

УДК _____
Інв.№ _____

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
з спеціальності G3 – «Електрична інженерія»**

на тему: Проектування тягового електропривода потяга «TGV» за системою «перетворювач частоти – асинхронний двигун»

(наказ №250с від 18.05.2026)

КНУ.РБ.G3.26.250-01

Виконав: студент групи ЕЕМ-23ск

Баранець Дмитро Сергійович

Керівник випускової роботи

к.т.н., доц. Сьомочкин Альберт
Борисович

Нормоконтролер:

к.т.н., доц. Сьомочкин Альберт
Борисович

Гарант ОПП:

к.т.н., доц. Пересунько Ігор
Ігорович

Завідувач кафедри ЕІ:

д.т.н., проф. Сінчук Олег
Миколайович

Кривий Ріг 2026 р.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра на тему:
«Проектування тягового електропривода потяга «TGV» за системою
«перетворювач частоти – асинхронний двигун»»

КНУ.РБ.G3.26.250-01

61 с., 26 рис., 4 табл., 8 літературних джерел

Об'єкт дослідження – тяговий електропривод колісного високошвидкісного потягу «TGV «Sud-Est»» за системою ПЧ-АД

В першому розділі надано загальний вигляд потягу «TGV «Sud-Est», візків моторис потягу, кінематична схема тягових приводів вісей, розглянуті вимоги до тягового ЕП потягу «TGV». На основі аналізу вимог до ЕП обрано систему ПЧ-АД, яка дозволяє забезпечити необхідні режими роботи потягу, високий ККД та потрібну жорсткість статичних характеристик. Проведено розрахунок потужності приводних двигунів. Складена схема заміщення та розраховано її параметри, побудовані статичні та енергетичні характеристики системи ПЧ-АД

У другому розділі здійснені обґрунтування та розробка системи керування ПЧ-АД. За базову прийнята чотирьохконтурна система підлеглого регулювання з регуляторами струму, потоку та швидкості. Надано опис принципової схеми системи автоматизованого електроприводу.

У третьому розділі виконане дослідження динамічних режимів роботи тягового привода потягу. Визначено, що ефективність від впровадження замкненої системи векторного керування приводом ПЧ-АД значно підвищує показники динаміки потягу, забезпечуючи плавний розгін з обмеженням струмів тягових двигунів, з відсутністю перерегулювань за швидкістю.

Ключові слова: ПОТЯГ «TGV «Sud-Est»», ПЧ-АД, ЯКІСТЬ РЕГУЛЮВАННЯ, СТАТИКА, ДИНАМІКА, ЕНЕРГЕТИКА, ПІДЛЕГЛЕ КЕРУВАННЯ

Криворізький національний університет
Факультет: електротехнічний
Освітній рівень: бакалавр
Спеціальність: G3 – Електрична інженерія

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Баранця Дмитра Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Проектування тягового електропривода потяга «TGV» за системою «перетворювач частоти – асинхронний двигун»
2. Термін подання студентом роботи: 10 червня 2026 р.
3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є модернізація тягового електроприводу потягу. Завданнями досліджень є розробка та проектування електромеханічного комплексу потягу на новій елементній базі
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Характеристика електромеханічної системи, вибір електрообладнання та розрахунок статичних характеристик привода; II. Обґрунтування і розробка системи керування електроприводом; III. Моделювання динамічних режимів роботи привода механізму на ЕОМ.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
I. Загальний вид потягу «TGV Sud-Est» та технічна характеристика; II. Розрахунок статичних характеристик системи привода; III. Розробка системи керування ПЧ-АД; IV. Обґрунтування системи керування та побудування моделі для дослідження динаміки; V. Дослідження динаміки системи електроприводу -1; VI. Дослідження динаміки системи електроприводу -2

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Сьомочкин А.Б.		
II	Сьомочкин А.Б.		
III	Сьомочкин А.Б.		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Основні відомості про вакуумний насос, загальний вид, кінематика і режими роботи	30.04.26
2	Обґрунтування і вибір системи електропривода	03.05.26
3	Розрахунок потужності і вибір електродвигуна	06.05.26
4	Розрахунок перетворювача, вибір елементів силової частини та елементів захисту	10.05.26
5	Розрахунок параметрів схеми заміщення, розрахунок механічних і енергетичних характеристик	13.05.26
6	Обґрунтування і вибір структури системи керування	20.05.26
7	Розрахунок параметрів елементів системи керування	24.05.26
8	Розробка алгоритмів та програмного забезпечення мікропроцесорної системи керування	27.05.26
9	Моделювання статичних та динамічних режимів замкненої системи в пуско-гальмівних режимах та при навантаженні	01.06.26
10	Аналіз якісних показників розробленої системи	05.06.26
11	Оформлення пояснювальної записки	10.06.26

Дата видання завдання 30.04.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

_____ Баранець Д.С.
(ПІБ)

Керівник роботи _____
(підпис)

_____ Сьомочкин А.Б.
(ПІБ)

ЗМІСТ

Вступ.....	6
РОЗДІЛ 1.Характеристика електромеханічної системи, вибір електрообладнання та розрахунок характеристик розімкненої системи привода технологічного механізму	8
1.1 Основні відомості про потяг TGV «Sud-Est» , загальний вид, кінематика і режими роботи.....	8
1.2 Обґрунтування і вибір системи електропривода поезда типу TGV.	17
1.3 Розрахунок потужності і вибір електродвигуна.	19
1.4 Розрахунок перетворювача, вибір елементів силової частини та елементів захисту	24
1.5 Розрахунок параметрів схеми заміщення, розрахунок механічних і енергетичних характеристик.....	29
РОЗДІЛ 2. Обґрунтування і розробка системи керування електроприводом.	40
2.1. Обґрунтування і вибір структури системи керування електроприводом	40
2.2. Розрахунок параметрів елементів системи керування електроприводом	48
2.3. Розробка силової схеми автоматизованого тягового приводу	51
РОЗДІЛ 3. Моделювання динамічних режимів роботи привода механізму на ЕОМ	56
3.1.Моделювання статичних та динамічних режимів замкненої системи в пуско-гальмівних режимах та при навантаженні	56
3.2.Аналіз якісних показників розробленої системи керування	59
Висновки	60
Список використаних джерел	61

ВСТУП

У сучасному світі високошвидкісний залізничний магістральний транспорт (ВШМТ) є одним із ключових драйверів економічного та технологічного розвитку держав. Глобальна мережа ВШМТ безперервно розширюється: країни Азії (особливо Китай та Японія) та Європи демонструють стійке зростання довжини ліній та обсягів пасажироперевезень. Перспективні світові розробки в цій галузі спрямовані не лише на подолання нових швидкісних рубежів, а й на кардинальне підвищення енергоефективності, впровадження інтелектуальних систем управління, використання технологій магнітного підвісу (Maglev) та розробку гібридних силових установок. Проте основу світового високошвидкісного парку, як і раніше, становлять традиційні електропоїзди з опиранням на рейки, ефективність яких безпосередньо залежить від досконалості їх тягових систем.

Історичним флагманом та піонером європейського високошвидкісного руху є французька система TGV (Train à Grande Vitesse). Перше покоління цих поїздів — TGV «Sud-Est», введене в комерційну експлуатацію на початку 1980-х років, стало справжнім технологічним проривом свого часу, довівши комерційну спроможність та безпеку швидкостей понад 260 км/год. Однак на сьогоднішній день електропоїзди ранніх серій виробили значну частину свого ресурсу, а їхнє технічне оснащення морально та фізично застаріло.

Однією із головних проблем поїздів TGV першого покоління є використання тягових систем на базі колекторних двигунів постійного струму. Подібні рішення суттєво поступаються сучасним аналогам за масогабаритними показниками, ККД, надійністю та, що найбільш критично, вимагають високих витрат на технічне обслуговування щітково-колекторного вузла. В умовах сучасних вимог до екологічності та рентабельності перевезень експлуатація такого приводу стає економічно недоцільною.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває завдання глибокої модернізації існуючого рухомого складу. Повна заміна рухомого парку потребує

колосальних капітальних вкладень, тому економічно виправданим рішенням є реновація локомотивів із заміною застарілих вузлів. Переведення поїздів TGV «Sud-Est» на сучасний тяговий частотно-регульований асинхронний електропривід дозволяє вирішити відразу комплекс завдань: суттєво підвищити питому потужність, покращити тягово-динамічні характеристики, знизити енергоспоживання за рахунок ефективного рекуперативного гальмування та мінімізувати експлуатаційні витрати завдяки високій надійності.

Дана пояснювальна записка присвячена розрахунку та проектуванню тягового асинхронного частотного електроприводу для електропоїздів TGV «Sud-Est». Виконання цієї роботи є важливим етапом в обґрунтуванні технічної можливості та економічної доцільності адаптації класичних високошвидкісних поїздів до жорстких стандартів транспортної індустрії XXI ст.

РОЗДІЛ 1.Характеристика електромеханічної системи, вибір електрообладнання та розрахунок характеристик розімкненої системи привода технологічного механізму

1.1 Основні відомості про потяг TGV «Sud-Est» , загальний вид, кінематика і режими роботи

На високошвидкісних магістралях Франції експлуатуються 3 покоління потягів TGV (табл. 1.1).

Конструктивною особливістю потягів TGV являється прийнята в 1974 році концепція потягів постійній складеності, при якій кінці суміжних проміжних вагонів спираються на спільні візки, з розміщенням тягового електроустаткування на кінцевих вагонах.

Зчленована конструкція вагонів у комбінації з особливостями ходової частини дали можливість зменшити число візків і, як наслідок, — маси потяга, знизити положення центру ваги вагонів (рівень підлоги вагона над РГР (рівень головки рейки) склав усього 0,9 м), забезпечити жорстке з'єднання вагонів і знизити рівень вібрацій. Ці технічні рішення обумовили також зниження сил основного супротиву руху (аеродинамічного, опору від внутрішнього тертя в рухомому составі, а також від взаємодії поїзда й колії) і тим самим забезпечили досягнення високих швидкостей. У підсумку були створені умови для підвищення динамічної стабільності потяга, стабільності ходу при високій швидкості й зменшення динамічних впливів потяга, що рухається, на колію.

У потягах TGV Sud-Est 1-го покоління (див. рис. 1.1.) у вторинному ступені ресорного підвішування використовувалися сталеві спіральні пружини великих розмірів масою 300 кг із демпферами вертикальних і поперечних коливань (рис.1.2.а).

					ЕТФ. КНУ.РБ.Г3.26.250-01			
Змн.	Арк.	№ документа.	Підпис	Дат				
Розробив.	Баранець Д.С.				РОЗДІЛ 1. Характеристика електромеханічної системи, вибір електрообладнання та розрахунок статичних характеристик привода.	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірів.	Сьомочкін А.Б.						8	
Рецензія.						КНУ Каф. ЕІ ЕЕМ-23ск		
Н. Контр.								
Затверд..	Сінчук О.М.							

Тип потягу	TGV Sud-Est	TGV Atlantique	TGV Réseau / Thalys PBA	TGV Duplex	TGV Thalys PBKA	Eurostar
Рік випуску	1981	1988	1993/1996	1996	1997	1994 1997
Конфігурація потяга	2лк ¹⁾ +8пц ²⁾	2лк+10пц	2лк+8пц	2лк+8пц	2лк+8пц	2лк+18пц 2лк+14пц
Max швидкість, км/год	270	300	300	300	300	300 300
Кількість пасажирів	386	485	377	516	377	794 578
Довжина потягу, м	200,2	237,6	200,2	200,2	200,2	393,7 318,9
Ширина вагона, м	2,814	2,904		2,887	2,904	2,814 2,814
Висота вагона, м	3,43	3,48		4,38	3,48	3,69 3,69
Матеріал корпусу	сталь			алюм.		
Маса потягу, т	384	450	385	380	385	723 620
Маса з пасажирями, т	417	490	418	425	418	787 665
Кількість візків:						
загальна	13	15	13	13	13	24 20
моторних	6	4	4	4	4	6 6
Навантаження на вісь, т	17	17	17	17	17	17 17
Потужність тягового привода, МВт						
~ 25 кВ, 50 Гц	6,4	8,8	8,8	8,8	8,8	12,24 12,24
= 1,5 кВ	3,1	3,6	3,68	3,68	3,68	4,0 –
= 3 кВ	–	–	3,68	–	3,68	5,7 5,7
~ 15 кВ, 16 2/3 Гц	2,8	–	–	–	3,68	– –
= 0,75 кВ	–	–	–	–	–	3,4 3,4
Кільк. струмоприймачів	4 ³⁾	4 ³⁾	4 ³⁾	4 ³⁾	4 ³⁾	6 ⁴⁾ 6 ⁴⁾
Кільк. ТЕД х Потужність кВт	12х530	8х1100	8х1100	8х1100	8х1100	12х1020 12х1020
Енергоспоживання, кВт·ч/пас-км	0,0614	0,0604	0,0778	0,0568	0,0778	0,0514 0,0706
Тип двигуну			синхронний			асинхронний
Система керування	тиристорно-фазове	при постійному струмі - імпульсний регулятор напруги + інвертор струму при змінному - випрямляч + інвертор струму				4 q-s + інвертор напруги

Таблиця 1.1. Порівняльна характеристика потягів TGV

Тут 1) - локомотив, 2) - причіпний вагон, 3) - два струмоприймачі перемінного струму + два постійного струму, 4) - два струмоприймачі перемінного струму + два постійного струму + два комплекти струмознімальних башмаків (по чотири башмаки на моторний вагон).



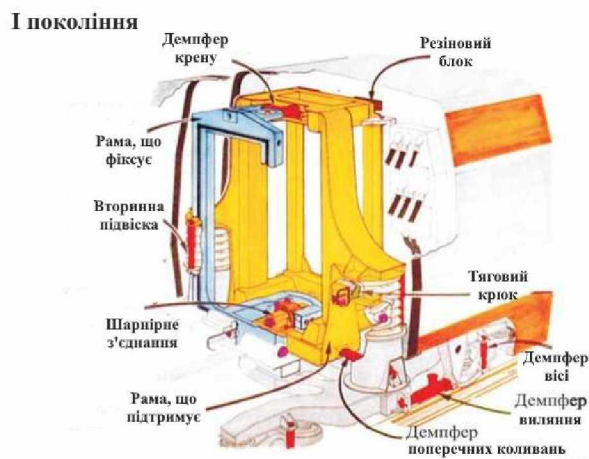
Рис.1.1. Загальний вигляд потяга TGV Sud-Est, для якого в даній роботі проектується тяговий привод

При модернізації потягів 1-го покоління сталеві пружини вторинної підвіски були замінені пневморесорами SR-10 діафрагменного типу з резервуарами великої ємності, встановленими безпосередньо над оболонками ресор, котрі передають на них навантаження від кузова вагона (рис.1.2.б).

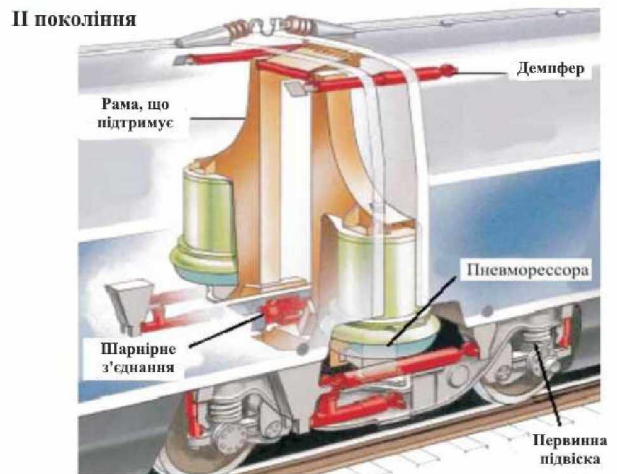
Гарні технічні властивості пневморесор, що демпфірують, у вертикальній і поперечній площині дозволили відмовитися від демпферів вертикальних і поперечних коливань, а також забезпечити власну частоту підвішування другого ступеня в повністю навантаженому стані — 0,7 Гц.

Але висока гнучкість пневморесор поставила вимогу використання демпфера крену для запобігання надмірного нахилу кузова в кривих і

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10



а) пружна



б) пневматична

Рис. 1.2. Схема вторинної підвіски немоторних візків потягів TGV

встановлення демпферів, що зв'язують вагони в поздовжньому напрямку, для усунення поздовжніх коливань кузовів.

Гасіння коливань вилання візка здійснюється демпферами, що зв'язують кузов вагона і візок у поздовжньому напрямку. Гасіння коливань галопування візка здійснюється демпферами, установленими в первинному ступені підвішування.

Нижче (рис. 1.3-1.4) наведена інформація про основні розміри потяга TGV, розміщення основного обладнання по вагонах, а також інформація про кількість місць у кожному з вагонів, розподіл моторних і немоторних візків з одночасною вказівкою призначення кожного елемента потяга.

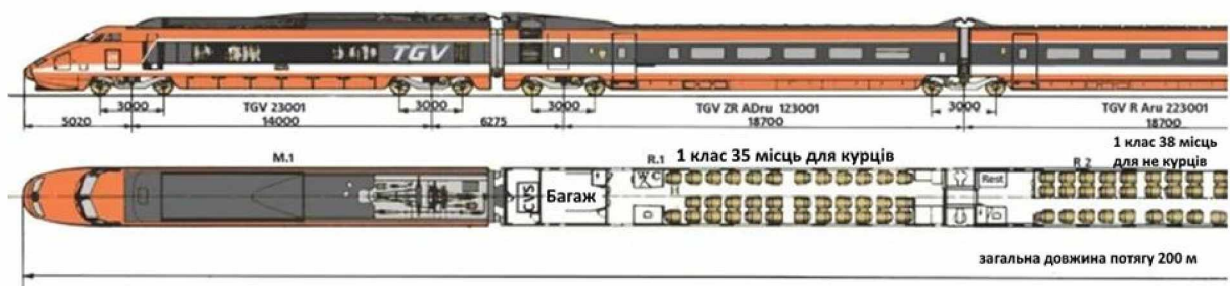


Рис. 1.3.а Вид збоку та зверху (у розрізі) потяга TGV, з розмірами й розташуванням устаткування

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01

Арк.

