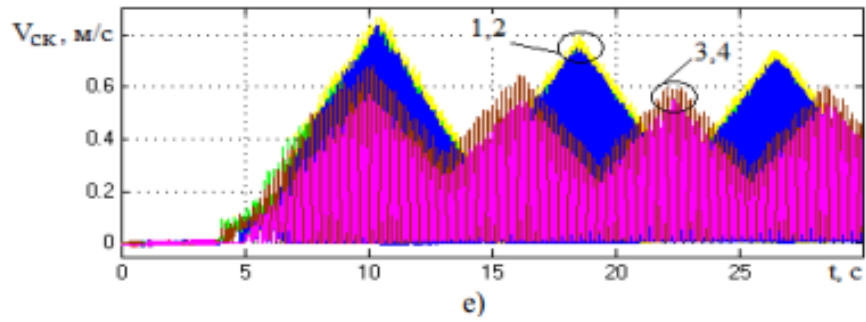
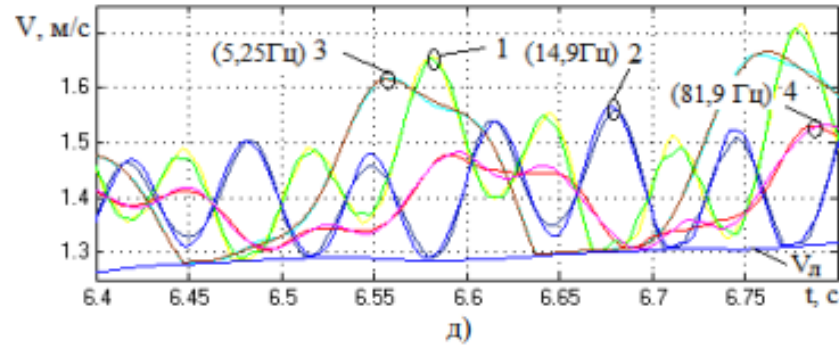
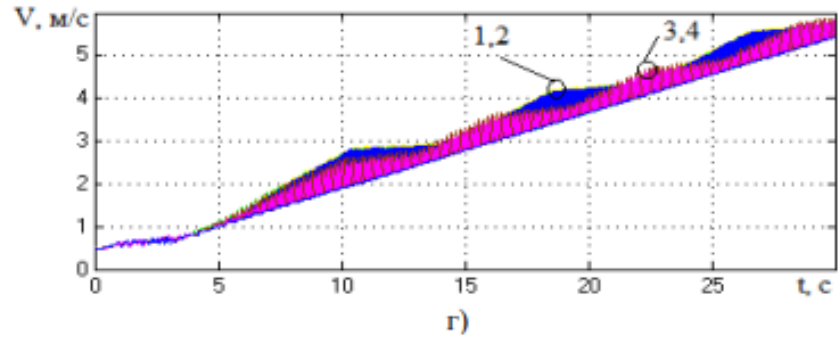


Рисунок 4.10 - Розгін локомотива з составом 1000 т на межі по зчепленню,  $\psi_0=0,25$ , ковзання коліс регулюється в абсолютних одиницях від 0,3 м/с до 0,1 м/с по швидкості двигунів перших осей візків (АТД1 і АТД3 відповідно): а) - завдання на момент ( $M_{з1}$ ) і моменти АТД1 ( $M_{д1}$ ), АТД2 ( $M_{д2}$ ) 1-го візка; б) - завдання на момент ( $M_{з2}$ ) і моменти АТД3 ( $M_{д3}$ ), АТД4 ( $M_{д4}$ ) 2-го візка; в) - вертикальні навантаження коліс осей 1-4; г) - кріп (відносне проковзування) коліс осей 1-4; д) прослизання коліс осей 1-4; е) - швидкості локомотива ( $V_{л}$ ) і коліс осей 1-4





Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

0032.206303.000.04MP.ПЗ

Арк.

