

Український державний університет залізничного транспорту
Механіко – енергетичний факультет
Кафедра: «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЕЛЕКТРИЧНОГО МОТОРВАГОННОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи
МРМ. 273.8/24.01.24.01 ПЗ

Розробив студент групи 214-ЕЕП-323
Рівень вищої освіти: другий
Ступінь вищої освіти: магістр
Спеціальність: 273 Залізничний транспорт
Освітня програма: Електровози та електропоїзди
Басов О.О.

Керівник: доцент Яцько С.І.

Рецензент: доцент Карпенко Н.П.

2025

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет: механіко-енергетичний

Кафедра: електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

Другий (магістерський) рівень вищої освіти

Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»

Освітня програма: «Електровози та електропоїзди»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
професор, д-р техн. наук



М.М. Бабаєв

«30» Вересня 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Басову Олексію Олексійовичу

1 Тема «Удосконалення тягового електроприводу електричного моторвагонного рухомого складу», керівник Яцько Сергій Іванович, доцент, затверджені розпорядженням по механіко - енергетичному факультету від 30 вересня 2024 року № 8/24.

2 Строк подання студентом закінченої роботи «05»січня 2025 року.

3 Вихідні дані Електричний рухомий склад (електропоїзд) типу ЭР, ЕПЛ призначений для експлуатації на електрифікованих ділянках змінного струму. Основне обладнання тягового електроприводу електропоїздів розміщено на моторному вагоні. Тягові електричні двигуни пульсуючого струму послідовного збудження. Швидкість руху регулюється зміною напруги на ТЕД і ослабленням їхнього магнітного поля. Електричне гальмування реостатне.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1) Режим роботи ЕРС та умови експлуатації

2) Аналіз систем тягового електроприводу рухомого складу та визначення основних напрямків його удосконалення

3) Удосконалення системи електричного реостатного гальмування рухомого складу

4) Система електричного гальмування з бортовим накопичувачем енергії

5) Економічний розділ

5 Перелік графічного матеріалу

1 Основні технічні характеристики електропоїздів;

2 Схеми тягового електроприводу електричного рухомого складу;

3 Гальмівна характеристика електричного гальма;

4 Силова схема тягового електроприводу підвищеної ефективності(2 ілюстрації);

5 Імітаційна модель системи тягового електроприводу

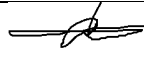
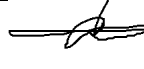
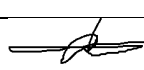
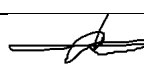
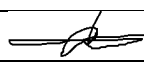
6 Результати досліджень системи тягового електроприводу на імітаційній моделі

6 Консультанти окремих розділів

Розділ	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічний розділ	Уткіна Ю.М., доцент, к.е.н..		

7 Дата видачі завдання « 30 » вересня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1 Режим роботи електричного моторвагонного рухомого складу та умови експлуатації	15.10.2024	
2 Аналіз систем тягового електроприводу рухомого складу та визначення основних напрямків його удосконалення	15.10.2024	
3 Удосконалення системи електричного реостатного гальмування рухомого складу	30.11.2024	
4 Система електричного гальмування з бортовим накопичувачем енергії	20.12.2024	
5 Економічний розділ	30.12.2024	

Студент  О. О. Басов


Керівник _____ С.І. Яцько

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 94 аркушів пояснювальної записки формату А4, у тому числі 46 рисунок, 6 таблиць, 8 літературних джерела.

Ключові слова: електричний моторвагонний рухомий склад, система керування, тяговий двигун, накопичувач енергії.

Об'єктом дослідження є процес функціонування тягового електроприводу електричного рухомого складу при електричному гальмуванні

Метою дослідження є пошук рішень по модернізації штатного тягового електроприводу електричного рухомого складу з метою його удосконалення.