11

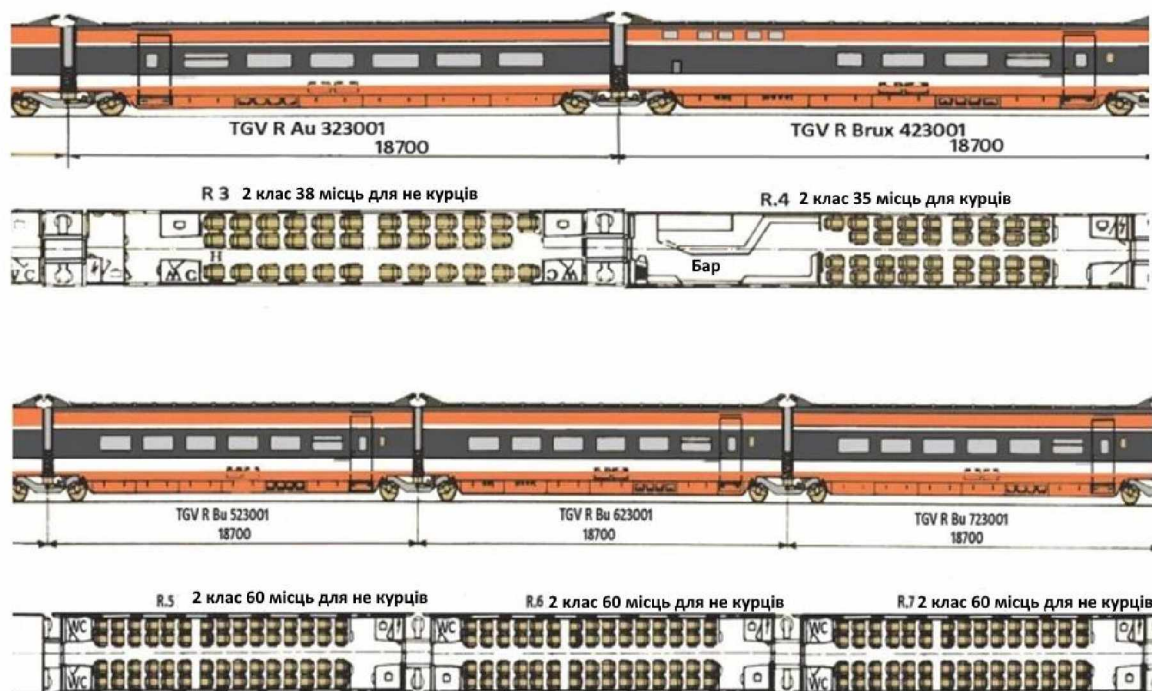


Рис. 1.3. б. Вид збоку та зверху (у розрізі) потяга TGV, з розмірами й розташуванням устаткування

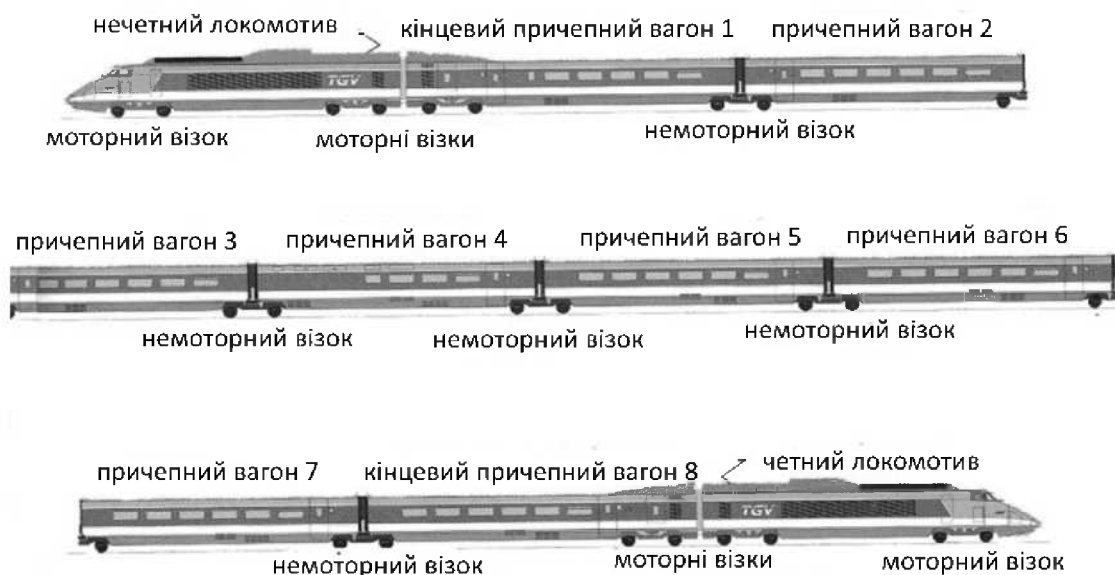


Рис. 1.4. Розподіл візків із зазначенням функціонального призначення вагонів

У моторних вагонах потягів TGV використовуються візки Y230A з Н-подібною рамою й колісною базою 3000 мм (рис. 1.5).

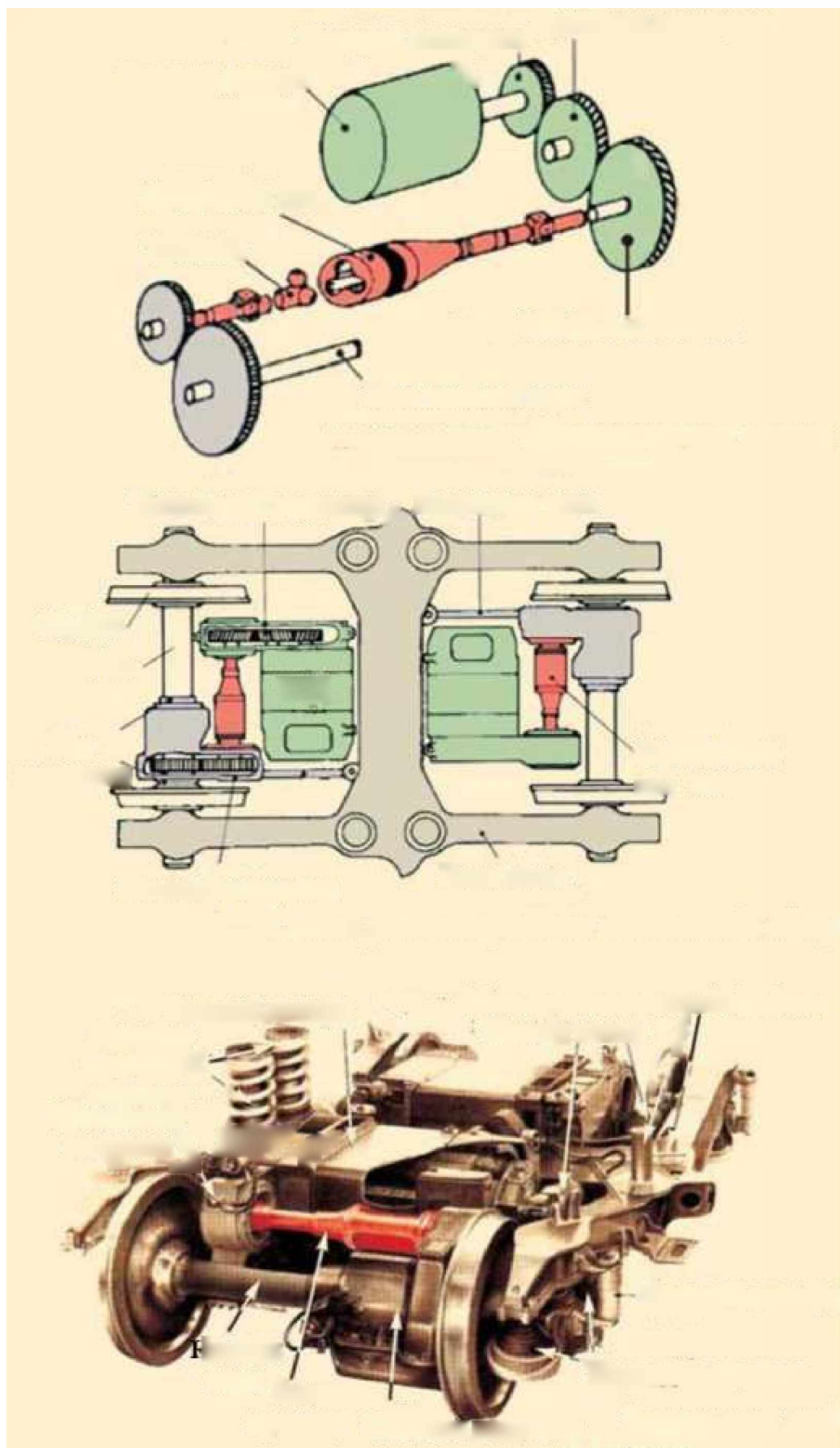


Рис. 1.5. Моторний візок TGV

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ. КНУ.РБ.Г3.26.250-01

Арк.

13

У першому ступені ресорного підвішування в якості пружних елементів використовуються гумово-металеві блоки з паралельно включеними гідравлічними гасителями коливань. У другому ступені підвішування застосовані пружини типу Flexicoil, встановлені в місцях зниження бічних балок рами.

Синхронні тягові двигуни (рис. 1.6) мають опорно-кузовне підвішування.

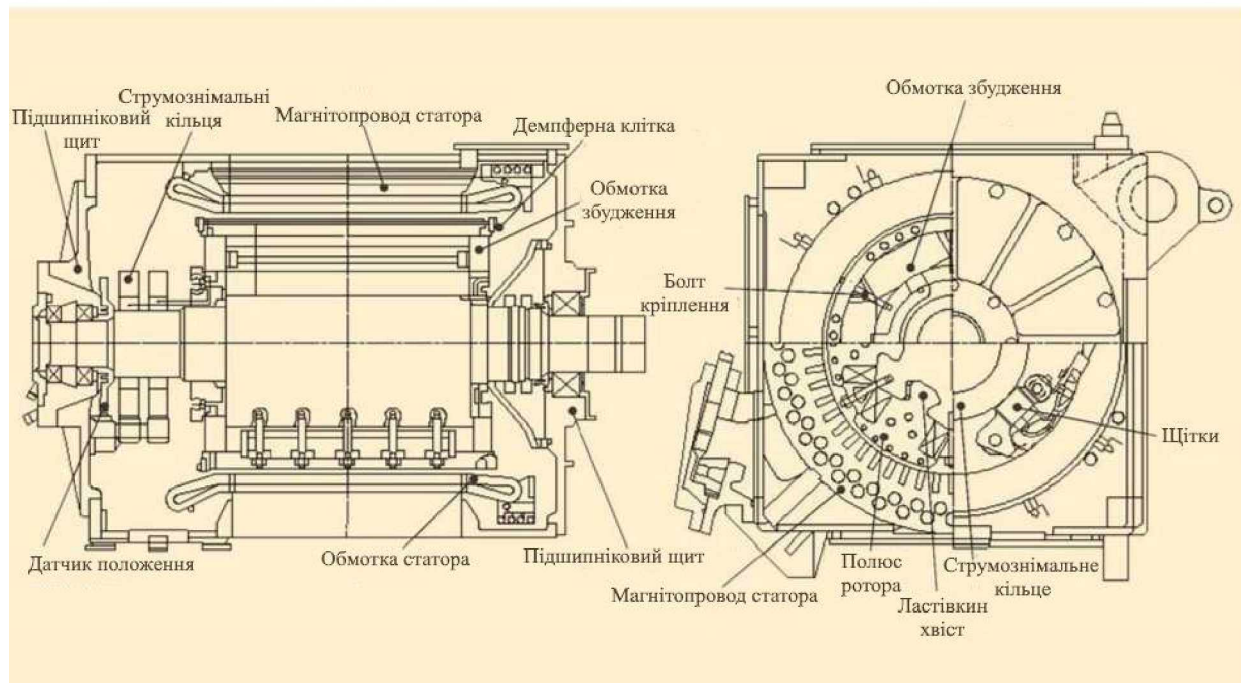


Рис. 1.6. Схема конструкції синхронного тягового двигуна

Потужність тягового двигуна становить 1120 кВт (для TGV Eurostar), максимальна частота обертання — 4000 об/хв, маса — 1460 кг. Момент до колісних пар передається двоступінчастим проміжним редуктором з передатним відношенням 1,16, виконаним заодно із двигуном і осьовим редуктором. Загальне передатне відношення привода становить 2,1894. Передача обертаючого моменту до осьового редуктора здійснюється поперечним розсувним карданним валом, конструкція якого дозволяє компенсувати взаємні переміщення кузова й візка в поперечній площині. Діаметр нових коліс моторного візка становить 920 мм, а зношених — 850 мм.

Моторні вагони обладнані електричними реостатними й пневматичними

колодковими гальмами, а на потягах 3-го покоління — дисковими. Причіпні вагони мають тільки дискові гальма. Тут на кожній колісній парі встановлюються по 2 подвійних кованих диска товщиною 45 мм діаметром 640 мм.(рис. 1.7). Гальмова накладка складається із циліндричних спечених із заліза й міді шайб, приварених до несучої пластини, яка кріпиться до тримача замком типу «ластівкин хвіст». Такий гальмовий диск при гальмуванні на майданчику зі швидкості 300 км/год розсіює $13,5 \cdot 10^6$ Дж енергії.

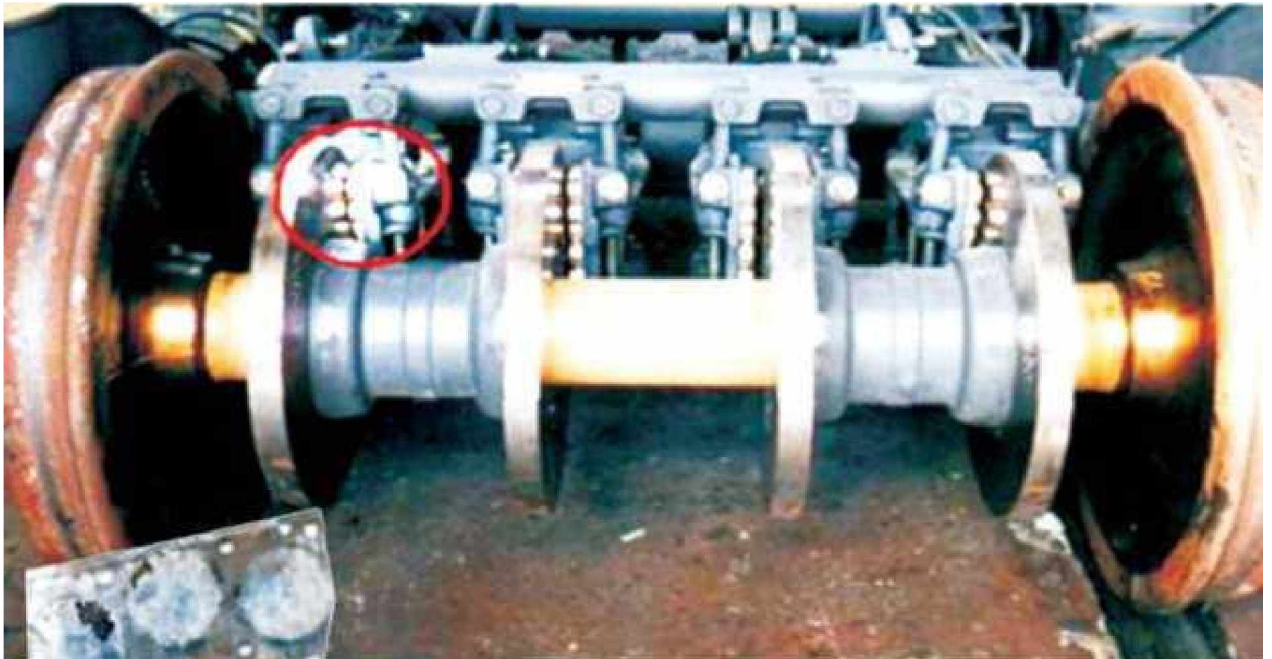


Рис. 1.7. Немо́торна вісь TGV з дисковими гальмами

Типова схема компонування обладнання кінцевих вагонів потягів TGV останніх поколінь приведена на рис. 1.8.

Потяг TGV Sud-Est (рис. 1.1) являється потягом першого покоління. Виходячи з існуючого в той період електроустаткування, тяговий електропривод був створений на базі колекторних двигунів пульсуючого струму. Для того щоб забезпечувалася тягова потужність, необхідна для руху потяга зі швидкістю 270 км/год, а також для рушання на підйомі 35‰ при відмові тягового агрегату одного з візків у потягу TGV Sud-Est використовуються 6 моторних візків, тобто по 2 у кожному з кінцевих, а також

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

по одному крайньому моторному візку у суміжних з ними причіпних вагонів.