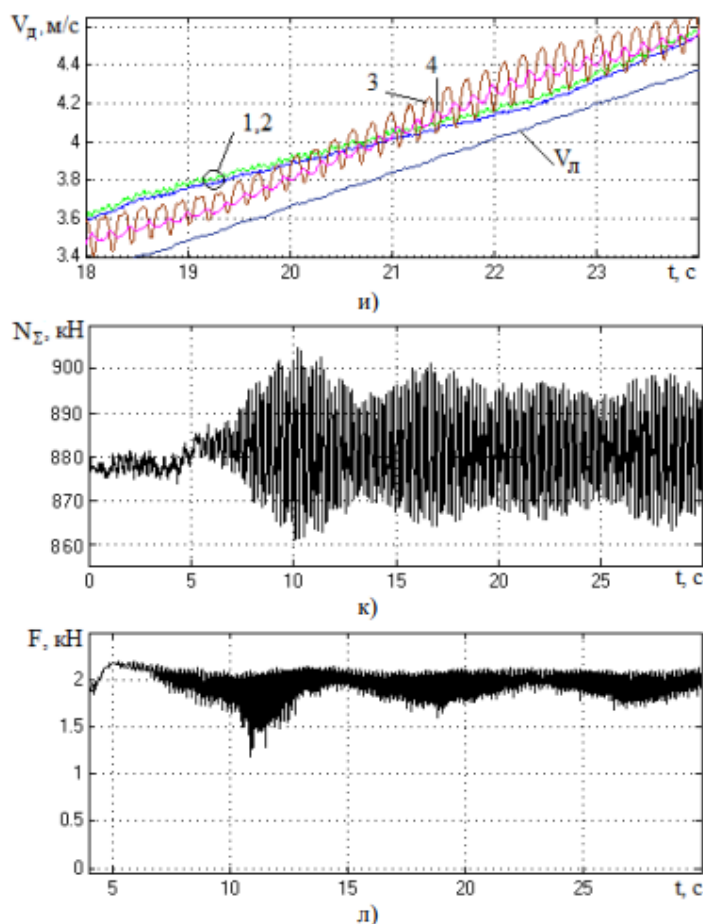


Рисунок 4.11 - Розгін локомотива з составом 1000 т на межі

по зчепленню,  $\psi_0 = 0,25$ , крива зчеплення з максимумом, ковзання коліс регулюється в абсолютних одиницях від 0,3 м/с до 0,1 м/с по швидкості двигунів других осей візків (АТД2 і АТД4 відповідно): а) - завдання на момент ( $M_{31}$ ) і моменти АТД1 ( $M_{Д1}$ ), АТД2 ( $M_{Д2}$ ) 1-го візка; б) - завдання на момент ( $M_{32}$ ) і моменти АТД3 ( $M_{Д3}$ ), АТД4 ( $M_{Д4}$ ) 2-го візка; в) - вертикальні навантаження коліс осей 1-4; г) швидкості локомотива ( $V_л$ ) і коліс осей 1-4; д) - швидкості локомотива ( $V_л$ ) і коліс осей 1-4 (збільшений фрагмент); е) - прослизання коліс осей 1-4; ж) -кріп (відносно проковзування) коліс осей 1-4; з) - швидкість локомотива ( $V_л$ ) і швидкості роторів АТД 1-4, наведені до швидкості локомотива; і) - збільшений фрагмент графіка «з»; к) - сумарна вертикальна навантаження ( $N_Σ$ ) всіх осей локомотива (динамічна зчіпна вага); л) - сила тяги локомотива

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

0032.206303.000.04МР.ПЗ

Арк.