У кваліфікаційній роботі розглянуто варіанти модернізації електричного рухомого складу з тяговим електроприводом. Запропоновано систему електричного гальмування підвищеної ефективності. У останньому розділі був розрахований економічний ефект від впровадження запропонованої системи.

ABSTRACT

This qualification paper includes 94 sheets of A4 explanatory note, including 46 pictures, 6 tables, 8 literary sources.

Keywords: electric multiple unit rolling stock, control system, traction motor, energy storage.

The object of the study is the process of functioning of the traction electric drive of electric rolling stock during electric braking.

The purpose of the research is to find means to increase the efficiency of electrical braking of rolling stock.

The qualification work considers options for the modernization of electric rolling stock with a traction electric drive. An electric braking system of increased efficiency is proposed. In the last section, the economic effect of the implementation of the proposed system was calculated.

Зміст

	Стор.
Вступ.....	6
1 Режим роботи електричного моторвагонного рухомого складу та умови експлуатації.....	9
2 Аналіз систем тягового електроприводу рухомого складу та визначення основних напрямків його удосконалення.....	17
3 Удосконалення системи електричного реостатного гальмування рухомого складу.....	33
4 Система електричного гальмування з бортовим накопичувачем енергії.....	60
5 Розрахунок економічного ефекту від реалізації системи електричного гальмування підвищеної ефективності.....	70
Висновки.....	80
Перелік використаних джерел.....	81
Додаток.....	82

					МРМ. 273.8/24.01.24.01 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Басов			Удосконалення тягового електроприводу електричного моторвагонного рухомого	Літ.	Арк.
Перевір.		Яцько					
Реценз.		Каппенко				УкрДУЗТ	
Н. Контр.							
Затверд.		Бабаєв		..			

ВСТУП

В даній кваліфікаційній роботі розглянуто питання удосконалення тягового електроприводу існуючого парку електропоїздів. Відомо, що залізницями України використовуються системи тяги як постійного, так і змінного струму, і при цьому електропоїзди обладнані лише однією з названих систем живлення. Це звужує поле використання конкретного електропоїзда.

Для організації руху вантажних поїздів в місцях сполучення різних систем застосовуються двосистемного живлення електровози типу ВЛ82. У протилежному випадку на станції стикування передбачається зупинка поїзда і заміна електрорухомого складу. В зв'язку з цим підвищення ефективності залізничних перевезень вимагає розширення використання в перевізній роботі двосистемного електрорухомого складу. Що стосується електричного моторвагонного рухомого складу, то двосистемне живлення передбачено на сучасних електропоїздах швидкісного сполучення.

На сьогодні в інвентарному парку Укрзалізниці знаходяться близько 15 міжрегіональних електропоїздів (ЕКр-1, EJ675, HRCS2) і близько 50 вантажних електровозів (ВЛ82М) подвійного живлення. Електровози ВЛ82М виготовлені в 70-ті роки минулого століття і не відповідають сучасним вимогам експлуатації, оскільки оснащені колекторними тяговими двигунами з системою ступінчатого реостатного регулювання потужності тяги. Вказані вище обставини вимагають поповнення парку електричного рухомого складу Укрзалізниці перспективним електрорухомим складом подвійного живлення.

В умовах, коли відсутні достатні кошти на оновлення рухомого складу важливим є вдосконалення існуючого рухомого складу, в тому числі шляхом впровадження удосконаленого тягового електричного приводу.



Skoda EJ 675 (Elektrická Jednotka) — двоповерховий електропоїзд подвійного живлення виробництва компанії Škoda Vagonka



HRCS2 — двосистемний електропоїзд виробництва компанії «Hyundai Rotem»



ЕКр1 «Тарпан» — двосистемний електропоїзд виробництва компанії Крюківський вагонобудівний завод

Рисунок: міжрегіональні двосистемні електропоїзди ЕКр-1, EJ675, HRCS2

Існуючий парк електропоїздів приміського сполучення складають електропоїзди типу ЕПЛ та ЕР. Незалежно від струму живлення, тяговий електропривод базується на використанні колекторних тягових двигунів послідовного збудження. Швидкість руху регулюється зміною величини напруги живлення на тягових електричних двигунів і ослабленням їхнього магнітного поля. На електропоїздах останніх років випуску передбачено рекуперативно – реостатне

(на електропоїздах постійного струму живлення) та реостатне (на електропоїздах змінного струму живлення) гальмування.