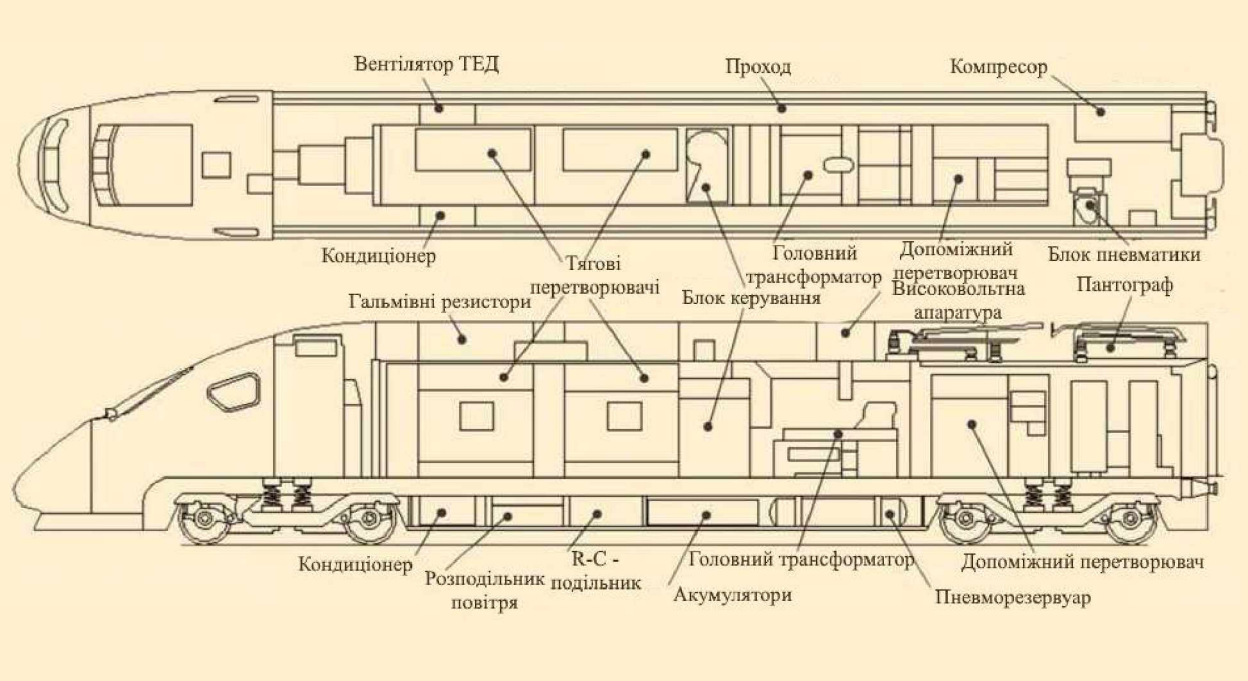


Рис. 1.8. Розміщення обладнання на головному вагоні TGV

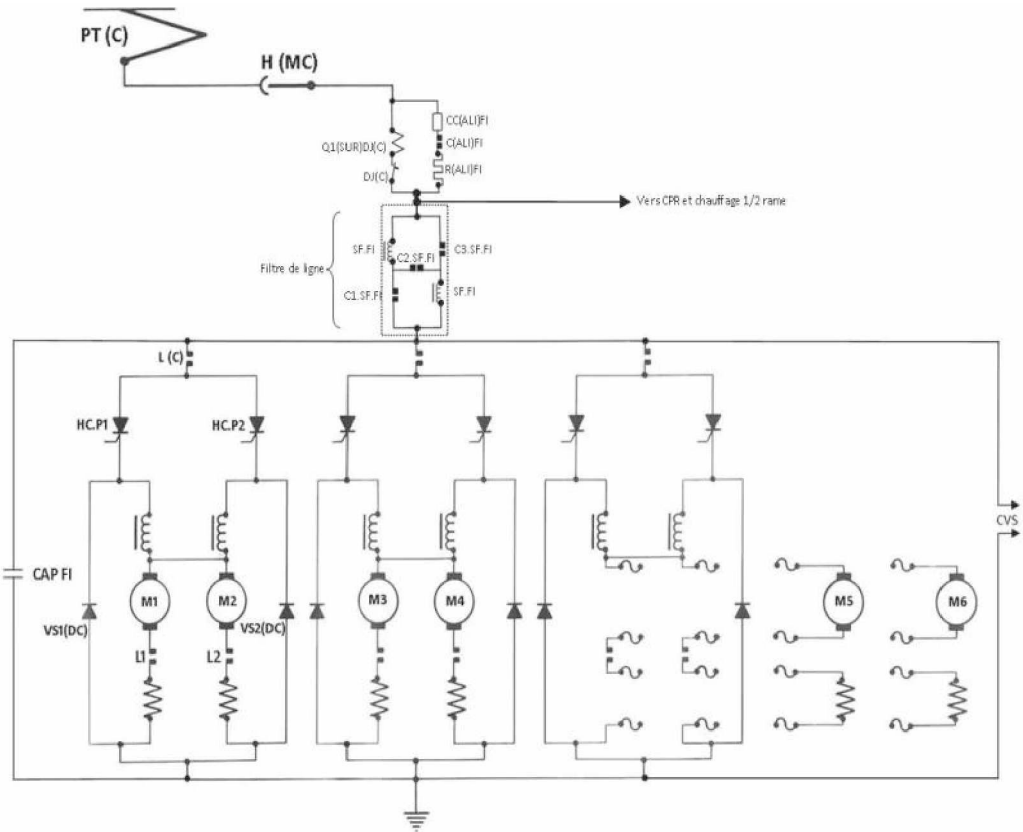


Рис. 1.9. Схема тягового однофазного електропривода постійного струму першого покоління

До другого покоління відносяться потяги TGV Atlantique, TGV Reseau і TGV Thalys PBA. Відмінною особливістю цих потягів являється використання для системи електропривода синхронного тягового двигуна з інвертором струму, що дозволило за рахунок підвищення потужності двигуна в одиниці виконання до 1,1 МВт зосередити тягове електроустаткування у двох кінцевих вагонах. Такий привод використовувався з незначними змінами у всіх потягах TGV другого й третього поколінь.

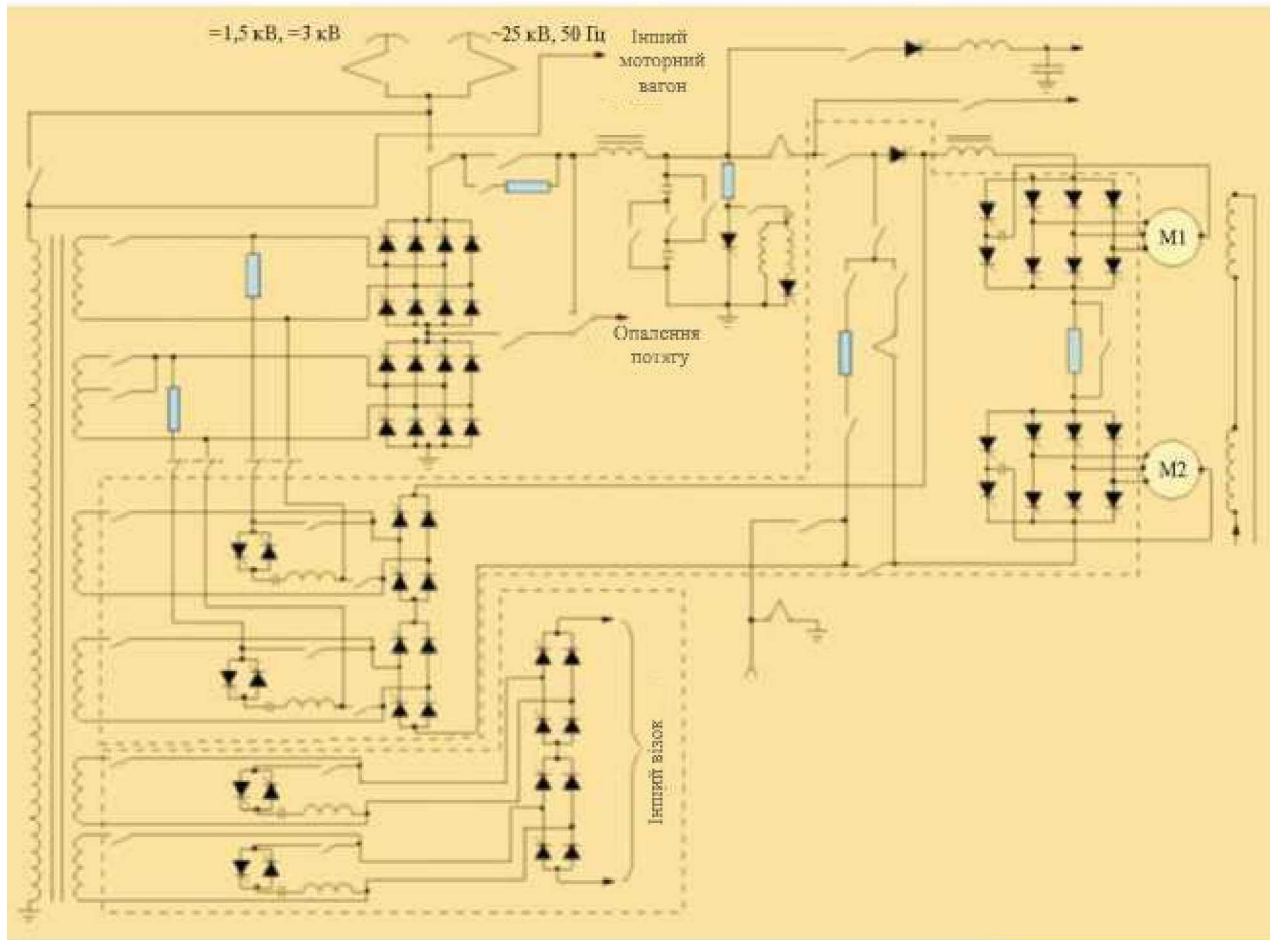


Рис. 1.10. Схема синхронного електропривода TGV другого й третього поколінь

1.2 Обґрунтування і вибір системи електропривода поезда типу TGV.

Особливість поїздів TGV полягає у високих експлуатаційних швидкостях (300–320 км/год) та класичній концепції зосередженої тяги (поїзд складається з

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

двох головних моторних вагонів та безмоторних причіпних вагонів між ними). Це накладає специфічні обмеження приводу.

По-перше, поїзд є абсолютно симетричним тяговим комплексом. Електропривод повинен забезпечувати повноцінний реверс з ідентичними тяговими та гальмівними характеристиками в обох напрямках. Потяг працює за принципом "push-pull" (тягни-штовхай), розворот складу на кінцевих станціях не провадиться.

По-друге, висока питома потужність. Через зосереджену тягу вся потужність складу (від 8 до 12 МВт) розподіляється всього на 8 або 12 моторних осей. Це вимагає приводу створення гранично високих моментів на вісь.

По-третє, САУ приводу має формувати класичну тягову характеристику високошвидкісного транспорту.

Після досягнення номінальної швидкості обертання (зазвичай близько 100-150 км/год), САУ переводить привід в режим ослаблення поля (для асинхронних чи синхронних машин — зниження потоку), підтримуючи постійну потужність подальшого подолання аеродинамічного опору, що зростає пропорційно квадрату швидкості.

Точно підтримувати задану швидкість (до 320 км/год) із компенсацією збурень (зміна профілю шляху, пориви зустрічного/бічного вітру).

Здійснювати електродинамічний гальмування (рекуперативне з віддачею в мережу або реостатне зі скиданням на гальмівні резистори). САУ має забезпечувати максимальний гальмівний момент на високих швидкостях, перемикаючись на фрикційні (механічні) гальма при зниженні швидкості до 30-40 км/год.

Здійснювати захист від боксування та юзу (Antislip/Antiskid). При потужностях близько 1 МВт на вісь та швидкостях 300 км/год зчеплення колеса з рейкою мінімальне та нестабільне. САУ повинна мати швидкодіючий контур регулювання ковзання, що розпізнає макро- та мікробоксування за мілісекунди,

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

знижуючи момент рівно настільки, щоб відновити зчеплення, не втрачаючи динаміки розгону.

Підтримувати високу надійність. У разі виходу з ладу одного інвертора або ТЕД, мікропроцесорна система повинна локалізувати аварію, відключити пошкоджений сегмент і перерозподілити тягове зусилля на осі, щоб поїзд міг самостійно залишити високошвидкісну магістраль (хоча б на зниженій швидкості).

Забезпечити електромагнітну сумісність (ЕМС). Інвертори ТЕП генерують сильні гармоніки. САУ та топологія фільтрів повинні гарантувати, що струми, що повертаються в рейки, не створюватимуть перешкод для систем керування рухом поїздів, які є критично важливими для безпеки на таких швидкостях.

1.3 Розрахунок потужності і вибір електродвигуна.

Для розрахунку потужності тягового приводу використовуються наступні вихідні дані (табл. 1.2):

Маса потяга m , т (кг)	384 (384 000).
Максимальна експлуатаційна швидкість $V_{\max}$ км/год (м/с)	320 (або 88.89)
Прискорення при пуску a , м/с ² .	0.5
Діаметр колеса, м:	
нового	0.92
зношеного	0.85
Кількість обмоторених осей n :	6
у локомотиві (мотрисі)	4
у кінцевому причіпному вагоні осі)	2
Осьове навантаження, т	17
Загальне передаточне число привода	2,1894 (1.98)

Розрахунок опору. Опір руху потяга розраховується по емпіричній формулі Девиса:

$$R(v) = A + B \cdot v + C \cdot v^2$$

де А - механічний опір від тертя в підшипниках кочення (становить 0.001-0.003 від зчіпної ваги); В - опір коченню колеса по рейці (залежить від швидкості, становить 0.001-0.002 від зчіпної ваги на максимальній швидкості 320 км/год); С - аеродинамічний опір (становить 0.074 від зчіпної ваги для TGV Sud-Est на швидкості 320 км/год).

Для визначення параметрів опору руху потяга розрахуємо зчіпну вагу:

$$F_{сц} \approx 6 \cdot 17,000 \text{ кг} \cdot 9,81 \text{ м/с}^2 \approx 1000620 \text{ Н},$$

де 6 – кількість активних обмотованих осей, 17000 кг – осьове навантаження на одну вісь, 9.81 м/с^2 – прискорення вільного падіння.

Складова А не залежить ні від чого й розраховується як частина від зчіпної ваги:

На максимальній швидкості складова опору від кочення коліс:

$$F_{сц} \cdot 0.002 = 1000620 \cdot 0.002 = 2001,24 \text{ Н},$$

звідки розрахунковий коефіцієнт:

$$B = 2001,24 / 88,89 = 22.51$$

На максимальній швидкості складова від опору повітря досягає:

$$F_{сц} \cdot 0.074 = 1000620 \cdot 0.074 = 73749 \text{ Н},$$

звідки розрахунковий коефіцієнт:

$$C = 73749 / 88.89^2 = 9.33$$

Таким чином, сила опору потяга набуде наступний вигляд:

$$R(v) = 3001,86 + 22,51 \cdot v + 9.33 \cdot v^2$$

Розрахунки потрібної тягової потужності та вибір двигуна. Необхідна тягова сила F_t при рівномірному прямованні на максимальній швидкості на прямій горизонтальній ділянці дорівнює силі опору:

$$F_t = R(v) = R(88.89) = 3001.86 + 2000.91 + 73720.36 = 78724.13 \text{ Н}$$

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сумарна потужність тяги при рівномірному русі розраховується як:

$$P_{\text{сумм}} = F_t \cdot v_{\text{max}} = 78724.13 \cdot 88.89 = 6997788,05 \text{ Вт}$$

Тому що обмоторених осей - 6, потужність одного тягового двигуна Рдв (без урахування ККД передачі):

$$P_{\text{дв}} = P_{\text{сумм}} / n = 6997788,05 \text{ кВт} / 6 = 1166298, \text{кВт}$$

Вибираємо сучасний тяговий трифазний асинхронний двигун розробки Alstom, який використовувався для модернізації потяга TGV POS.

Таблиця 1.3.

Тип	Асинхронний з короткозамкненим ротором
Номінальна потужність	1200 kw
Пусковий момент:	6450 Nm
Пусковий момент у бустерному режимі:	7690Nm
Пусковий струм:	690 Aeff
Швидкість обертання на 320 км/год (напівзношені колеса):	3800 rpm
Напруга між фазами при швидкості 320 км/год	1390 Veff
Частота статора при 320 км/год	192 Hz
ККД	95%.
Маса:	1350 kg
Вентиляція:	Примусовий, осьовий, 1,25
Ізоляція:	Class 200
Механічна конструкція:	Інтегрований фланцевий мотор-редуктор

Кожен візок двигуна оснащений двома асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором. Вони мають три парі полюсів та примусову вентиляцію. Їхня швидкість обертання становить 3800 об/хв, що відповідає швидкості 320 км/год (з напівзношеними колесами) та номінальній потужності 1200 кВт. Їхня маса становить 1350 кг, що на 200 кг більше порівняно з еквівалентним синхронним двигуном, що працює на потужності 1100 кВт.

Тоді швидкість обертання напівзношених коліс:

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

$$\omega_k = V / R = 88.89 / 0.885 / 2 = 200.88 \text{ рад/с},$$

Де 0.885 – проміжна величина між діаметрами нового (0.92 м) і зношеного колеса (0.85 м), тобто діаметр напівзношеного колеса.

Швидкість обертання ротора двигуна, відповідна до швидкості 320 км/год:

$$\omega_{\text{дв}} = n_{\text{дв}} \cdot \pi / 60 = 393.73 \text{ рад/с}.$$

У такому випадку передаточне число виходить рівним:

$$i = \omega_{\text{дв}} / \omega_k = 397.73 / 200.88 = 1.98$$

Тоді необхідний від АД крутний момент M на максимальній швидкості 320 км/год залежить від діаметра колеса й передаточного числа редуктора μ :

$$M = F_{\text{дв}} \cdot D_k / (2 \cdot \mu \cdot \eta) = 78724.13 / 6 \cdot 0.92 / (2 \cdot 1.98 \cdot 0.98) = 3110.88 \text{ Нм},$$

де η — ККД зубчастої передачі.

Реальний момент, що розвивається обраним АД на максимальній швидкості 320 км/год:

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}} = 1200000 / (320 \cdot \pi / 30) = 1200000 / 397.73 = 3017 \text{ Нм}$$

Номінальне значення моменту на 3% менше необхідного моменту, що можна вважати гарним співпадінням, і прийнятним результатом.

Для забезпечення пускового прискорення 0.5 м/с^2 пускова тяга повинна бути значно вище:

$$F_{\text{пуск}} = m \cdot a + R(0) = 384000 \cdot 0.5 + 3001.86 = 195001.86 \text{ Н}$$

Де $R(0)$ - тертя спокою.

Тоді отримана величина моменту, приведена до вала одного двигуна:

$$M = F_{\text{пуск}} / 6 \cdot (D / 2 \cdot \mu \cdot \eta) = 195001.86 / 6 \cdot 0.92 / (2 \cdot 1.98 \cdot 0.98) = 7704.68 \text{ Н}$$

Цю силу тяги повинні забезпечувати інвертори (IGBT-транзистори), подаючи на двигуни максимальний пусковий струм без перевищення межі зчеплення колеса з рейкою. Однак навіть у бустерному режимі обраний тяговий двигун здатний забезпечити не більш 760 Нм тяги, а у звичайному пусковому режимі – не більш 6450 Нм, що становить не більш 17 % від необхідного значення. Щоб забезпечити задане прискорення, на перший погляд варто було

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

б забезпечити збільшення потужності приводних двигунів, але це практично неможливо через обмежений простір у моторному візку для розміщення тягових двигунів більшої потужності. Тому що фактично обмотореними є не 6, а 12 осей (у потяга дві моторні на кінцях, він може рухатися реверсивно), те виникає цікавий варіант залучення моторів ще одного візка, що знаходяться у хвості потяга й здійснюючих не тягу, а штовхання. Для настільки високошвидкісних потягів час пуску після нечисленних зупинок по шляху проходження буде становити практично незначну частину від загального часу руху. Як показали розрахунки рівномірного ходу, кількість двигунів потужністю 1,2 МВт, рівне 6, оптимально, тому що рушійний момент потяга практично дорівнює моменту опору потяга, тобто електродвигуни будуть використовуватися з максимальним ККД. Те ж саме стосується й змін профілю колії – при будь-якому зустрічному підйомі на шляху прямування поїзда зі зниженням швидкості, а значить із зростанням навантаження, можна підключати додаткові потужності, що штовхають, з кінця поїзда.

Перевірка за коефіцієнтом зчеплення. Щоб колеса не боксували (не прослизали), сила тяги не повинна перевищувати силу зчеплення в трьох випадках (при рушанні в сприятливих умовах, рушанні на мокрих рейках з листям, і при швидкості 320 км/год, відповідно):

$$F_{\max} \leq F_{\text{сц}} \cdot \Psi = 1000620 \cdot 0.33 = 330204 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$F_{\max} \leq F_{\text{сц}} \cdot \Psi = 1000620 \cdot 0.15 = 150093 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$F_{\max} \leq F_{\text{сц}} \cdot \Psi = 1000620 \cdot 0.08 = 80049 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

де Ψ — коефіцієнт зчеплення (знижується з зростанням швидкості, при **320 км/год** падає до **~0.08**). Перші два значення коефіцієнта зчеплення можна визначити із графіків рис. 1.11.