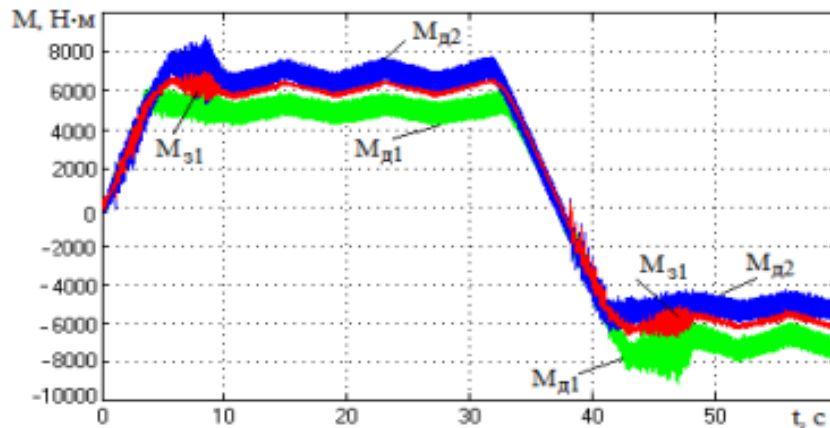
Результати моделювання показують можливість виникнення різних форм автоколивань при русі на межі по зчепленню і регулюванні ТЕП в режимі тяги по швидкості двигуна другого осі візка, це було проілюстровано також на спрощеній моделі (рис. 4.7). Розрахунки з використанням деталізованої моделі механічної підсистеми ТЕП ТЕМ9Н показують (рис. 4.11е), що при регулюванні ТЕП на межі по зчепленню і достатньої крутизні падаючої ділянки характеристики зчеплення можливе виникнення релаксаційних автоколивань коліс з частотою 5,25Гц, а також квазігармонічних автоколивань з частотою 14 , 9 Гц і квазігармонічних коливань з вузлом на осі колісної пари, що мають резонансний максимум на частоті 81,9 Гц. Кріп коліс досягає на початку розгону 0,45 (рис. 4.11ж), що відповідно призводить до зниження сили тяги (рис. 4.11л).

Врахування у моделі ТЕП, крім розкиду параметрів АТД, відмінності діаметрів бандажів та умов зчеплення коліс веде при управлінні за швидкістю двигуна другої осі візка і несприятливому поєднанні факторів, що додатково враховуються, до істотного збільшення фрикційних автоколивань у тяговій передачі.

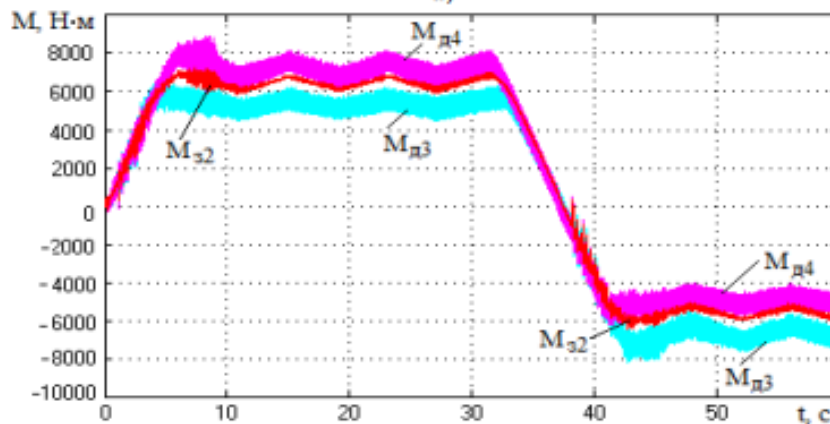
У той же час при управлінні у процесі розгону по швидкості двигуна першої осі візка вібрації істотно знижуються, і якість регулювання поліпшується. Як приклад на рис. 4.12 наведені результати моделювання розгону і гальмування ТЕП ТЕМ9Н на межі по зчепленню, в режимі тяги управління ведеться за швидкістю двигунів перших осей візків (АТД1 і АТД3), а в режимі гальмування по швидкості двигунів других осей візків (АТД2 і АТД4). Це обумовлено тим, що в режимі тяги розвантажуються перші осі візків (1 і 3), а другі - навантажуються (2 і 4), а в режимі гальмування навпаки: навантажуються перші осі візків (1 і 3), а другі розвантажуються (рис. 4.12в). Таким чином, системою управління на межі по зчепленню і в режимі тяги, і в режимі гальмування виводиться двигун найменш навантаженої осі, що сприяє зменшенню автоколивань, але

					<b>0032.206303.000.04МР.ЛЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

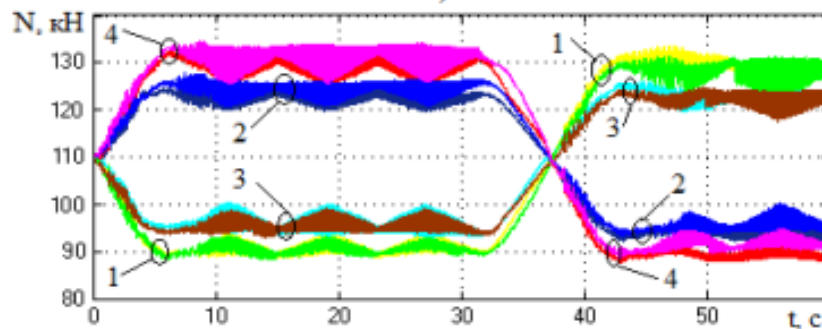
виключити їх повністю не вдається (рис. 4.12г) при наявності падаючої ділянки на характеристиці зчеплення.