В даній кваліфікаційній роботі приведено результати пошуку рішень по модернізації штатного тягового електроприводу електричного рухомого складу з метою його удосконалення. Запропоновано систему електричного гальмування підвищеної ефективності. Проведено дослідження процесу функціонування тягового електроприводу електричного рухомого складу при електричному гальмуванні

1 Режим роботи електричного моторвагонного рухомого складу та умови експлуатації

Як зазначено в [1] в основу конструктивних концепцій електропоїздів не залежно від їх функціонального призначення в процесі створення слід покладатись на наступні 6 принципи:

- 1) забезпечення реалізації тягових та гальмівних характеристик відповідності до заданих конкретних умов експлуатації;
- 2) створення оптимальних умов керування та обслуговування;
- 3) забезпечення комфортних умов для пасажирів;
- 4) виконання вимог збереження навколишнього середовища;
- 5) підтримання високого рівня безпеки та надійності (безвідмовності, довговічності та ремонтпридатності);
- 6) низьке споживання енергії.

В залежності від призначення електропоїзда, як це вказано в [1], рівень реалізації вказаних вимог різний, так як умови та режими експлуатації по ряду параметрів суттєво різняться. Крім того на рівень та глибину концептуальних рішень впливає необхідність узгодження співвідношення капітальних та експлуатаційних витрат з прибутками від пасажирських перевезень.

Фактичні режими роботи електропоїздів в експлуатації відрізняються від заданих і в значній мірі залежать від:

- стану та характеристик колії ділянок експлуатації;
- стану та режимів роботи пристроїв електропостачання;
- метеорологічних умов;
- наявності, з об'єктивних чи суб'єктивних причин, обмежень швидкості руху;
- та інших.

Для електропоїздів, що призначенні для забезпечення

приміських пасажирських перевезень, суттєве значення мають також такі фактори як:

- довжина, кількість та розподілення поїздо-перегонів на ділянці;
- інтервал руху між поїздами по розкладу;
- час зупинок на станції згідно розкладу;
- фактичне завантаження поїздів;
- організаційно-технічними заходами по ремонту.

Для електропоїздів приміського сполучення (див. рис.1.1) характерними режимами є пуск, вибіг та гальмування. Об'єднані фази кривої руху електропоїзда в приміському сполученні показані на рис.1.2.



Рисунок 1.1 Електропоїзд типу ЕПЛ9Т, призначений для приміських перевезень пасажирів

Частота та час протікання вказаних режимів залежить від відстані між

зупинками та заданого часу руху по перегону. Фактично відстань між зупинками визначається місцевими умовами і є випадковою величиною. З огляду на це режим роботи тягового електричного обладнання можна характеризувати як не сталий, який має фази інтенсивного завантаження при пуску та електричному гальмуванні.