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

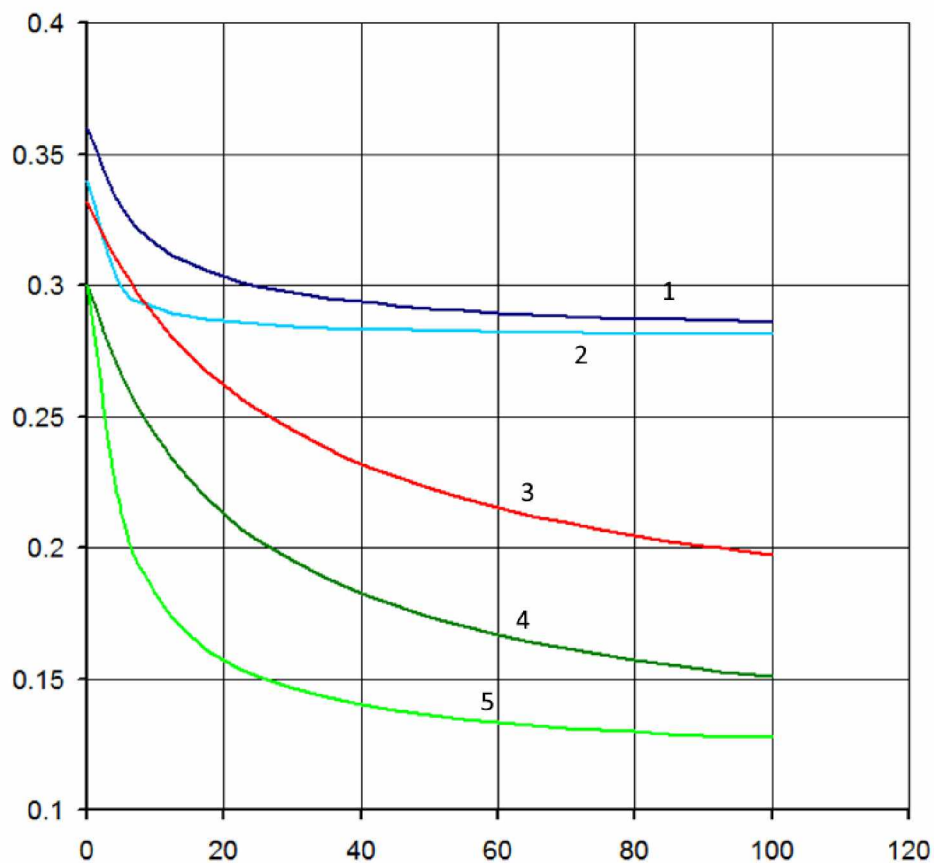


Рис.1.11. Графіки залежності коефіцієнта зчеплення локомотивів від швидкості

— (ціан) - вантажні електровози постійного струму (2); — (темно-синій) - вантажні електровози перемінного струму (1); — (червоний) - пасажирські електровози (3); — (темно-зелений) - тепловози ТЕ10 (4); — (яскраво-зелений) - інші тепловози (5).

Як ми бачимо, при швидкості 320 км/год величина опору руху трохи менше (на 1.7 %) чім гранична по зчепленню сила тяги, що являється гарним результатом.

1.4 Розрахунок перетворювача, вибір елементів силової частини та елементів захисту

Розрахунок інвертора напруги. Вихідні дані для розрахунків:

Лінійна напруга двигуна (діюча): $U_{\text{вих}} = 1390 \text{ В}$

Максимальний струм (діюче значення): $I_{\max} = 690 \text{ A}$

Потужність двигуна: $P_{\text{тед}} = 1.2 \text{ МВт}$

Щоб інвертор міг без відхилень сформувати вихідну перемінну напругу 1390 В за допомогою ШІМ, напруга в ланці постійного струму повинна бути не менше амплітудного значення лінійної напруги:

$$U_{dc} \geq \sqrt{2} \cdot U_{\text{вих}} = 1,41 \cdot 1390 = 1960$$

Для надійної роботи (і компенсації просідань) приймаємо номінальну напругу ланки постійного струму: $U_{dc} = 2000 \text{ В}$.

Транзистори повинні витримувати напругу ланки постійного струму з урахуванням комутаційних перенапруг. Рекомендований коефіцієнт запасу — $K_{\text{ц}} = 1.5$.

$$U_{\text{сЕмак}} \geq U_{dc} \cdot K_U = 2000 \cdot 1.5 = 3000 \text{ В}$$

Найближчий стандартний клас напруги промислових IGBT-модулів: 3300 В.

Амплітудне значення максимального вихідного струму:

$$I_{\text{пик}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{мак}} = 1,41 \cdot 690 = 973 \text{ А}$$

Для надійної роботи транзистора з урахуванням пускових струмів, перевантажень і теплового режиму береться запас по струму $K_i = 1.5 \dots 2.0$. Візьмемо $K_i = 1.5$:

$$I_{\text{сном}} \geq I_{\text{пик}} \cdot 1,5 = 973 \cdot 1,5 = 1460 \text{ А}$$

Найближчий стандартний номінал струму для модулів напругою 3300 В - 1500 А. Вибираємо для інвертора: IGBT-модуль FZ1500R33HL3 (Infineon) або аналог (3300 В, 1500 А). Буде потрібно 6 таких модулів (по 2 на кожну з 3 фаз).

Розрахунок ланки постійного струму. У системах з однофазним (двохнапівперіодним) 4-квадрантним випрямлячем головне завдання конденсатора — згладжувати пульсації потужності подвоєної частоти мережі (100 Гц при мережі 50 Гц), тому що однофазна мережа віддає потужність імпульсами.

Прийmemo ККД інвертора і двигуна $\eta \approx 0.95$:

					ЕТФ. КНУ.РБ.Г3.26.250-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

$$P_{dc} = \frac{P_{НОМ}}{\eta} = \frac{1.2}{0.95} = 1.26 \text{ МВт}$$

Енергія пульсацій залежить від частоти мережі $f = 50$ Гц. Задамося припустимою амплітудою пульсацій напруги в ланці постійного струму ($U_{dc} = 100$ В (близько 5% від номіналу)). Формула для розрахунків ємності при однофазному мостовому випрямленні:

$$C = \frac{P_{dc}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot P_{dc} \cdot \Delta P_{dc}} = \frac{1260000}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 2000 \cdot 100} \approx 20 \text{ мкФ}$$

Робоча напруга конденсатора повинна бути не менш $2000 \text{ В} + 10\% = 2200 \text{ В}$.

Вибираємо для ланки постійного струму батарею плівкових конденсаторів (типу Filmcapacitors), застосовуваних у тязі, тому що електролітичні не справляться з такими струмами й напругами. Наприклад, використаємо збірку з 10 паралельних конденсаторів типу TDK/ EPCOSB25620B1617K101 (2 мФ, 2800 В кожний).

Розрахунки вхідного 4-квадрантного перетворювача (активного випрямляча). Двофазний (однофазний мостовий/Н-міст) 4-квадрантний перетворювач живиться від обмотки трансформатора. Він працює в режимі підвищувального (Boost) перетворювача, щоб підтримувати $U_{dc} = 2000 \text{ В}$.

Для нормальної роботи 4-квадрантного перетворювача напруга вторинної обмотки трансформатора $U_{вх}$ повинна бути приблизно в 1.5 - 1.7 рази менше U_{dc} . Приймаємо відому величину для вторинної обмотки трансформатора $U_{вх} = 1500 \text{ В}$.

Діючий струм на вході (при $\cos\varphi \sim 1$):

$$I_{ВХ} = \frac{P_{dc}}{U_{ВХ}} = \frac{1260000}{1500} = 840 \text{ А}$$

Транзистори 4-квадрантного перетворювача комутують ту ж саму напругу ланки постійного струму (2000 В).

$$U_{CE\max} \geq U_{dc} \cdot K_U = 2000 \cdot 1.5 = 3000 \text{ В}$$

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Вибираємо транзистор класу напруги 3300 В. Амплітудне значення вхідного струму:

$$I_{ВХПИК} = \sqrt{2} \cdot I_{ВХ} = 1,41 \cdot 840 \approx 1200A$$

З урахуванням запасу $K_i = 1.5$ для забезпечення стійкості до кидків струму в контактній мережі:

$$I_{СНОМ} \geq 1200 \cdot 1,5 = 1800A$$

Найближчий стандартний номінал струму для модулів напругою 3300 В: 2000 А. Вибираємо остаточно для 4-квадрантного перетворювача IGBT-модуль FZ2000R33HE4 (Infineon) або аналог (3300 В, 2400 А). Буде потрібно 4 таких модуля (для Н-мосту).

Вибір тягового трансформатора. Для живлення 6 ТЕД необхідно мати однофазний тяговий трансформатор с потужністю, яка з запасом перевищує сумарну потужність трьох візків (двух на моторісі та одної в передньому причіпного вагоні), тобто:

$$Стр_{ном} = 1.2 \cdot (6 \cdot Р_{тед} + Р_{вп}) = 1.2 \cdot (6 \cdot 1200 + 400) \approx 9600 \text{ кВт},$$

Де $Р_{вп}$ -потужність власних потреб потягу.

Трансформатор повинен мати первинну напругу 25 кВ та вторинну 1.5 кВ, мати обмотки для живлення 6 двигунів та для власних потреб

Розрахунок параметрів інвертору. Усі 6 інверторів (ПЧ-АД) будуть підключатися паралельно до вузла за опорами вторинної обмотки (R_2 і X_2). На кожний з 6 приводів у середньому буде приходити по $9.6 \text{ МВА} / 6 = 1.6 \text{ МВА}$ потужності трансформатора. Тому необхідно правильно сформувати еквівалентне джерело живлення.

Оскільки трансформатор живить відразу 6 приводів, струм навантаження, протікаючи через обмотки трансформатора, в 6 раз більше струму одного привода. Отже, спадання напруги на внутрішньому опорі трансформатора буде визначатися сумарним струмом.

Щоб один досліджуваний привод "відчув" те ж просідання напруги, яке створюють усі 6 працюючих приводів разом, внутрішній опір еквівалентного

					ЕТФ. КНУ.РБ.Г3.26.250-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

джерела необхідно збільшити пропорційно кількості приводів (тобто помножити на 6).

Розрахунки повного опору трансформатора (на стороні 1.5 кВ). Для початку складемо опори первинної (наведеної) і вторинної обмоток з попереднього розрахунків, щоб отримати повний опір короткого замикання трансформатора:

Повний активний опір:

$$R_{k2} = R'_1 + R_2 = 0.977 + 0.977 = 1.954 \text{ мом}$$

Повний індуктивний опір:

$$X_{k2} = X'_1 + X_2 = 11.68 + 11.68 = 23.36 \text{ мом}$$

Параметри еквівалентного джерела для одного привода. Множимо отримані значення на 6. Еквівалентний активний опір:

$$R_{\text{ЕКВ}} = 6 \cdot R_{k2} = 6 \cdot 1.954 = 11.72 \text{ мОм}$$

Еквівалентний індуктивний опір:

$$X_{\text{ЕКВ}} = 6 \cdot X_{k2} = 6 \cdot 23.36 = 140.16 \text{ мОм}$$

Еквівалентна індуктивність джерела:

$$L_{\text{ЕКВ}} = \frac{X_{\text{ЕКВ}}}{\omega} = \frac{0.14016}{314.16} = 0.446 \text{ мГн}$$

Розрахована нами еквівалентна індуктивність трансформатора $L_{\text{eq}} = 0.446 \text{ мГн}$ фізично знаходиться між ідеальним джерелом напруги (контактною мережею) і входом вашого перетворювача. Вона буде виступати природнім фільтром і брати участь у процесі накопичення енергії для підвищення напруги.

Вибір індуктивності мережевого дроселя. Звичайно індуктивності розсіювання самого трансформатора (L_{eq}) недостатньо для якісного згладжування ШІМ-пульсацій струму і стабільної роботи регуляторів. Тому на вході 4-квадрантного конвертера завжди встановлюють додатковий мережевий дросель (у реальності він може бути інтегрований у бак трансформатора або стояти окремо).

Сумарна індуктивність на стороні перемінного струму, яку "бачить" система керування, рівна:

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$L_{\Sigma} = L_{\text{ЕКВ}} + L_{\text{ДРОССЕЛЯ}}$$

При розрахунках регуляторів струму 4-квадрантного конвертера потрібно використовувати саме сумарне значення L_{Σ} .

Розрахунок напруги ланки постійного струму (U_d). Оскільки 4-квадрантний конвертер являється підвищувальним перетворювачем (Boost Converter), напруга в ланці постійного струму (на конденсаторі) обов'язково повинна бути вище амплітудного значення вхідної напруги з деяким запасом на просідання й динаміку регулювання.

Амплітуда напруги вторинної обмотки: $1500 \cdot \sqrt{2} = 2121$ В. Мінімально допустима напруга в ланці постійного струму повинна бути приблизно на 15-20% вище амплітудної. Рекомендоване значення (уставка) для контуру підтримки напруги: 2600 В — 3000 В.

Якщо задати напругу U_d нижче 2121 В, зустрічні діоди IGBT-модулів відкриваються як звичайний некерований міст, і конвертер втрачить керованість.

1.5 Розрахунок параметрів схеми заміщення, розрахунок механічних і енергетичних характеристик

Розрахунок параметрів схеми заміщення тягового двигуна.

Двигуни електропоїздів TGVPOS (і загалом сучасного високошвидкісного рухомого складу) керуються тяговими інверторами.

Відразу треба зробити уточнення: розрахувати абсолютно точні параметри Т-подібної схеми заміщення (опори та індуктивності) лише за паспортними макропараметрами неможливо — для цього потрібні результати заводських дослідів холостого ходу та короткого замикання. Крім того, вказаний нами «пусковий струм» 690 Aeff) — це не струм короткого замикання при прямому пуску від мережі, а максимальний струм, який повинен забезпечити тяговий інвертор (ПЧ) для досягнення пускового моменту.

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проте, використовуючи класичну теорію електричних машин та типові допущення для тягових двигунів потужністю понад 1 МВт, можна аналітично оцінити ці параметри з високою інженерною точністю.

Для початку визначимо кількість пар полюсів (p) та номінальне ковзання (s_{nom}). Синхронна швидкість обертання магнітного поля при частоті 192 Hz:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 192}{3} = 3840 \text{ об/мин}$$

Тоді ковзання.

$$s_{nom} = \frac{n_s - n_{nom}}{n_s} = \frac{3840 - 3800}{3840} \approx 0.01042 \text{ (або 1.04\%)}$$

$$s_{HOM} = \frac{n_s - n_{HOM}}{n_s} = \frac{3840 - 3800}{3840} = 0,01042$$

Кругова частота струму статора:

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 = 2 \cdot 3.14 \cdot 192 = 1206.4 \text{ rad/s}$$

Номінальний крутний момент:

$$M_{HOM} = \frac{P_{HOM}}{\omega_{HOM}} = \frac{1200000}{\omega_{HOM}} = 3015 \text{ Нм}$$

$$\text{де } \omega_{HOM} = \frac{n_{HOM} \cdot \pi}{30} = \frac{3800 \cdot 3.14}{30} = 397,7 \text{ рад/с}$$

(Як бачимо, пусковий бустерний момент 7690 Nm перевищує номінальний у 2.55 рази, що є типовим для тяги).

Оскільки коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$) не вказаний, приймемо типове для таких двигунів значення: $\cos\varphi \approx 0.88$.

Електрична (споживана) потужність з урахуванням ККД 95%:

Схему з'єднання обмоток приймемо «зірка» (Y), тоді фазна напруга:

$$U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = 802.5 \text{ В}$$

$$P_1 = \frac{P_{HOM}}{\eta} = \frac{1200}{0.95} = 1263,2 \text{ кВт}$$

$$I_{HOM} = \frac{P_1}{3 \cdot U_\phi \cdot \cos\varphi} = \frac{1263200}{3 \cdot 802.5 \cdot 0.88} = 596 \text{ А}$$

596 А — це робочий струм, а задані 690 А — це ліміт інвертора під час розгону.

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок параметрів схеми заміщення. Використовуємо наступну схему заміщення АД:

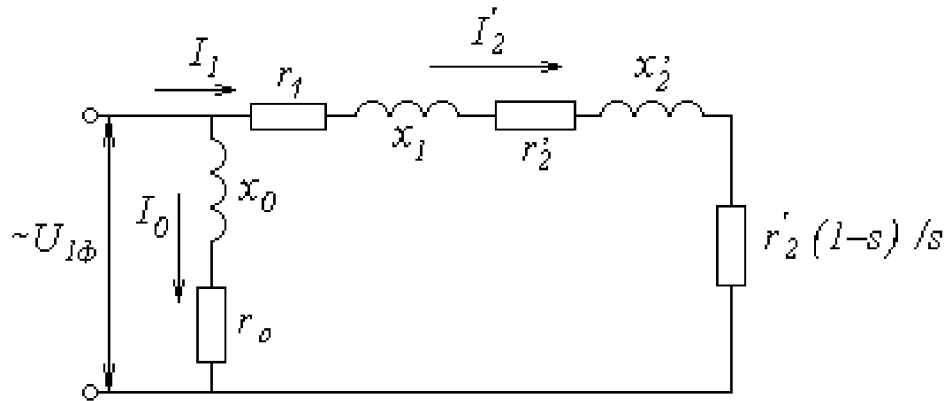


Рис. 1.12. Схема заміщення АД

Втрати в міді ротора приблизно пропорційні ковзанню від електромагнітної потужності:

$$P_{M2} = s_{НОМ} \cdot \frac{P_{ПОТ}}{1 - s_{НОМ}} = 0,01042 \cdot \frac{1200000}{1 - 0,011042} = 12,6 \text{ кВт}$$

Приведений струм ротора I_r приблизно дорівнює активній складовій струму статора ($I_{ПОТ} \cdot \cos(\varphi) = 524 \text{ А}$). Звідси приведений активний опір ротора:

$$R'_r = \frac{P_{M2}}{3 \cdot (I_r)^2} = \frac{12600}{3 \cdot (524)^2} = 0.0153 \text{ Ом}$$

Для тягових двигунів опір статора зазвичай трохи менший за опір ротора. Прийmemo $R_s \sim 0.0140 \text{ Ом}$

Індуктивності розсіяння (L_{as} , L'_{ar}). Щоб двигун міг видати бустерний момент 7690 Nm і не «перекинутися», його критичний (максимальний) момент T_{max} має бути трохи більшим, наприклад, 8500 Nm .

$$X_k \approx \frac{3 \cdot p \cdot U_{\phi}^2}{2 \cdot \omega_1 \cdot M_{MAX}} = \frac{3 \cdot 3 \cdot 802.5^2}{2 \cdot 1206.4 \cdot 8500} = 0.282 \text{ Ом}$$

Використовуючи спрощену формулу Клосса:

Розділимо опір розсіяння порівну між статором і ротором ($X_s = X'_r \approx 0.141 \text{ Ом}$).