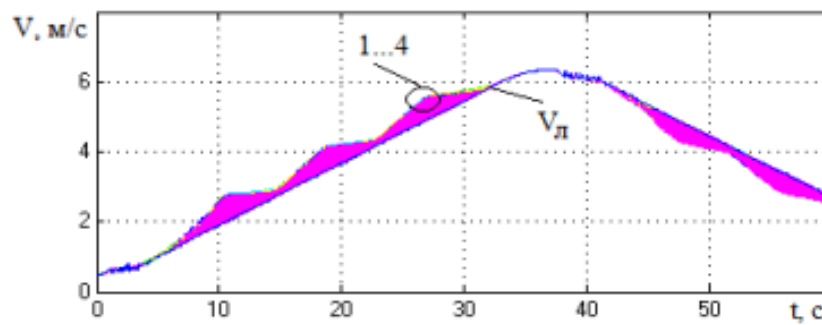
а)



б)



в)



г)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

0032.206303.000.04MP.ПЗ

Арк.

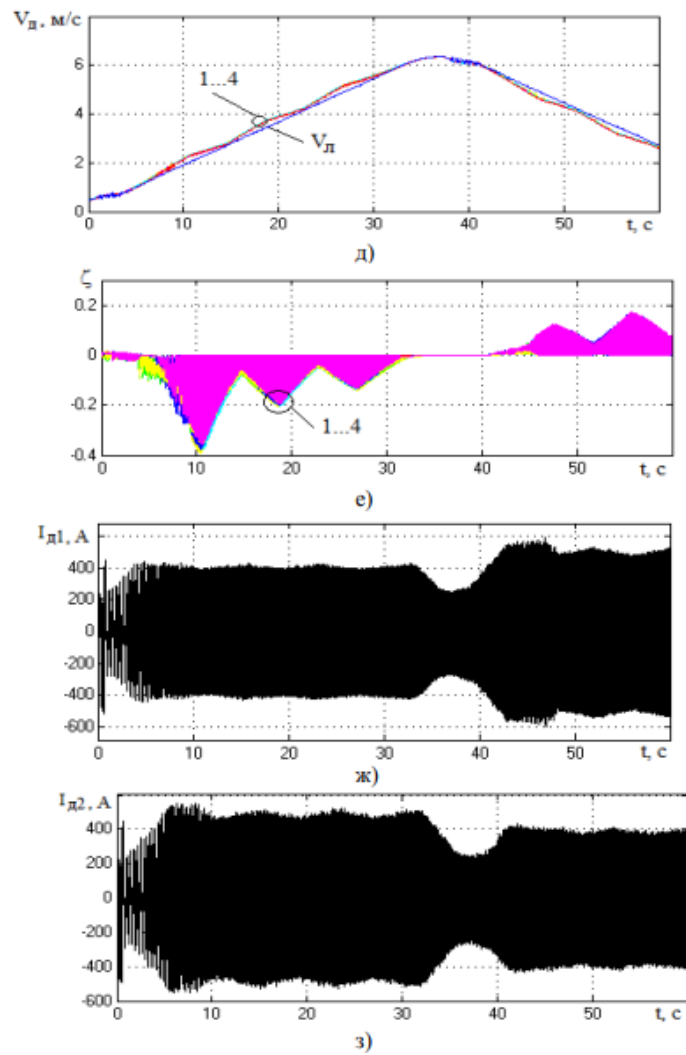


Рисунок 4.12 – Результати моделювання розгону і гальмування локомотива з составом 1000т на межі по зчепленню,  $\psi_0 = 0,25$ , крива зчеплення з максимумом, ковзання коліс регулюється в абсолютних одиницях від 0,3 м/с до 0,1 м/с в режимі тяги по швидкості двигунів перших осей візків (АТД1 і АТД3 відповідно), в режимі гальмування по швидкості двигунів других осей візків (АТД2 і АТД4 відповідно): а) - завдання на момент ( $M_{31}$ ) і моменти АТД1 ( $M_{д1}$ ), АТД2 ( $M_{д2}$ ) 1-го візка; б) - завдання на момент ( $M_{32}$ ) і моменти АТД3 ( $M_{д3}$ ), АТД4 ( $M_{д4}$ ) 2-го візка; в) - вертикальні навантаження коліс осей 1-4; г) - швидкості локомотива ( $V_{л}$ ) і коліс осей 1-4; д) - швидкість локомотива ( $V_{л}$ ) і швидкості роторів АТД 1-4, наведені до швидкості локомотива; е) - кріп (відносне проковзування) коліс осей 1-4; ж) - фазний струм АТД1; з) - фазний струм АТД4

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>				

Двигуни осей з більшим вертикальним навантаженням обертаються повільніше (з підвищеним ковзанням АТД), при цьому реалізують більший електромагнітний момент і навантажуються великим струмом (рис. 4.12ж, з).

Чим краще умови зчеплення, тим більше реалізовані електромагнітні моменти, що підсилює нерівномірність розподілу вертикальних навантажень осей. Дослідження показують, що осі візків тепловоза ТЕМ9Н, що обертаються паралельно підключеними до АІН двигунами, по навантаженнях дуже істотно розрізняються, - до 10,8 Т при реалізації потенційного коефіцієнта зчеплення  $\psi_0 = 0,4$ , усереднені обертаючі моменти АТД (деталі щодо встановлення  $M_{31}, M_{32}$ ) при цьому близькі до номінальних, нерівномірність струмового навантаження двигунів досягає 30%. Моделювання показує, що розкид активних опорів обмоток статора і ротора паралельно працюють АТД до 15% при правильному визначенні параметрів усередненої моделі АТД не знижує якості регулювання.