Тоді індуктивності розсіяння:

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

$$L_{\sigma s} = L'_{\sigma r} = \frac{X_s}{\omega_1} = \frac{0.141}{1206.4} = 0.117 \text{ мГн}$$

Реактивна складова струму статора створює магнітний потік. Струм намагнічування:

$$I_\mu \approx I_{\text{НОМ}} \cdot \sin(\arccos(0.88)) = 596 \cdot 0.475 = 283 \text{ А}$$

Опір контуру намагнічування:

$$X_m = \frac{U_\phi}{I_\mu} = \frac{802.5}{283} = 2.83 \text{ Ом}$$

Головна індуктивність (намагнічування):

$$L_m = \frac{X_m}{\omega_1} = \frac{2.83}{1206.4} = 2.34 \text{ мГн}$$

Таблиця № 1.4 Розраховані параметри

Параметр схеми заміщення	Позначення	Значення
Активний опір статора	R_s	0.014 Ом
Приведений активний опір ротора	R'_r	0.0153 Ом
Індуктивність розсіювання статора	$L_{\sigma s}$	0.117 мГн
Приведена індуктивність розсіювання ротора	$L'_{\sigma r}$	0.117 мГн
Індуктивність намагнічування (головна)	L_m	2.34 мГн

Розрахунки статичних характеристик **привода** при **частотному керуванні**

Напруга між фазами при 192 Гц становить $U_{\text{НОМ}} = 1390 \text{ В}$. Тоді фазна напруга:

$$U_\phi = \frac{1390}{\sqrt{3}} \approx 802.5 \text{ В}$$

Для розрахунків моменту при живленні від перетворювача частоти (ПЧ) звичайно використовується закон частотного керування $U/f = \text{const}$ (до виходу на обмеження напруги). Залежність фазної напруги від частоти:

$$U_1(f) = U_1 \cdot \frac{f}{192}$$

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Індуктивні опори залежать від частоти живлення:

$$X_s(f) = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{\sigma s}; X'_r(f) = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L'_r; X_m(f) = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_m.$$

Для побудови залежності електромагнітного моменту M від ковзання s застосовується схема еквівалентного генератора (Тевенина). Напруга і опори еквівалентного генератора:

$$U_{ekv} \approx U_1(f) \cdot \frac{X_m(f)}{X_s(f) + X_m(f)}; X_{ekv} \approx X_s(f); R_{ekv} \approx R_s \cdot \left(\frac{X_m(f)}{X_s(f) + X_m(f)} \right)^2.$$

Синхронна механічна кутова швидкість:

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}.$$

Розрахункове вираження електромагнітного моменту АД при частотному керуванні (закон $U/f = \text{const}$):

$$M(s) = \frac{2 \cdot p}{\omega_s} \cdot \frac{U_{ekv}^2 \cdot \frac{R'_r}{s}}{\left(R_{ekv} + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + (X_{ekv} + X'_r)^2}$$

Змінюючи ковзання s від 1 (пуск) до 0 (синхронний хід), отримаємо графіки статичних механічних характеристик для кожної заданої частоти.

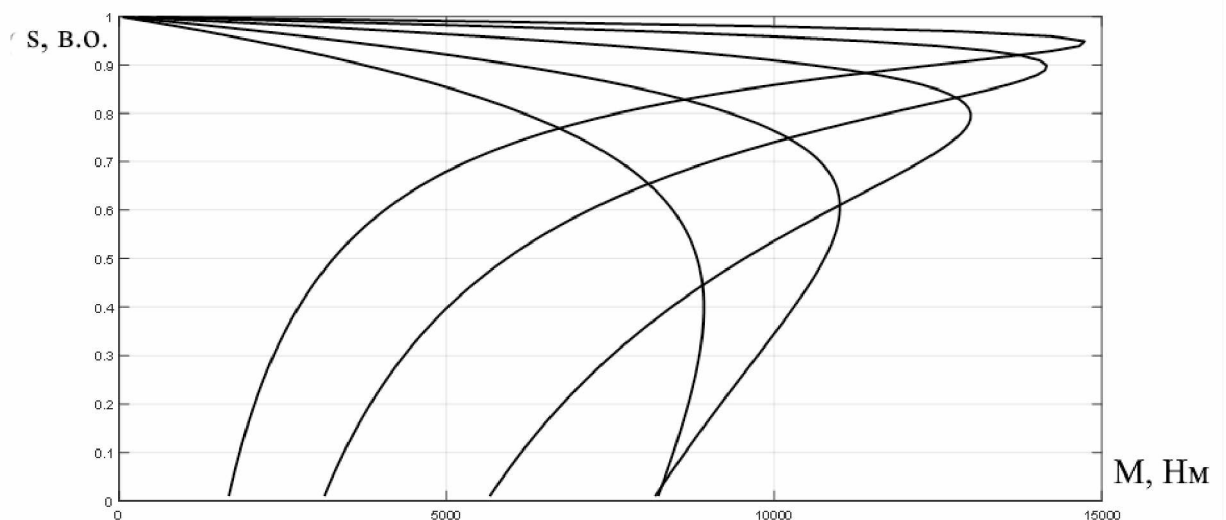


Рис. 1.13. Залежність електромагнітного моменту від ковзання при різних частотах живлення

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

На низьких частотах, наприклад 15-25 Гц, у реальній системі керування застосовується вольтододавання (IR-компенсація.) для подолання спадання напруги на активному опорі статора R_s , що трохи збільшить фактичне значення U_1 у порівнянні із чисто лінійним законом.

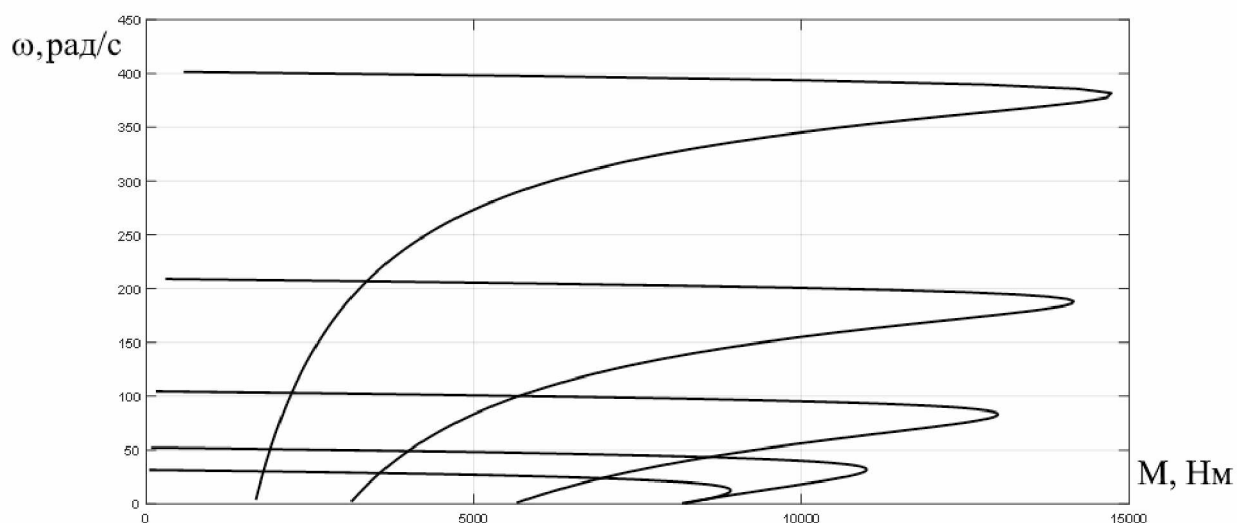


Рис. 1.14. Залежність електромагнітного моменту від частоти обертання при різних частотах живлення

Розрахунок швидкісних характеристик при частотному керуванні

Для побудови залежностей струму статора від швидкості обертання асинхронного тягового двигуна для фіксованих частот (15, 25, 50, 100, 192 Гц) також скористаємося Г-образною схемою заміщення двигуна (рис. 1.12) і класичними законами теоретичної електротехніки.

Повний комплексний опір фази асинхронного двигуна з боку статора виражається через параметри Т-образної схеми заміщення:

$$Z_{вх} = R_s + jX_s + Z_p$$

де Z_p - комплексний опір паралельної гілки намагнічування й ланцюгу ротора:

$$Z_p = \frac{jX_m \cdot (R'_r/s + jX'_r)}{R'_r/s + j(X_m + X'_r)}$$

Для розділення речовинної й уявної частин $Z_p = R_p + jx_p$ помножимо чисельник і знаменник на комплексно-сполучене число знаменника. Отримаємо формули для еквівалентних опорів:

$$R_p = \frac{X_m^2(f) \cdot R'_r/s}{(R'_r/s)^2 + (X_m(f) + X'_r(f))^2}$$

$$X_p = \frac{X(f) \cdot ((R'_r/s)^2 + X'_r(f) \cdot (X_m(f) + X'_r(f)))}{(R'_r/s)^2 + (X_m(f) + X'_r(f))^2}$$

Тоді сумарні активний й реактивний вхідні опори одної фази двигуна складуть:

$$R_{BX} = R_s + R_p$$

$$X_{BX} = X_s + X_p$$

Модуль повного вхідного опору рівний:

$$|Z_{BX}| = \sqrt{R_{BX}^2 + X_{BX}^2}$$

Діюче значення струму статора залежно від ковзання s :

$$I_s(f) = \frac{U_1(f)}{|Z_{BX}|}$$

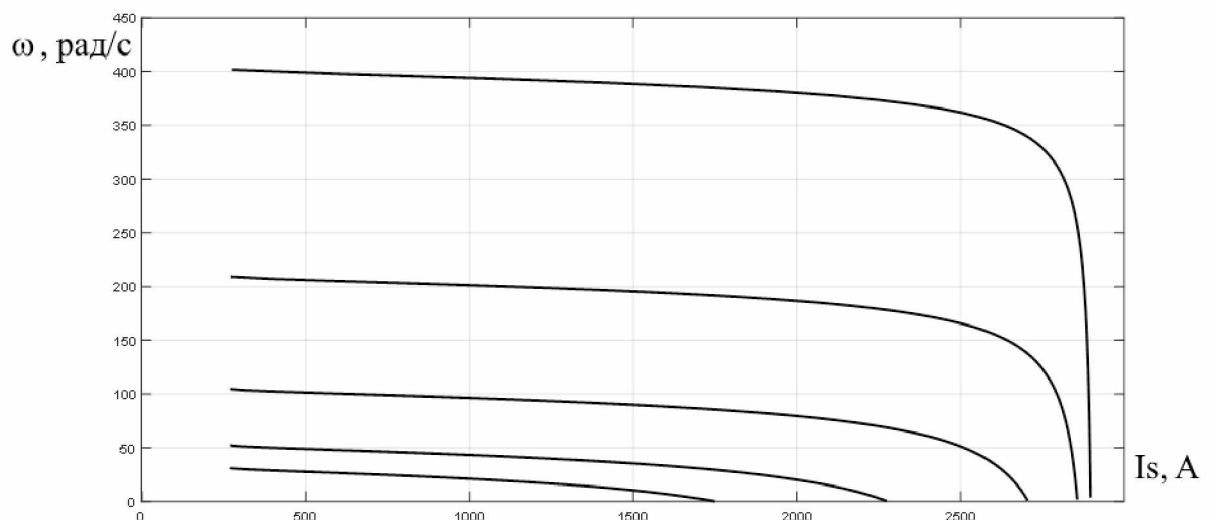


Рис.1.15. Залежність струму статора від швидкості обертання при різних частотах живлення

Аналіз графіків:

При фіксованій частоті інвертора в точці пуску струм статора має максимальне значення (трохи менше 2000 А). У міру розгону ротора й зменшення ковзання, струм плавно знижується.

Поблизу синхронної швидкості крива струму починає різко падати вниз.

Точно в точці синхронної швидкості струм статора досягає свого локального мінімуму, рівного струму холостого ходу (близько 271 А), тому що в цей момент у роторі не наводяться ЕРС і струм ротора дорівнює нулю.

Розрахунок енергетичних характеристик АД при частотному керуванні

Для визначення ККД (η) і коефіцієнта потужності ($\cos\phi$) також використовується Т-образна схема заміщення асинхронного двигуна.

Розрахунок коефіцієнта потужності привода. Для детального розрахунків енергетичних показників тягового електропривода використовується класична Т-образна схема заміщення асинхронного двигуна й баланс потужностей у всіх елементах системи (з урахуванням трансформатора й перетворювачів частоти).

Коефіцієнт потужності ($\cos\phi$) визначається зсувом фаз між напругою й струмом, який дорівнює аргументу комплексного опору Z_{BX} :

$$\cos = \frac{R_{BX}}{\sqrt{R_{BX}^2 + X_{BX}^2}}$$

При номінальному навантаженні двигун демонструє оптимальні показники коефіцієнта потужності (близько 0.82-0.85), що являється типовим для тягових асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, і зі зниженням частоти зростає за інших рівних умов.

При низьких навантаженнях (25%) $\cos\phi$ різко падає. Це пов'язане з тим, що струм намагнічування залишається практично незмінним при постійному

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

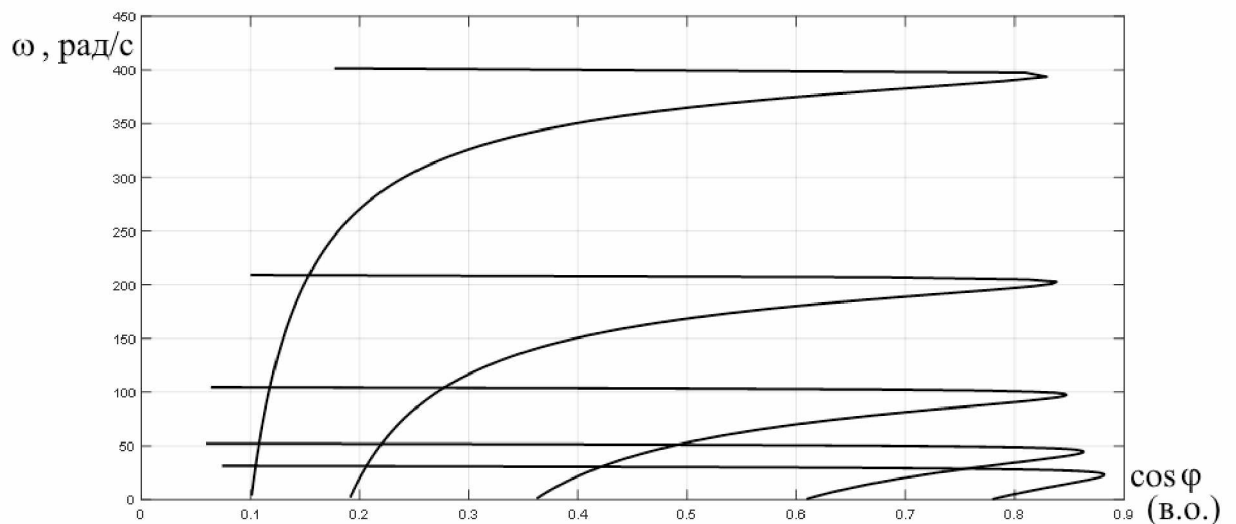


Рис.1.16. Залежність коефіцієнта потужності від частоти обертання при різних частотах живлення

співвідношенні U/f , у той час як активна складова струму ротора знижується.

Розрахунок коефіцієнта корисної дії приводу. Складаємо баланс потужностей у приводі. Споживана двигуном активна потужність:

$$P_{\text{вх}} = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_s \cdot \cos \varphi = 3 \cdot I_s^2 \cdot R_{\text{екв}}$$

Втрати в міді статора:

$$\Delta P_{\text{м1}} = 3 \cdot I_s^2 \cdot R_s$$

Втрати в міді ротора:

$$\Delta P_{\text{м2}} = 3 \cdot I_r'^2 \cdot R_r'$$

де струм ротора:

$$I_r' = I_s \cdot \frac{X_m}{\sqrt{\left(\frac{R_r'}{s}\right)^2 + (R_r' + X_r')^2}}$$

Електромагнітна потужність:

$$P_{\text{ем}} = 3 \cdot I_r'^2 \cdot \frac{R_r'}{s}$$

Корисна механічна потужність на **валу**:

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{ем}} \cdot (1 - s) - \Delta P_{\text{ст}} - \Delta P_{\text{г}}$$

Втрати в сталі складають собою суму втрат на гістерезис $P_{\text{г}}$ і втрат на вихрові струми:

$$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{г}} + \Delta P_{\text{вт}},$$

де $\Delta P_{\text{г}} = k_{\text{г}} \cdot f \cdot B_{\text{мах}}^2$, у номінальному режимі для тягових асинхронних машин мегаватного діапазону становлять 0.8% – 1.5% від повної потужності (9 кВт); $\Delta P_{\text{вт}} = k_{\text{вт}} \cdot f^2 \cdot B_{\text{мах}}^2$, у номінальному режимі становить 0.5% – 1.0% від повної потужності (6 кВт)

Враховуючи, що $B_{\text{мах}} = 1,6$ Тл, знайдемо, що для нашого двигуна:

$$\Delta P_{\text{г}} = 46,875 \cdot f; \quad \Delta P_{\text{вт}} = 0,163 \cdot f^2.$$

ККД самого двигуна розраховується в такий спосіб:

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{мех}}}{P_1} = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{м1}} + \Delta P_{\text{м2}} + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}}}$$

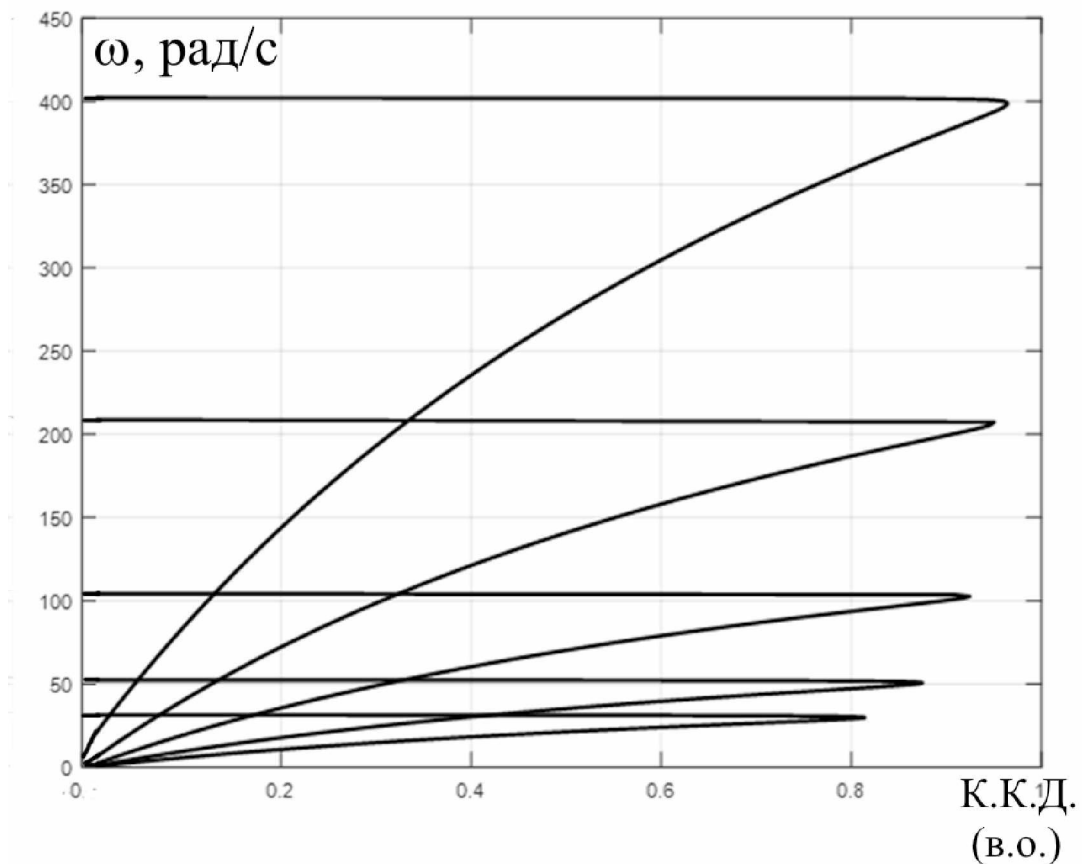


Рис. 1.17. Залежність ККД від швидкості обертання при різних частотах живлення

Зниження ККД на низьких частотах (особливо при 15-25 Гц) обумовлене тим, що спадання напруги на активному опорі статора R_s (яке рівно 14 мом) стає порівнянним з підводимою фазною напругою, що збільшує частку джоулевих втрат.

					ЕТФ. КНУ.РБ.Г3.26.250-01	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. Обґрунтування і розробка системи керування електроприводом

2.1. Обґрунтування і вибір структури системи керування електроприводом

Для тягового частотно-регульованого асинхронного електропривода (АЕП), який працює в тяжких умовах (широкий діапазон швидкостей, часті пуски й гальмування навантаження, що змінюється, необхідність обмеження моменту за умовами зчеплення колеса з рейкою або шляхом), вибір системи автоматичного керування (САК) являється критично важливим.

На сьогоднішній день у частотному приводі застосовуються три основні концепції керування. Нижче наведений їхній порівняльний аналіз.

1. Скалярне керування (за законом $U/f = \text{const}$)

Принцип полягає в одночасній і пропорційній зміні амплітуди й частоти живлячої напруги статора для підтримки сталості магнітного потоку в номінальній зоні.

Переваги:

Простота реалізації й налаштування алгоритмів.

Низькі вимоги до обчислювальної потужності мікроконтролера.

Можливість керування без застосування датчиків (розімкнутого) для простих механізмів.

Недоліки:

Низька швидкодія (перехідні процеси протікають повільно).

Відсутність прямого контролю над електромагнітним моментом двигуна.

Погані пускові характеристики й неможливість точної підтримки моменту на швидкостях коло нуля.

Скалярне керування не підходить для сучасних тягових приводів, тому що не забезпечує необхідної динаміки, захисту від перевантажень по струму в перехідних режимах і точного дозування тягового зусилля.

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01			
Змн.	Арк.	№ документа.	Підпис	Дат				
Розробив.	Баранець Д.С.				РОЗДІЛ 2. Обґрунтування та розробка системи керування електроприводом.	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірів.	Сьомочкін А.Б.						40	
Рецензія.						КНУ Каф. ЕІ ЕЕМ-23ск		
Н. Контр.								
Затверд..	Сінчук О.М.							

2. Пряме керування моментом (DTC - Directtorquecontrol)

У системах DTC електромагнітний момент і магнітний потік статора регулюються прямо за допомогою релейних (гістерезисних) регуляторів, які вибирають оптимальний вектор напруги інвертора без використання ШІМ у її класичному розумінні.

Переваги:

Найвища швидкодія контуру моменту (відгук за мілісекунди).

Відсутність координатних перетворень (Парка-Горєва) і регуляторів струму, що спрощує математичну модель.

Менша чутливість до зміни параметрів ротора.

Недоліки:

Високі пульсації струму й електромагнітного моменту, особливо на низьких швидкостях, що негативно позначається на механіці тягової передачі.

Непостійна частота комутації силових ключів інвертора, що ускладнює розрахунки електромагнітної сумісності і теплових режимів.

Складність роботи на колонульових швидкостях (проблеми з оцінкою потоку статора).

Незважаючи на прекрасну динаміку, пульсації моменту й непостійна частота комутації роблять класичний DTC менш придатним для тягових механізмів, де важлива плавність ходу й надійність інвертора.

3. Векторне керування (FOC - Fieldorientedcontrol)

Векторне керування розділяє вектор струму статора на дві ортогональні складові: складову що намагнічує (що створює магнітний потік) і моментоутворюючу складову (аналог струму якоря двигуна постійного струму). Це дозволяє управляти асинхронним двигуном так само легко й точно, як і машиною постійного струму незалежного збудження.

Переваги:

Висока точність і широкий діапазон регулювання швидкості і моменту.

Плавна робота у всьому діапазоні частот, включаючи нульову швидкість.

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250.01	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Формування оптимальних перехідних процесів.

Векторне керування — це математичний апарат. Але структурно воно реалізується саме у вигляді системи підкореного регулювання (СПР) координат.

Система підлеглого регулювання (СПР) будується по каскадному принципу: зовнішній контур (регулятор швидкості) формує завдання для внутрішнього контуру (регулятора струму/моменту). Для тягового асинхронного приводу з векторним керуванням саме ця архітектура являється абсолютним стандартом по наступних причинах:

Пряме й миттєве обмеження струму (і моменту). У тязі критично важливо захистити інвертор від струмових перевантажень і попередити боксування/юз (втрату зчеплення). У СПР внутрішній контур струму реагує на зміни за мікросекунди. Якщо зовнішній регулятор швидкості вимагає занадто великого прискорення, завдання на струм просто "зрізується" на заданому безпечному рівні. Двигун буде розганяти з максимально припустимим, але безпечним моментом.

Ідеальна інтеграція систем антибоксовання. При виникненні прослизання колеса система верхнього рівня (протибоксочний захист) може миттєво знизити завдання у внутрішньому контурі струму, відновлюючи зчеплення без повної зупинки алгоритмів регулятора швидкості.

Розподіл завдань (декомпозиція керування). Внутрішній контур (струму): Відповідає за електромагнітні процеси, компенсацію перехресних зв'язків двигуна й швидке формування вектора статорної напруги. Настроюється на технічний оптимум.

Зовнішній контур (швидкості). Відповідає за електромеханічні процеси, плавність ходу й підтримку заданої швидкості руху потяга/електромобіля. Настроюється на симетричний оптимум.

Зниження пульсацій і акустичного шуму.

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250.01	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На відміну від DTC, СПР із контурами струму працює через блок просторово-векторної ШІМ (SVPWM). Це забезпечує строго фіксовану частоту комутації ключів інвертора, мінімізацію гармонік струму, зниження нагрівання двигуна й плавну передачу моменту на редуктор.

Порівнявши скалярне керування (занадто повільне й неточне) і пряме керування моментом (занадто "жорстке" і пульсуюче), можна впевнено стверджувати: математичний апарат векторного керування, структурно реалізований як система підлеглого регулювання із внутрішніми контурами струму й зовнішнім контуром швидкості, являється оптимальним і безальтернативним рішенням для сучасного тягового асинхронного електропривода. Вона забезпечує ідеальний баланс між найвищою швидкістю моменту, апаратною безпекою ключів інвертора і абсолютною плавністю регулювання швидкості.

Функціональна схема ФОС - регулювання представлена на рис. 2.1. Система має 4 контури регулювання –потокосцеплення ротора, швидкості двигуна, а струму статора в проекціях x і y . Система незалежно керує потокосцепленням ротора і швидкістю привода. Завдання потокосцепленням формується в обчислювальному пристрої ОП, де знаходяться математична модель АД з реальними параметрами схеми заміщення.

На рис. 2.1 параметри двигуна вводяться у вигляді сигналів X_{BH} на вході ОП. Завдання швидкості йде на задатчик інтенсивності ЗІ, він обмежує темп зміни швидкості згідно до технологічних обмежень.

Вимірювання сигналів зворотних зв'язків провадиться за допомогою датчиків швидкості (ТГ), струму (ДС) та потоку (ДП).

Датчик ДП вимірює за допомогою датчиків Холу миттєві значення потокосцеплень в вісях α , β прямокутної системи координат, що жорстко пов'язана з нерухомим статором двигуна, причому вісь α співпадає з віссю симетрії статорної обмотки фази А.

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250.01	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

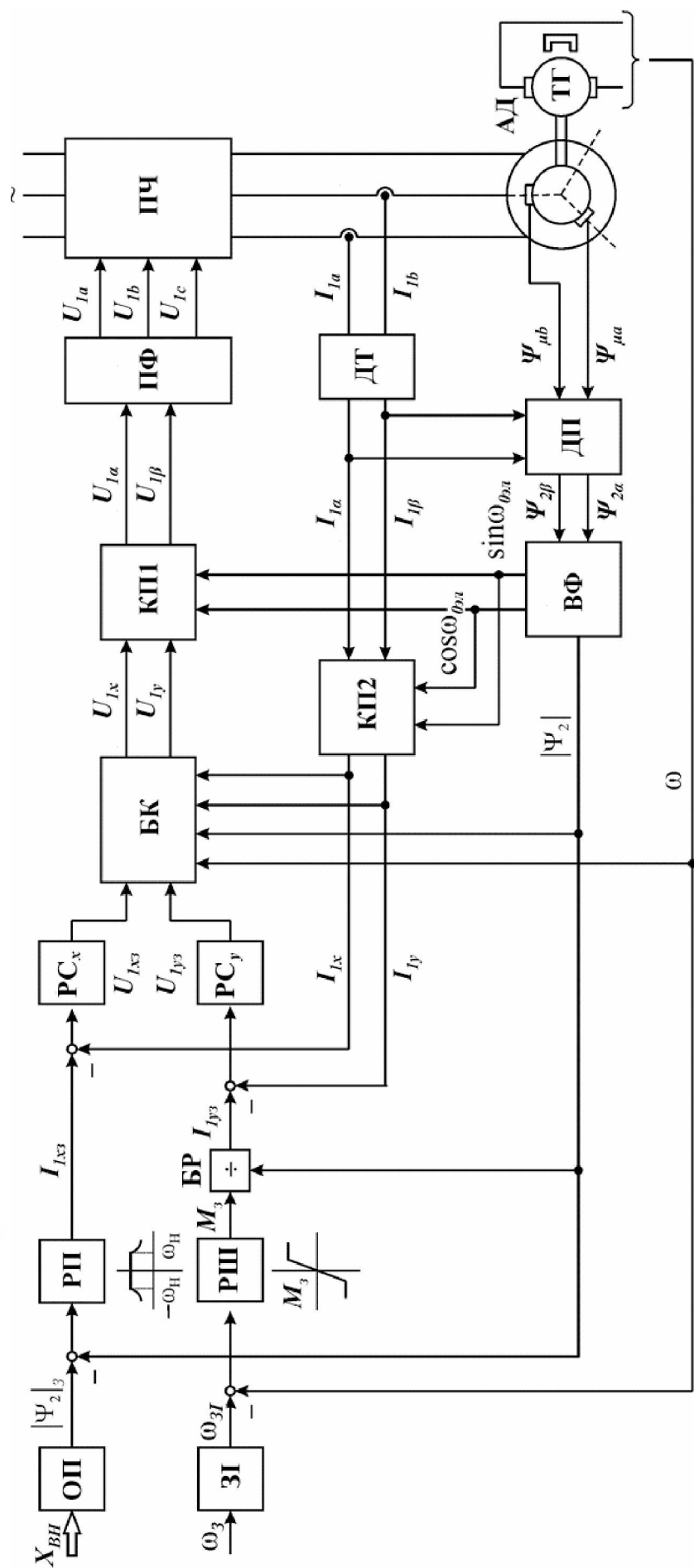


Рис. 2.1. Функціональна схема системи підлеглого регулювання

Зазначені складові визначаються наступними вираженнями:

$$\Psi_{\mu\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2}}\Psi_{\mu a}; \quad \Psi_{\mu\beta} = \sqrt{2}\left(\frac{1}{2}\Psi_{\mu a} + \Psi_{\mu b}\right).$$

Також ДП здійснює обчислення проекцій потокозчеплення ротора згідно до виражень:

$$\Psi_{2\alpha} = \frac{L'_2}{L_{12}}\Psi_{\mu\alpha} - (L'_2 - L_{12})I_{1\alpha}; \quad \Psi_{2\beta} = \frac{L'_2}{L_{12}}\Psi_{\mu\beta} - (L'_2 - L_{12})I_{1\beta}.$$

Датчик струму визначає миттєві значення струмів фаз статора I_{1a} , I_{1b} і відразу ж перетворить їх у ортогональну систему перемінних $I_{1\alpha}$, $I_{1\beta}$.

Подальше перетворення перемінних $I_{1\alpha}$, $I_{1\beta}$ у перемінні ортогональної системи координат x , y , що зв'язана з потокозчепленням ротора, здійснюється за допомогою вектора-фільтра ВФ і координатного перетворювача КП1. Вектор-фільтр здійснює наступне математичне перетворення

$$|\Psi_2| = \sqrt{\Psi_{2\alpha}^2 + \Psi_{2\beta}^2}$$

а також взяття наступних тригонометричних функцій:

$$\cos \varphi_{0эл} = \Psi_{2\alpha} / |\Psi_2|; \quad \sin \varphi_{0эл} = \Psi_{2\beta} / |\Psi_2|,$$

де $\varphi_{0эл}$ – кут повороту ротора відносно статора. Перетворювач КП2 повертає вектор потоку, що намагнічує, на $\omega_{0эл}$ кут.

Тому що вектор потокозчеплення ротора в ортогональній системі x , y поєднаний с віссю x , тобто $|\Psi_2| = \Psi_{2x}$, $\Psi_{2y} = 0$, звідси проекція струму I_{1x} , яка визначає магнітний потік двигуна, аналогічно двигуну постійного струму діє як струм в ланцюзі обмотки збудження. З іншого боку, проекція струму I_{1y} аналогічно якірному струму в двигуні постійного струму, формує електромагнітний момент двигуна.

Величина електромагнітного моменту АД визначається сигналом виходу з регулятора швидкості РШ, де на вході порівнюються сигнали завдання швидкості з виходу ЗІ $\omega_{3и}$ і швидкості ω із ротору двигуна. Обмежуючі вихідний сигнал РШ, тим самим обмежуються максимальні значення

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250.01	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електромагнітного моменту АД. Для стабілізації електромагнітного моменту АД при зміні амплітуди потокозчеплення ротора сформований блок розподілу БР сигналу регулятора швидкості на $|\Psi_2|$. На виході БР формується сигнал завдання I_{1yz} проекції струму статора по осі y I_{1y} . Завдання I_{1xz} проекції струму статора по осі x I_{1x} визначається регулятором потоку РП, де на вході порівнюються сигнали завдання і потокозчеплення.

Сформовані сигнали I_{1xz} і I_{1yz} порівнюються з поточними проекціями струмів I_{1x} і I_{1y} на входах відповідних регуляторів струму РС_x і РС_y сигнали з яких формують завдання для проекцій напруг статора U_{1xz} і U_{1yz} .

Якщо в диференціальних рівняннях АД виконати компенсацію складових E_{1x} і E_{1y} , то без їхнього урахування, отримаємо подібно ДПС наступні вирази:

$$\begin{aligned} U_{1x}(p) &= R_{1\sigma}(1 + T_{1\sigma}p)I_{1x}(p); \\ U_{1y}(p) &= R_{1\sigma}(1 + T_{1\sigma}p)I_{1y}(p). \end{aligned}$$

На рис. 2.1 таку компенсацію здійснює блок БК, куди уводяться змінні I_{1x} , I_{1y} , $|\Psi_2|$, $\omega_{0эл}$, ω і де здійснюються необхідні функціональні перетворення.

Перетворення проекцій напруги статора U_{1x} , U_{1y} з БК у складові $U_{1\alpha}$, $U_{1\beta}$ в вісях α, β провадиться за допомогою блока координатних перетворень КП1 згідно до виразів:

$$U_{1\alpha} = U_{1x} \cos \varphi_{0эл} - U_{1y} \sin \varphi_{0эл}; \quad U_{1\beta} = U_{1x} \sin \varphi_{0эл} + U_{1y} \cos \varphi_{0эл}.$$

Перетворювач фаз ПФ формує, відповідно виразам:

$$U_{1a} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{1\alpha}; \quad U_{1b} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} U_{1\alpha} + U_{1\beta} \right); \quad U_{1c} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} U_{1\alpha} - U_{1\beta} \right)$$

синусоїдальні трифазні сигнали $U_{1\alpha}, U_{1\beta}, U_{1c}$, що визначають на перетворювачі частоти потрібні амплітуду і частоту напруг U_A, U_B, U_C для живлення АД.