В цілому запропонований алгоритм дозволяє забезпечити використання потенційних умов зчеплення не менше ніж на 90% в діапазоні зміни потенційного коефіцієнта зчеплення від 0,4 до 0,1.

Досліджувалася також робота СУ ТЕП при наїзді на масляну пляму. На рис. 4.13 як приклад представлені результати моделювання режиму розгону тепловоза ТЕМ9Н зі складом 1000 т на підйомі зі зростаючою ухилом, результати наведені для першого візка. На підйомі змодельовано два масляних плями, в межах яких потенційний коефіцієнт зчеплення знижується з  $\psi_0 = 0,35$  до  $\psi_0 = 0,15$ . В даному режимі контролером машиніста встановлена необхідна швидкість локомотива 10 км/год і максимальна сила тяги, якій відповідає обмеження по моменту АТД на рівні  $7200 \cdot \text{Нм}$ .

В процесі розгону тепловоза (рис. 4.13) завдання на електромагнітний момент ( $M_3$ ) збільшується, а потім обмежується на рівні  $7200 \text{ Н} \cdot \text{м}$  (рис. 4.13, а). Цей рівень обмеження менше моменту, граничного по зчепленню.

					<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тепловоз продовжує розгін (рис. 4.13, б) з запасом по зчепленню до наїзду на перше масляна пляма. Осі візки наїжджають на масляну пляму по черзі. При цьому відбувається збільшення швидкості АТД1, пов'язаного з першої колісною парою, збільшується її неузгодженість із завданням швидкості, і РЧВ (рис. 2.3) знижує завдання на момент (рис. 4.13, а), ТЕП регулюється на межі по зчепленню, але швидкість тепловоза не збільшується, так як сила тяги в даному випадку дорівнює силі опору руху (так підібрані параметри).