Передаточна функція ПЧ по напрузі:

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

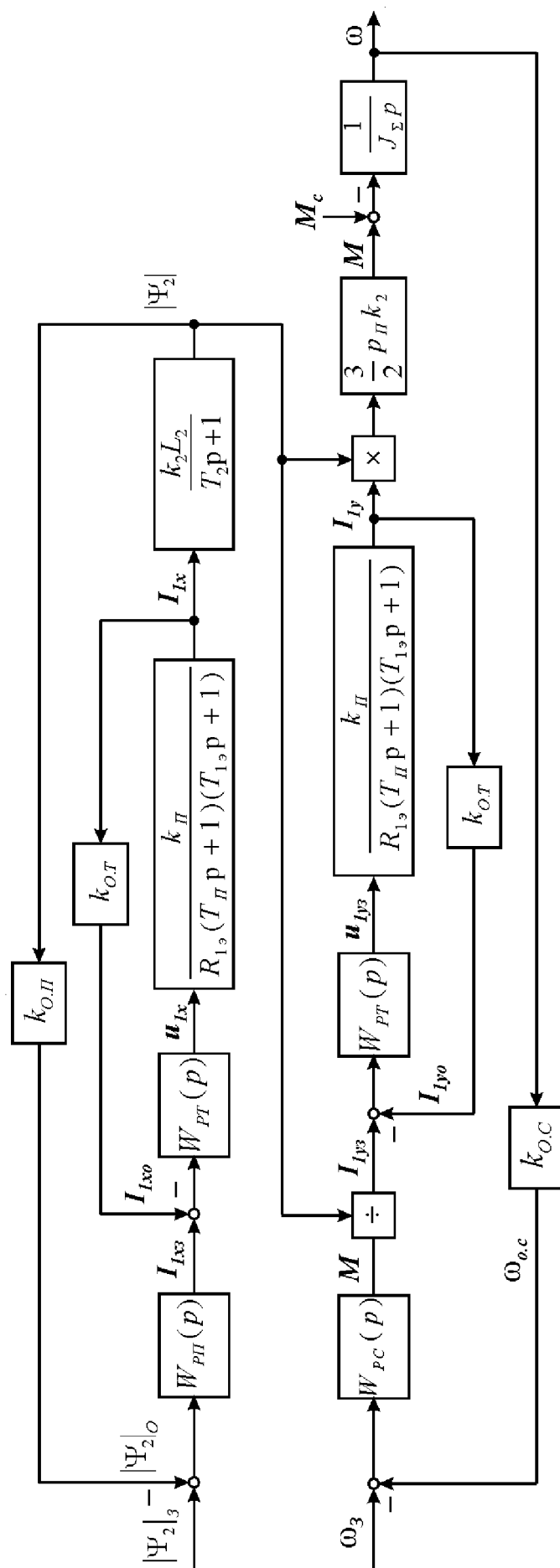


Рис. 2.2. Структурна схема ПЧ-АД з регулюванням по потокозчепленню ротора

$$W_{ПЧ}(p) = U_{1x}(p)/U_{1xz}(p) = U_{1y}(p)/U_{1yz}(p) = k_n/(T_n p + 1),$$

де k_n – коефіцієнт передачі між проекціями U_{1xz}, U_{1yz} керування ПЧ та проекціями вихідних напруг ПЧ U_{1x}, U_{1y}, T_n – еквівалентна постійна часу ланцюга керування перетворювачем.

Звідси передаточні функції між проекціями напруг U_{1xz}, U_{1yz} та струмів I_{1x}, I_{1y} :

$$W_{nx}(p) = \frac{I_{1x}(p)}{U_{1xz}(p)} = \frac{k_n}{T_n p + 1} \frac{1}{R_{1\phi}(T_{1\phi} p + 1)};$$

$$W_{ny}(p) = \frac{I_{1y}(p)}{U_{1yz}(p)} = \frac{k_n}{T_n p + 1} \frac{1}{R_{1\phi}(T_{1\phi} p + 1)}.$$

2.2. Розрахунок параметрів елементів системи керування електроприводом

Для настроювання регуляторів необхідно визначити повні індуктивності, коефіцієнт розсіювання й електромагнітні постійні часу.

Повна індуктивність статора й ротора:

$$L_s = L_m + L_{\sigma s} = 2.34 \cdot 10^{-3} + 0.117 \cdot 10^{-3} = 2.457 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$L_r = L_m + L'_{\sigma r} = 2.34 \cdot 10^{-3} + 0.117 \cdot 10^{-3} = 2.457 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

Загальний коефіцієнт розсіювання (σ_s):

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r} = 1 - \left(\frac{2.34}{2.457} \right)^2 = 1 - 0.907 = 0.093$$

Еквівалентний опір ланцюга статора (R_Σ). Для спрощеного настроювання контуру струму часто приймають суму опорів:

$$R_\Sigma = R_s + R'_r = 0.014 + 0.0153 = 0.0293 \text{ Ом}$$

Мінімальна постійна часу системи, яку необхідно компенсувати:

$$T_\sigma = \frac{\sigma \cdot L_s}{R_\Sigma} = \frac{0.093 \cdot 2.457 \cdot 10^{-3}}{0.0293} = 0.0078 \text{ с}$$

Синтез внутрішнього контуру струму (d-q осі).

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250.01	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Векторне керування має на увазі наявність двох ідентичних контурів струму: по осі d (відповідає за потік) і по осі q (відповідає за момент). Об'єкт керування в цьому контурі апроксимується аперіодичною ланкою 1-го порядку. Постійна часу ПЧ (T_μ) залежить від частоти ШІМ. Допустимо, частота комутації IGBT транзисторів становить 2 кГц, тоді чисте запізнювання ШІМ $T_{pwm} \approx 0.5$ мс. З урахуванням затримок фільтрації зворотного зв'язку приймемо малу постійну часу $= 0.001$ с.

Передаточна функція П-регулятора струму:

$$W_{PC}(s) = K_{pc} \cdot \frac{1 + T_{ic} \cdot s}{T_{ic} \cdot s}$$

Постійна часу інтегрування РС T_{jc} вибирається рівної електромагнітної постійної часу об'єкта для компенсації самого повільного полюса:

$$T_{ic} = T_\sigma = 0.0078 \text{ с}$$

Пропорційний коефіцієнт підсилення РТ (K_{pc}). Розраховується виходячи з налаштування на технічний оптимум:

$$K_{pc} = \frac{\sigma \cdot L_s}{2 \cdot K_{pwm} \cdot T_\mu}$$

Приймаючи коефіцієнт передачі інвертора $K_{pwm} = 1$ (якщо система нормована), отримуємо:

$$K_{pc} = \frac{0.093 \cdot 2.457 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 115.8 \cdot 0.001} = 0.114 \text{ В/А}$$

Результат для контуру струму: ПІ-регулятор із $K_{pc} = 0.114$ і $T_{jc} = 0.0078$ с.

Синтез зовнішнього контуру швидкості. Контур швидкості являється зовнішнім стосовно контуру струму осі q . Об'єкт керування тут містить у собі замкнений контур струму (який тепер можна представити як ланку 1-го порядку з постійної часу $= 2T_\mu$) і механічну частину привода (інтегруюча ланка).

Через наявність інтегруючої ланки в об'єкті (механічна інерція), ПІ-регулятор швидкості (РШ) налаштується за критерієм симетричного оптимуму.

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250.01	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мала постійна часу контуру швидкості:

$$T_{\mu\omega} = 2 \cdot T_{\mu} = 2 \cdot 0,001 = 0,002\text{с}$$

Конструктивний коефіцієнт двигуна (K_T). Зв'язує струм і електромагнітний момент. У номінальному режимі:

$$K_T = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \Psi_{dr\text{ном}} = 1.5 \cdot 3 \cdot \frac{0.00234}{0.002457} \cdot 2.02 = 8.66$$

Де номінальне потокозчеплення ротора $\Psi_{dr\text{ном}} \approx U_{\phi}/\omega_s = 802.5/397.7=2.02$.

Передаточна функція ПІ-регулятора швидкості

$$W_{PI}(s) = K_{p\omega} \cdot \frac{1 + T_{i\omega} \cdot s}{T_{i\omega} \cdot s}$$

По симетричному оптимуму постійна часу інтегрування РШ $T_{i\omega}$ вибирається як 4 малі постійні часу:

$$T_{i\omega} = 4 \cdot T_{\mu\omega} = 4 \cdot 0,002 = 0,008\text{с}$$

Пропорційний коефіцієнт підсилення РШ ($K_{p\omega}$):

$$K_{p\omega} = \frac{J}{2 \cdot K_T \cdot T_{i\omega}} = \frac{12530}{2 \cdot 4.287 \cdot 0.002} = 182674364.4$$

Отут J – момент інерції, приведений до вала ТЕД. Розраховується виходячи з умови рівності кінетичних енергій при поступальному і обертовому рухах для

всього потяга:

$$J_{\Sigma} = m \cdot \frac{\omega_{\text{НОМ}}^2}{V_{\text{НОМ}}^2} = 384000 \cdot \frac{88.89^2}{200.88^2} = 75190\text{кгм}^2$$

Для окремої активної осі момент інерції сумарний зменшується в 6 разів:

$$J = \frac{J_{\Sigma}}{6} = \frac{75190}{6} = 12530\text{кгм}^2$$

Електромагнітна постійна часу ланцюга ротора.

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2'} = \frac{0.002457}{0.0153} = 0.1606\text{с}$$

Синтез зовнішнього контуру положення. Передаточна функцію ланки, що перетворює струм статора i_{1x} в потокозчеплення:

$$W_{\Psi_2}(p) = \frac{\Psi_2(p)}{I_{1x}} = \frac{L_{12}}{T_2 p + 1} = \frac{0.00234}{0.1606p + 1}$$

Передаточна функція ПІ-регулятора потокозчеплення

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250.01	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_{\text{П}}(s) = K_{\text{п}\psi} \cdot \frac{1 + T_{i\psi} \cdot s}{T_{i\psi} \cdot s}$$

Постійна часу інтегрування РП $T_{i\psi}$ по симетричному оптимуму вибирається як 4 малі постійні часу:

$$T_{i\omega} = 4 \cdot T_{\mu\psi} = 4 \cdot 0,002 = 0,008\text{с}$$

Пропорційний коефіцієнт підсилення РП ($K_{\text{рп}}$):

$$K_{\text{р}\omega} = \frac{T_2}{2 \cdot L_{12} \cdot T_{i\omega}} = \frac{0.1606}{2 \cdot 0.00234 \cdot 0.002} = 182674364.4$$

2.3. Розробка силової схеми автоматизованого тягового приводу

На підставі представленої принципової схеми Alstom power schema of the motor (рис. 2.1) можна скласти наступний деталізований технічний опис частотного тягового електропривода.

Загальна структура тягового привода

Тяговий привод виконаний за сучасною схемою: контактна мережа - головний трансформатор - активний випрямляч PMCF- фільтр ланки постійного струму - автономний інвертор напруги (OND) - тяговий асинхронний двигун.

Кожен моторний візок містить два незалежні тягові канали. На схемі показані:

- головний трансформатор;
- два активні перетворювачі PMCF1 і PMCF2;
- дві ланки постійного струму;
- два автономні трифазні інвертори OND;
- два тягові двигуни M1 і M2;
- ланцюги фільтрації;
- допоміжні перетворювачі живлення.

Вхідна високовольтна частина

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250.01	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

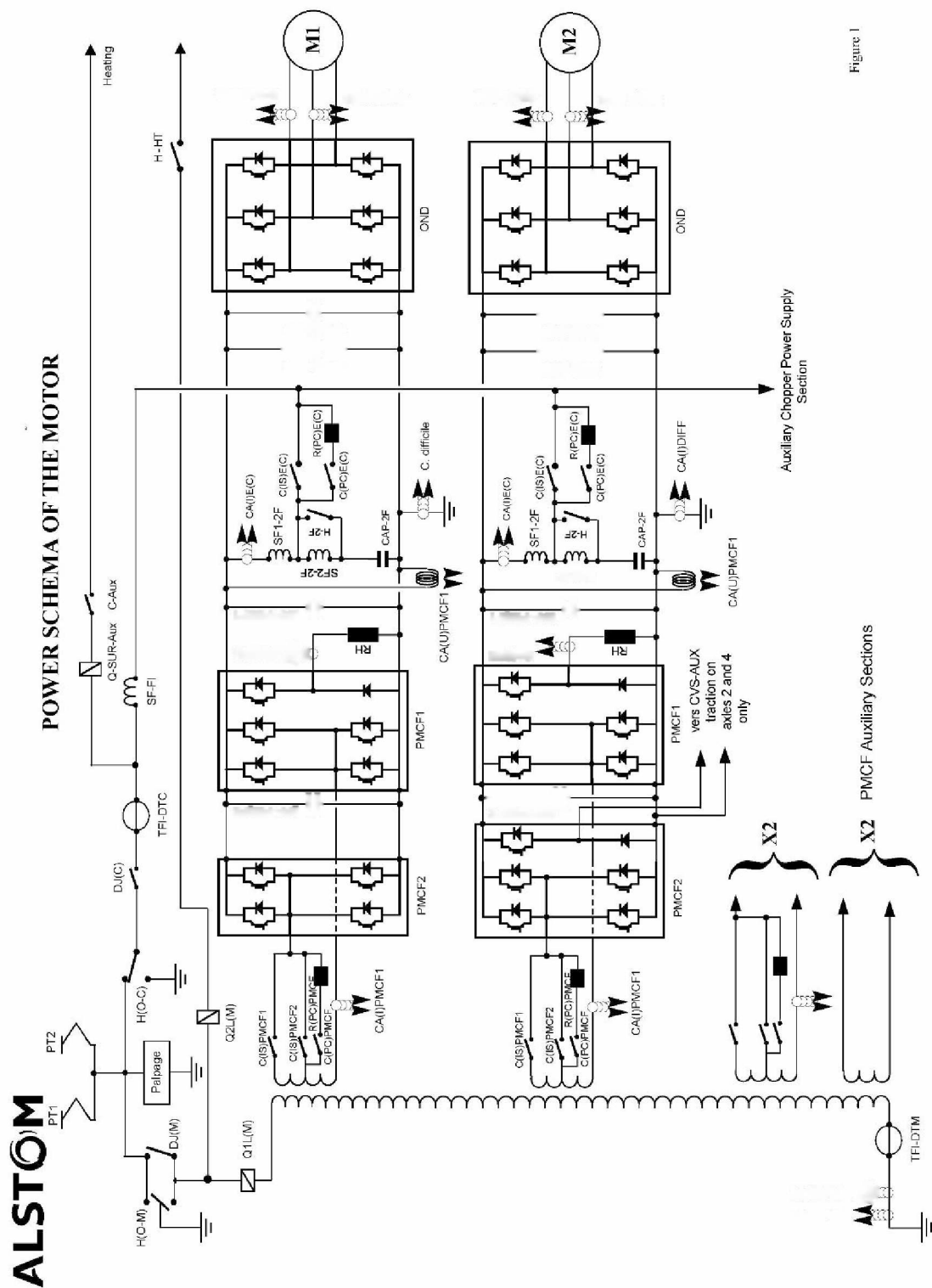


Figure 1

Рис. 2.3. Принципова схема тягового электропривода TGV

У лівій верхній частині схеми розташована система підключення до контактної мережі. Основні елементи:

					ЕТФ. КНУ.РБ.Г3.26.250.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

PT1, PT2 - високовольтні струмоприймачі. Призначені для знімання енергії з контактної мережі. Вони підключаються до високовольтної шини через комутаційні апарати Н(О-М), Н(О-С) - високовольтні роз'єднувачі. Вони використовуються для підключення струмоприймача; ізоляції обладнання при ремонті; перемикання режимів живлення.

DJ(M), DJ(C) - головні високовольтні вимикачі, призначені для: включення силового ланцюга; захисту від коротких замикань; аварійного відключення живлення.

Після вимикача DJ(M) живлення надходить на головний тяговий трансформатор TFI-DTM, який зображений у лівій нижній частині схеми.

Він призначений для зниження напруги контактної мережі; гальванічної розв'язки; живлення тягових і допоміжних перетворювачів.

Від трансформатора відходять кілька вторинних обмоток. Основні тягові обмотки живлять кожна перетворювачі PMCF1; PMCF2. Така схема дозволяє забезпечити незалежне керування осями; підвищення надійності; зменшення впливу аварії одного каналу на іншій.

У нижній частині схеми знаходяться допоміжні обмотки Pmcfauxiliarysections, які призначені для живлення: вентиляторів; маслонасосів; систем охолодження; ланцюгів власних потреб.

Вхідні перетворювачі PMCF

У центральній частині схеми розташовано два однакові комплекти блоків PMCF1, PMCF2. PMCF розшифровується із французької мови як однофазний міст із примусовою комутацією. По суті це активний чотириквadrантний випрямляч на IGBT. PMCF здійснює: випрямлення, тобто перетворює однофазну напругу трансформатора в постійну напругу. Також PMCF регулює напругу DC-шини, або підтримує необхідну напругу в ланці постійного струму. Також PMCF здійснює корекцію коефіцієнта потужності, тобто забезпечує високий $\cos\phi$; майже синусоїдальний струм мережі; зниження гармонік.

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250.01	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Також PMCF здійснює рекуперацію енергії, тому що здатний працювати в чотирьох квадрантах. Під час гальмування енергія повертається через PMCF назад у контактну мережу.

За PMCF розташовується DC-шина, тобто конденсатори ланки постійного струму CAP-PMCF. Вони призначені для накопичення енергії; згладжування пульсацій; стабілізації напруги.

Далі іде RH - гальмівний або розрядний резистор. Необхідний для розряду конденсаторів; обмеження перенапруг; аварійних режимів.

Між PMCF і інвертором розташований LC-фільтр - фільтр ланки постійного струму. Елементами фільтра являються дросель фільтра SF1-2F (призначений для зменшення пульсацій струму; придушення гармонік), а також конденсатор фільтра CAP-2F (призначений для згладжування напруги; формування фільтра нижніх частот). У цьому випадку для мережі 25 кВ 50 Гц фільтр настроєний на 100 Гц; а для мережі 15 кВ 16,7 Гц фільтр настроєний приблизно на 33 Гц.

У правій частині схеми знаходиться трифазний автономний інвертор напруги OND. У кожному інверторі є: шість IGBT-модулів; зворотні діоди; система керування PWM. Вхід OND підключений до DC-шини через фільтр. Вихід OND підключений безпосередньо до тягового двигуна.

Інвертор формує трифазну напругу регульованої амплітуди й частоти.

Праворуч розташовані тягові двигуни M1 і M2. Кожен двигун живиться від власного інвертора.

На схемі присутні позначення датчиків і вимірювальних ланцюгів: CA(I); CA(U); CA(I)OND; CA(U)OND; CA(I)DIFF. Це датчики відповідно струму; напруги; диференціального струму. Їх використовують для: захисту перетворювачів; регулювання моменту; контролю рекуперації; діагностики несправностей.

Допоміжна система живлення

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

У нижній центральній частині показаний блок Auxiliarychopperpowersupplysection, призначений для одержання напруг для власних потреб локомотива. Джерелом живлення для нього являється DC-шина тягового перетворювача.

Для власних потреб локомотива також використовується (на схемі не показано): понижувальний перетворювач (buckconverter); трифазні інвертори потужністю близько 50 кВа. Кінцевими споживачами системи власних потреб являються: маслонасоси трансформатора; вентилятори охолодження; допоміжні двигуни; системи керування.

Послідовність передачі енергії при роботі привода в тяговому режимі: контактна мережа – струмоприймач - високовольтний вимикач - головний трансформатор - вторинна тягова обмотка – PMCF - ланка постійного струму - LC-фільтр - інвертор OND - асинхронний двигун M1 або M2 - Колісна пара.

При гальмуванні привод працює в режимі рекуперації. Енергія від двигуна, який працює як генератор, іде на інвертор. Інвертор OND перетворює перемінну електроенергію в постійну, далі вона надходить в DC-шину. PMCF переходить в інверторний режим, і енергія повертається в контактну мережу.

Таким чином, схема являє собою повністю керований чотириквADRантний тяговий електропривод перемінного струму з активним мережевим перетворювачем PMCF, ланкою постійного струму й автономним IGBT-інвертором OND, що живлять індивідуальні асинхронні тягові двигуни M1 і M2.

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250.01	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. Моделювання динамічних режимів роботи привода механізму на ЕОМ

3.1. Моделювання статичних та динамічних режимів замкненої системи в пуско-гальмівних режимах та при навантаженні

Для дослідження перехідних процесів в замкненої системі приводу з підлеглим регулюванням розроблена модель, структура якої побудована згідно рис. 2.2, та надана на рис. 3.1:

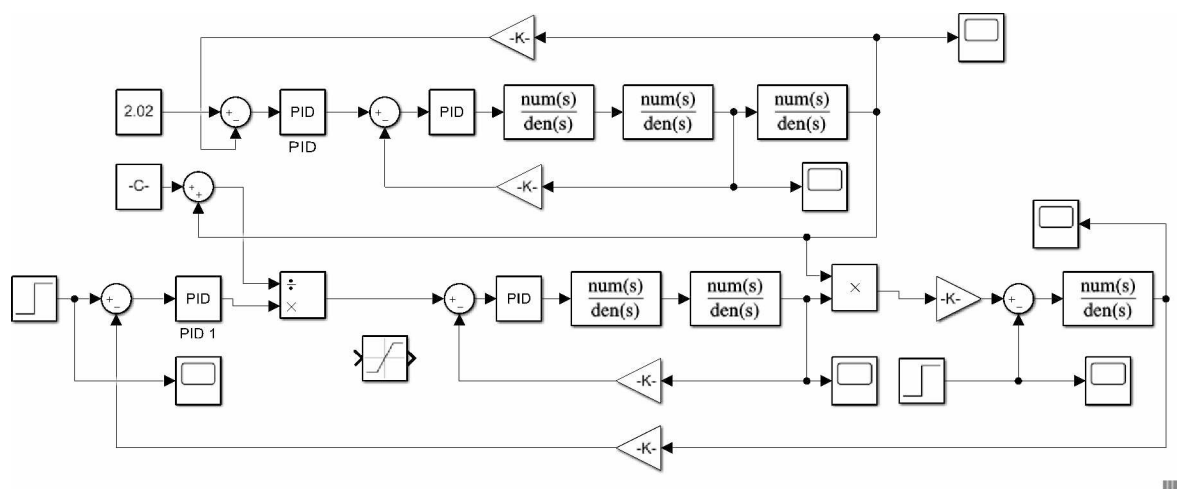


Рис. 3.1. Динамічна модель для дослідження замкненої системи електроприводу ПЧ-АД

Блок **Saturation** призначений для обмеження струму статора на максимально припустимому рівні. На вказаний моделі досліджувалися пуск вхолосту зі струмообмеженням, після закінчення перехідного процесу – накид навантаження на вал системи приводу. Результати моделювання вказаного перехідного режиму наведені на рис. 3.2÷3.6:

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01			
Змн.	Арк.	№ документа.	Підпис	Дат				
Розробив.	Баранець Д.С.				РОЗДІЛ 3. Моделювання приводу режиму роботи приводу механізму на ЕОМ.	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірів.	Сьомочкін А.Б.						56	
Рецензія.						КНУ Каф. ЕІ ЕЕМ-23ск		
Н. Контр.								
Затверд..	Сінчук О.М.							

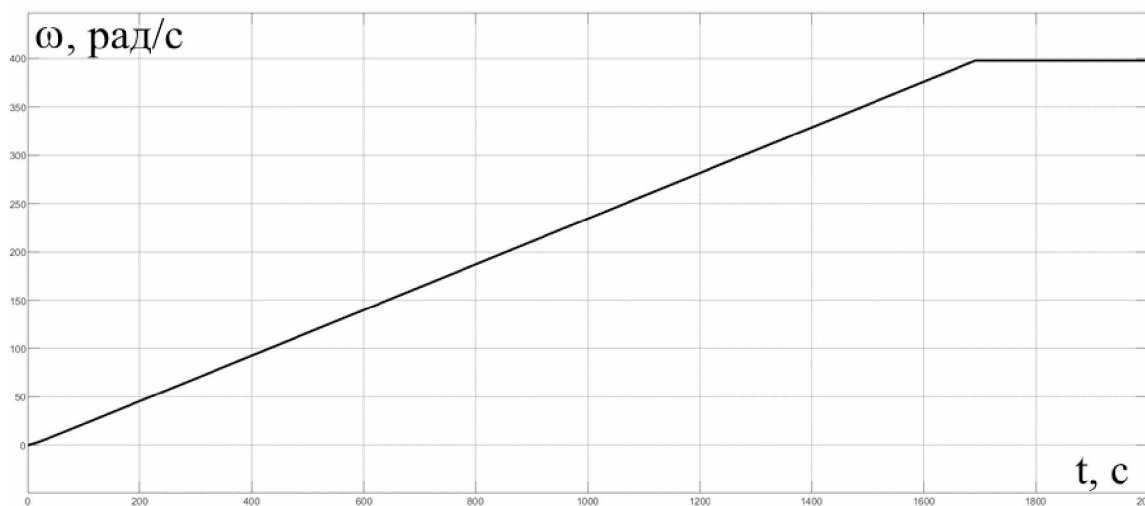


Рис.

3.2. Графік швидкості системи ПЧ-АД (Saturation ввімкнений)

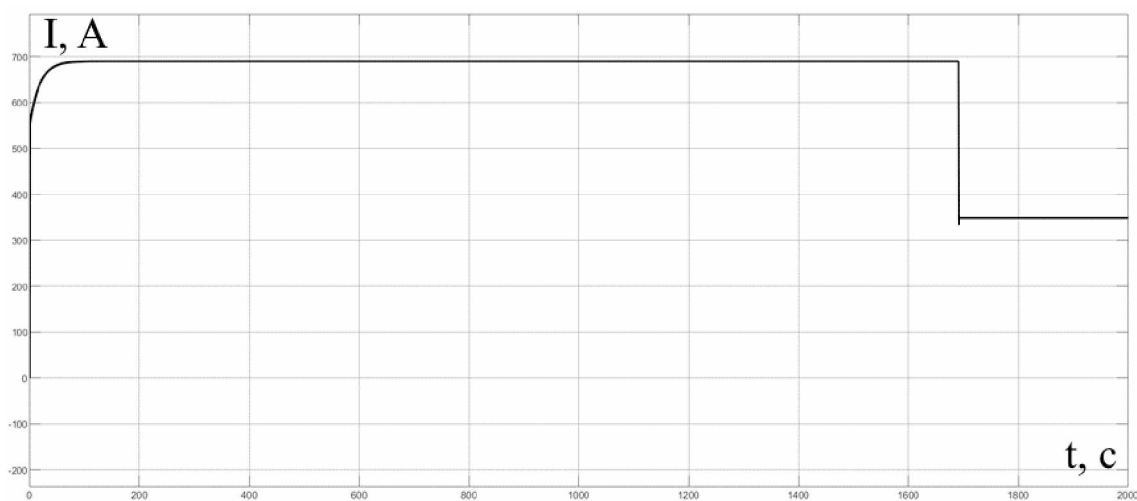


Рис. 3.3. Графік активного струму системи ПЧ-АД (Saturation ввімкнений)

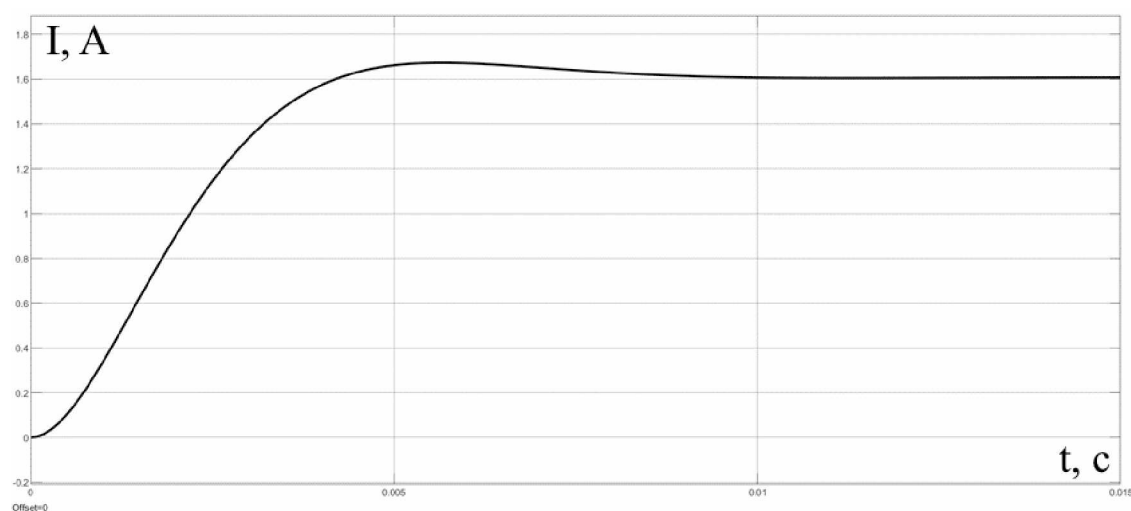


Рис. 3.4. Графік активного струму системи ПЧ-АД (Saturation вимкнений)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01

Арк.

57

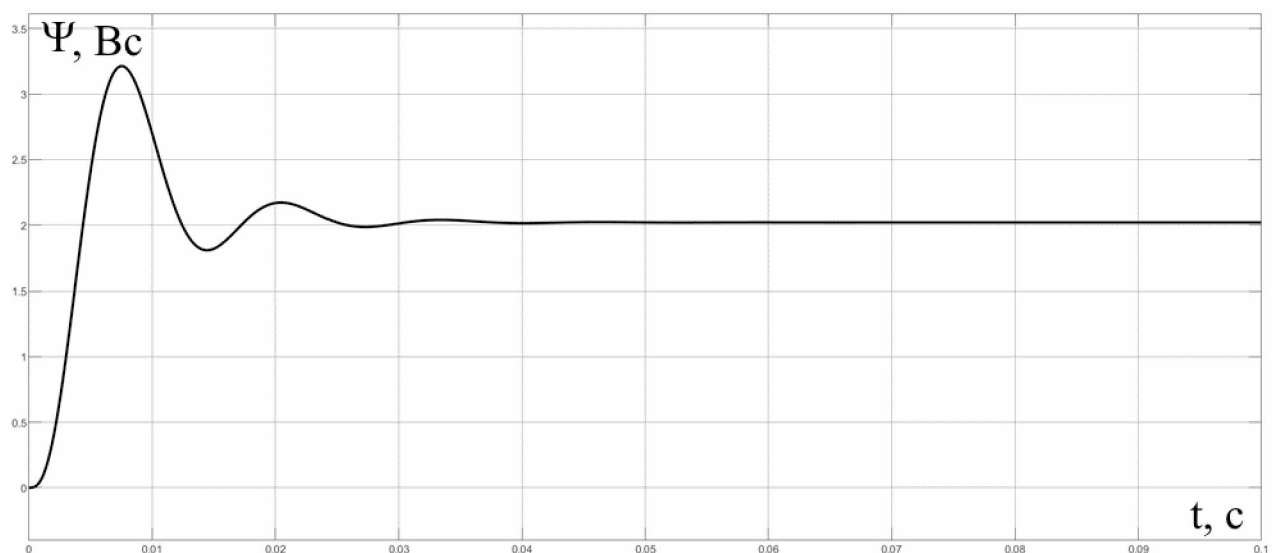


Рис. 3.5. Графік потокозчеплення ротора (Saturation вимкнений)

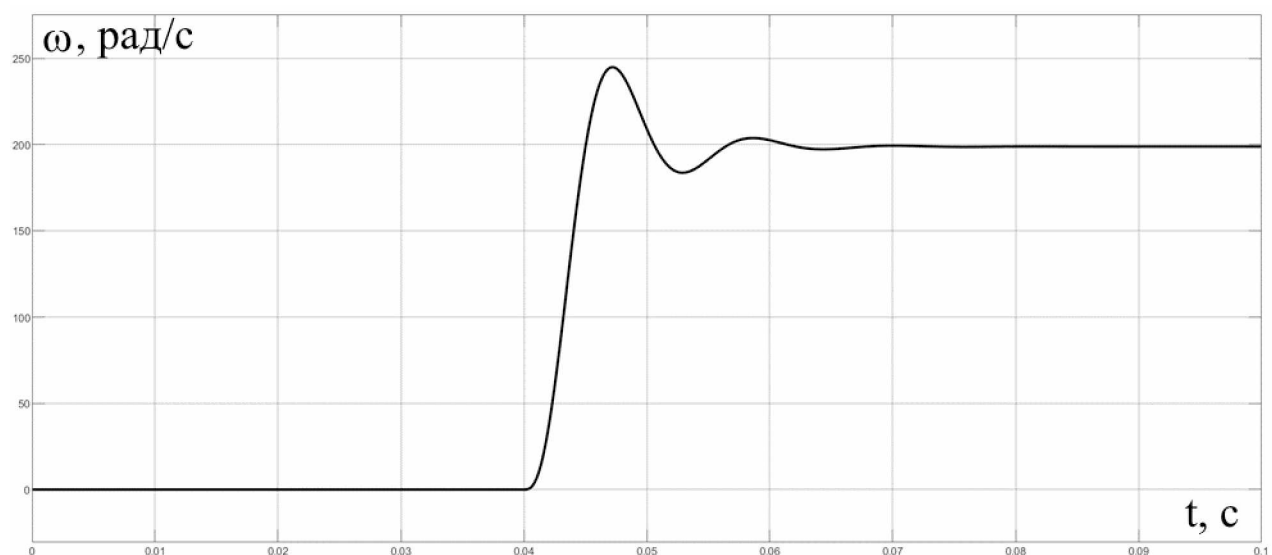


Рис. 3.6. Графік швидкості ротора (Saturation вимкнений)

3.2. Аналіз якісних показників розробленої системи керування

З графіків рис. 3.2 та 3.3 видно, що показники якості цілком задовольняють срозгіню потягу, тобто він дійсно розганяється з постійним прискоренням, без ривків, та наприкінці розгону відсутнє несприятливе явище перерегулювання швидкості. Весь час розгину струм обмежується на рівні 690 А (це обмеження, як звісно, стосується інверторів, а не власне асинхронного двигуна). Наприкінці розгону струм спадає до номінальної величини, яка відповідає повній завантаженості потягу. Тому що в моделі була використана система підлеглого керування, були здійснені перевірочні дослідження якості перехідних процесів в даній системі. По-перше, був перевірений контур струму, й за графіком рис. 3.4 можна переконатися, що величина перерегулювання дійсно відповідає нормованій 4.7% при часі регулювання $0.0022\text{ с} \approx 2 \cdot T_{\mu} = 2 \cdot 0.001 = 0.002\text{ с}$.

Налаштування контуру потокозчеплення на симетричний оптимум приводить до того, що перерегулювання на графіку рис. 3.5 дійсно досягає нормованої величини 43% (точніше – 59%). Час регулювання складає $0.00438 \approx 4 \cdot T_{\mu} = 4 \cdot 0.001 = 0.004$. Таким образом, можна констатувати, що система підлеглого керування розрахована правильно.

Остаточно на графіку рис. 3.6 показана швидкість. Вона починає зростати з деяким запізненням, що пояснюється необхідністю встановлення спочатку перехідних процесів в контурі потокозчеплення. Вид графіку швидкості також відповідає нормированому.

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

. В першому розділі представлена інформація про потяг «TGV Sud-Est», надано загальний вигляд потягу, кінематичні параметри тягової передачі, розглянуті вимоги до електропривода. На основі аналізу вимог до електропривода потягу обрано систему ПЧ-АД. Обрана система ЕП дозволяє забезпечити необхідні режими тяги потягу, високий ККД та потрібну жорсткість статичних характеристик. Проведено розрахунок потужності тягових двигунів, розрахунок інверторів, ланки постійного струму та 4-квadrантного перетворювача. Складена схема заміщення ТЕД та розраховано її параметри, побудовані статичні та енергетичні характеристики системи ПЧ-АД.

У другому розділі проведено роботи з розробки системи керування тяговим приводом. Система підлеглого керування обрана як найбільш простіша у наладці. Розраховано регулятори аналогової системи. Надана також принципова силова схема частотного електроприводу потягу «TGV Sud-Est».

Була побудована та змодельована замкнена система ПЧ-АД, що дозволяє значно підвищити швидкодію приводу. Показники перехідних процесів розробленої системи приводу ПЧ-АД відповідають розрахунковим величинам. Таким чином, спроектована тягова система ПЧ-АД потягу повністю задовольняє завданням, поставленим в рамках виконання випускової роботи.

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чигирик Н.Д., Найдьон Є.О., Сумцов А.Л. Аналіз схемних рішень та вибір тягового привода швидкісного рухомого складу Збірник наукових праць УкрДУЗТ, 2016, вип. 164, с. 10-11
2. К. І. Іванов, Л. В. Овер'янова Визначення параметрів гібридної тягової системи для приміського електропоїзду Вісник Національного Технічного університету «ХПІ». Серія: енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, № 2(20)'2025, с. 39-44.
3. Конструкція та динаміка електричного рухомого складу: підручник / С. В. Панченко, М. М. Бабаєв, В. С. Блиндюк та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2018. – Ч. 1. – 280 с., рис. 100, табл. 14. Isbn 978
4. Mishchenko, T. M. (2014). Перспективи схемотехнічних рішень і моделювання підсистем електричної тяги при високошвидкісному русі поїздів. Електротехніка та електроенергетика, (1), 19–28.
<https://doi.org/10.15588/1607-6761-2014-1-3>
5. Дослідження факторів та оцінка рівня їх впливу на показник питомих витрат електроенергії рухомого складу Сулима.О., Мельнико.О., Бялобржеський.В., Ломоноса.І. Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. № 4 (268) №1. С. 118-127.
6. Sönke Kraft. Parameter identification for a TGV model. Other. Ecole Centrale Paris, 2012. English.
7. Roger J. Kemp Drive systems for high speed trains BSc, FREng, FIEE, FIMechE. Transportation Research Board, Washington, January 1998
8. Review and prospect of maintenance technology for traction system of high-speed train Shaolong Xu, Chunyang Chen, Zhenjun Lin, Xiao Zhang, Jisheng Dai and Liangjie Liu Transportation Safety and Environment, 2021, Vol. 3, No. 3

					ЕТФ. КНУ.РБ.G3.26.250-01	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		