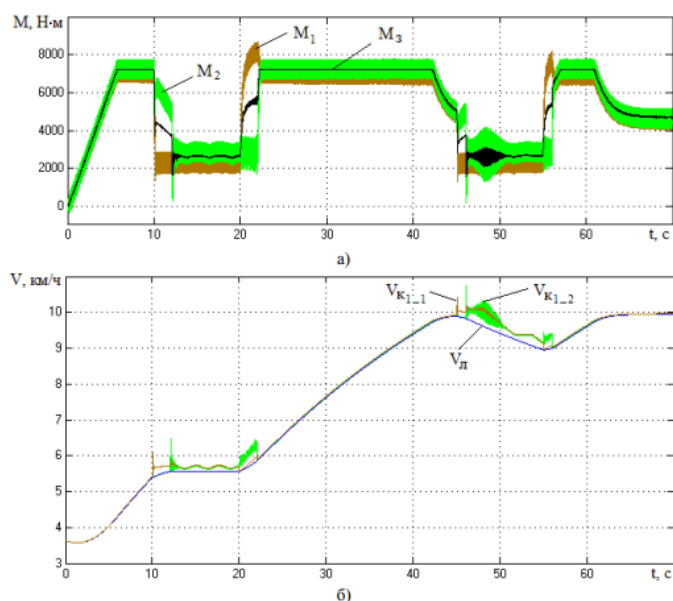


Рисунок 4.13 – Результати моделювання розгону тепловоза зі складом 1000т на підйомі зі зростаючим ухилом при завданні на максимальний момент 7200 Н м, завданні на швидкість 10 км / год і подвійному наїзді тепловоза в процесі розгону на масляну пляму: а) - завдання на електромагнітний момент ( $M_3$ ) і розрахункові електромагнітні моменти АТД першої ( $M_1$ ) і другої ( $M_2$ ) осей; б) -швидкості першого (найближчого до редуктора) колеса першої осі ( $V_{к1\_1}$ ), першого колеса другої осі ( $V_{к1\_2}$ ) і локомотива( $V_{л}$ )

Після закінчення першої масляної плями осі візка по черзі з'їжджають з нього, момент  $M_{оз}$  і моменти АТД збільшуються, і тепловоз продовжує

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розганятися з запасом по зчепленню до наїзду на другу масляну пляму. Тут РЧВ знову знижує завдання на момент, і ТЕП реалізує граничні тягові зусилля, але швидкість локомотива при цьому знижується, так як ухил збільшився, і сила опору руху стала більше сили тяги. На цій ділянці виникають коливання електромагнітного моменту АТД2 (рис. 4.13а) і швидкості коліс другої осі, так як при збільшенні ковзання виникають фрикційні автоколивання, а регулювання швидкості ведеться по частоті обертання першого двигуна візка (рис. 2.3). Але при правильних налаштуваннях СУ виникли коливання не призводять до суттєвого збільшення динамічних навантажень і швидко згасають. Після закінчення другої масляної плями тепловоз продовжує розгін з обмеженням  $M_{oz}$  на рівні  $7200 \text{ Н} \cdot \text{м}$  до досягнення заданої КМ швидкості  $10 \text{ км/год}$ . Після цього електромагнітний момент знижується і стає рівним моменту опору руху (зумовленого силою опору руху).

Таким чином, запропонована система управління плавно виводить ТЕП на межу по зчепленню в процесі розгону і, володіючи високою швидкодією і точністю, навіть в разі різкої зміни умов зчеплення, забезпечує реалізацію граничних зусиль при спільному регулюванні асинхронних двигунів візка.

**Висновки до розділу. 1.** Створено комплексні електромеханічні комп'ютерні моделі ТЕП гібридного тепловоза ТЕМ9Н зі спрощеною механічною частиною - в ПК MatLab / Simulink; з деталізованою механічною підсистемою - на основі поєднання ПК MatLab / Simulink і «Універсальний механізм» із застосуванням інтерфейсу CoSimulation.

2. При регулюванні ТЕП ТЕМ9Н на межі по зчепленню за швидкістю АТД найбільш навантаженої осі візка і достатньою крутизною падаючої ділянки характеристики зчеплення можливе виникнення релаксаційних автоколивань коліс з частотою  $5,25 \text{ Гц}$ , а також квазігармонічних автоколивань з частотою  $14,9 \text{ Гц}$  і квазігармонічних коливань з вузлом на осі колісної пари, що мають резонансний максимум на частоті  $81,9 \text{ Гц}$ .

					<b>0032.206303.000.04MP.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Для запобігання релаксаційних автоколивань ТЕП при реалізації граничних зусиль слід виводити на межу по зчепленню асинхронний тяговий двигун осі з меншим вертикальним навантаженням: АТД першої осі візка в режимі тяги і АТД другої осі в режимі гальмування.

4. Визначено характер зміни вертикальних навантажень осей гібридного локомотива, викликаного роботою АТД в режимах тяги і електричного гальмування. При реалізації потенційного коефіцієнта зчеплення 0,4, різниця вертикальних навантажень першої та другої осей візків становить в середньому 10,8 Т, що призводить до нерівномірності струмових навантажень двигунів до 30%.

5. Пропонований алгоритм дозволяє частково компенсувати нерівномірність вертикальних навантажень осей і забезпечити використання потенційних умов зчеплення не менше ніж на 90% в діапазоні зміни потенційного коефіцієнта зчеплення від 0,4 до 0,1.

6. При розкиді опорів паралельно працюють АТД в діапазоні до 15% і правильному визначенні середнього для двох АТД значення кожного параметра (правильності параметрів усередненої моделі) система зберігає працездатність і стійкість.

					<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВОК

1. Виконано класифікацію алгоритмів управління ТЕП в режимі реалізації граничних по зчепленню зусиль і обґрунтовано застосування системи розривного керування при спільному регулюванні АТД.
2. Запропоновано спосіб управління ТЕП з реалізацією граничних по зчепленню зусиль асинхронними тяговими двигунами, підключеними паралельно до одного інвертору.
3. Розроблено функціональну схему і алгоритми роботи СУ ТЕП гібридного маневрового тепловоза з спільним регулюванням асинхронних двигунів візка на межі по зчепленню коліс з рейками.
4. Розроблено математичні і комп'ютерні моделі електричної підсистеми ТЕП з спільним розривним управлінням АТД візки в режимі реалізації граничних зусиль.
5. Розроблено математичні і комп'ютерні моделі механічної частини (підсистеми) ТЕП гібридного маневрового тепловоза ТЕМ9Н з опорно-осьовим підвішуванням АТД і пружним зубчастим колесом редуктора, виконані з різним ступенем деталізації в ПК MatLab / Simulink і «Універсальний механізм».
6. Створено комплексні електромеханічні комп'ютерні моделі ТЕП ТЕМ9Н на основі поєднання ПК MatLab / Simulink і «Універсальний механізм» із застосуванням інтерфейсу CoSimulation.
7. На основі моделювання встановлено, що при регулюванні ТЕП ТЕМ9Н на межі по зчепленню і достатньою крутизні падаючого ділянки характеристики зчеплення можливе виникнення релаксаційних автоколиваний коліс з частотою 5,25 Гц, а також автоколиваний з частотою 14,9 Гц і коливаний з вузлом на осі колісної пари, що мають резонансний максимум на частоті 81,9 Гц.
8. Для запобігання релаксаційних автоколиваний ТЕП при реалізації граничних зусиль слід виводити на межу по зчепленню асинхронний тяговий двигун осі

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>					

з меншою вертикальним навантаженням: АТД першої осі візка в режимі тяги і АТД другий осі в режимі гальмування.

9.Визначено характер зміни вертикальних навантажень осей гібридного локомотива, викликаного роботою АТД в режимах тяги і електричного гальмування. При реалізації потенційного коефіцієнта зчеплення 0,4, різниця вертикальних навантажень першої та другої осей візків становить в середньому 10,8 Т, що призводить до нерівномірності струмових навантажень двигунів до 30%.

10.При розкиді опорів паралельно працюють АТД в діапазоні до 15% і правильному визначенні середнього для двох АТД значення кожного параметра (правильності параметрів усередненої моделі) система зберігає працездатність.

11.Запропоновані алгоритми регулювання тягового електроприводу дозволяють частково компенсувати нерівномірність розподілу вертикальних навантажень осей, що викликається роботою АТД, і забезпечити використання потенційних умов зчеплення не менше ніж на 90% в режимі реалізації граничних зусиль при зміні потенційного коефіцієнта зчеплення в діапазоні від 0,4 до 0,1.

12.Із застосуванням основних елементів моделей, розроблених для гібридного тепловоза, можна на стадії проектування проводити перевірку різних алгоритмів реалізації тяговим електроприводом локомотивів зі спільним регулюванням АТД візки граничних зусиль.

					<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Розенфельд, В.Е. Теория электрической тяги/В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров. Теория электрической тяги. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
2. Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей. - М.: Транспорт, 1965. - 267 с.
3. Розенфельд, В.Е. Тиристорное управление электрическим подвижным составом постоянного тока/Под. Ред. В.Е. Розенфельда. – М.: Транспорт, 1970. - 280 с.
4. Тулупов В.Д. Автоматическое регулирование сил тяги и торможения электроподвижного состава. – М.: Транспорт, 1978. – 368 с.
5. Ротанов Н.А. Проектирование систем управления электроподвижным составом/Под ред. Н.А. Ротанова. – М.: Тпанспорт, 1986, -328 с. 6.
6. Ротанов Н.А., Курбасов А.С., Быков Ю.Г., Литовченко В.В. 6 Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями/ под ред. Н.А. Ротанова. - М.: Транспорт, 1991. - 336 с.
7. Степанов А.Д., Андерс В.И., Пречиский В.А., Гусевский Ю.И. Электрические передачи переменного тока тепловозов и газотурбовозов. - М: Транспорт, 1982.- 254 с.
8. Савоськин А.Н., Баранов Л.А., Плакс А.В., Феоктистов В.П. Автоматизация электроподвижного состава; Под. Ред. А.Н. Савоськина. – М.: Транспорт, 1990. – 311 с.
9. Стрекопытов В.В. Грищенко А.В., Кручек В.А. Электрические передачи локомотивов. – М: Маршрут, 2003. – 310 с.
10. Перегудов Ю.М. Исследование методов повышения коэффициента тяги тепловозов с электрической передачей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Коломна, 1971. - 19 с.
11. Будницкий А.А., Перегудов Ю.М., Сергеев В.Л., Варегин Ю.А. Исследование электрических передач. Схемные решения, улучшающие тяговые показатели тепловоза с электрической передачей// Труды ВНИТИ, 1977, Выпуск 45. – С. 16-21.

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>					

12. Шаров В.А. Исследование электромагнитных переходных процессов в силовых цепях асинхронного тягового привода электрического локомотива: Дис. ... канд. техн. наук.- М: МИИТ, 1981. – 180 с.
13. Вилькевич Б.И. Автоматическое управление электрической передачей и электрические схемы тепловозов/ Б.И. Вилькевич – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
14. Лисунов. В.Н. Использование сил взаимодействия движущих колес с рельсами в режимах тяги и торможения. - Омск: Омская гос. акад. Путей сообщения, 1994. – 87 с.
15. Бурков А.Т. Управление электроэнергетическими процессами локомотивов с асинхронным приводом: Дис. ... д-ра техн. наук.- Л., 1982.- 470 с.
16. Бурков А.Т., Пармас Я.Ю. Применение асинхронных двигателей в тяговом приводе локомотивов //Полупроводниковая техника в устройствах электрических железных дорог: Межвуз. сб. тр. - Л., 1983.- С. 7 - 17.
17. Литовченко В.В. Внедрение асинхронного привода на тяговом подвижном составе// Железнодорожный транспорт. ОИ/ЦНИИТИ МПС. - 1988. - Вып. 1. - С. 1-36.
18. Егоров А.Т., Бородай В.П., Перфилов А.А. Зарубежные локомотивы с асинхронным тяговым приводом// Железнодорожный транспорт. ОИ/ЦНИИТИ МПС. - 1996. - Вып.4. - С. 1 - 100.
19. Иньков Ю.М., Федяева Г.А., Феокистов В.П. Системы управления для электроприводов с асинхронными тяговыми двигателями// Электротехника.– 2009. - № 4. - С. 31-35.
20. Фаминский Г.В., Меншутин Н.Н., Филатова Л.М. Улучшение тяговых свойств электровозов при поосном регулировании силы тяги с контролем сцепления// Тр. Всесоюз. н.-и. ин-та ж.-д. транспорта. - М.: Трансжелдориздат, 1968. - Вып. 378. - С. 80-101.
21. Фаминский Г.В. Автоматические системы для повышения сцепления колес локомотива с рельсами//Тр. ВНИИЖТ. Вып. 396. – М.: Трансжелдориздат.- 1974. – 135 с.

					<b>0032.206303.000.04МР.ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