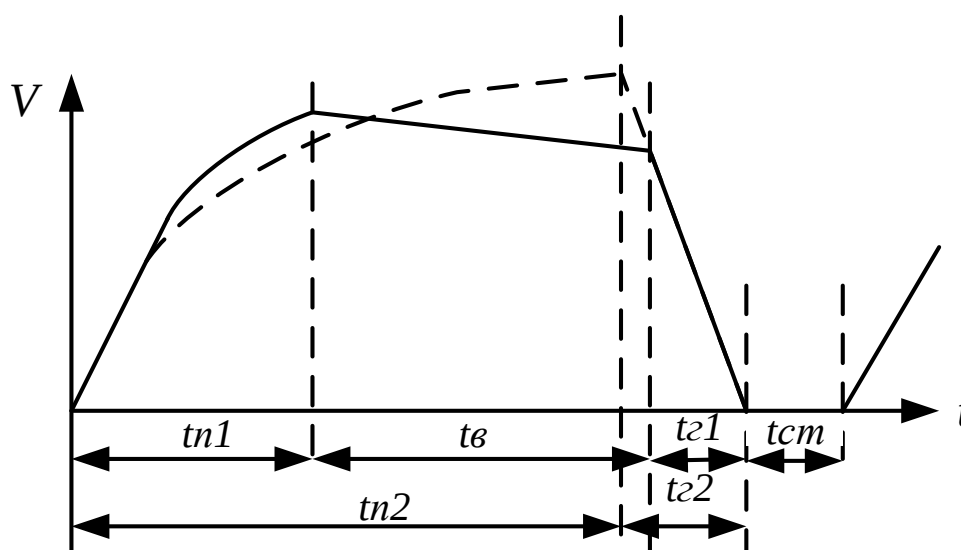


Рисунок 1.2 Об'єднані фази кривої руху поїзда в приміському сполученні:

V – швидкість руху; t – час; t_n – час режиму пуску; $t_ε$ – час режиму вибігу; $t_з$ – час режиму гальмування; t_{cm} – час стоянки; $(t_n + t_ε + t_з)$ – час руху по перегону

Така циклічність без явно визначеного тривалого режиму (сталість протягом значного відрізка часу швидкості руху, тягового (гальмівного) моменту і т.п.) стосується і іншого тягового обладнання. У зв'язку з цим, вибір характеристик обладнання для електропоїздів приміського сполучення більш ускладнений, ніж для рухомого складу, керівними режимами якого є тривалі режими (наприклад, магістральні електровози для вантажних та пасажирських перевезень).

При визначенні параметрів основного тягового електричного обладнання

електропоїздів приміського сполучення прийнята методика [1,2], у відповідності з якою, наприклад, потужність тягового двигуна визначається за умови забезпечення заданої технічної швидкості електропоїзда певної маси при номінальній напрузі в контактній мережі на прямій горизонтальній ділянці колії та довжині перегону 3,5 км, з роботою у режимі тяги до половини розрахункового перегону з послідуєчим вибігом та гальмуванням до повної зупинки. Дана довжина умовної ділянки прийнята на основі проведеного статистичного аналізу довжин перегонів для приміських ділянок. Для оцінки реальних даних довжин перегонів, на яких експлуатуються приміські електропоїзди, був проведений аналіз з врахуванням частоти їх проходження електропоїздами. На рис.1.3 приведена гістограма розподілення перегонів для Південно – Західної залізниці (контактна мережа змінного струму живлення промислової частоти).

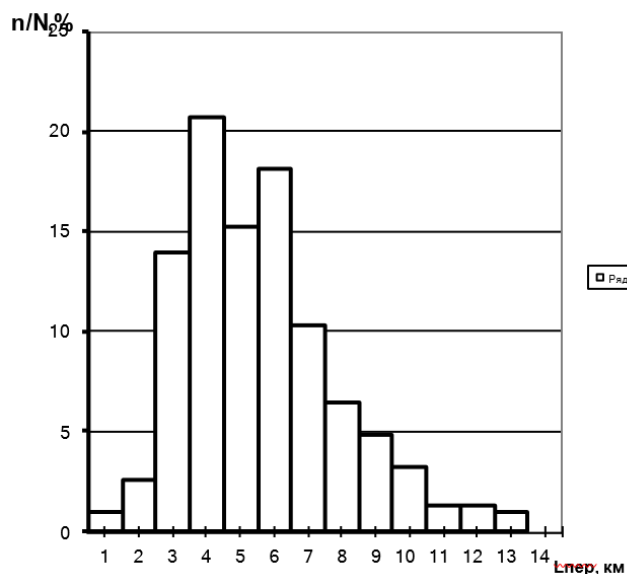
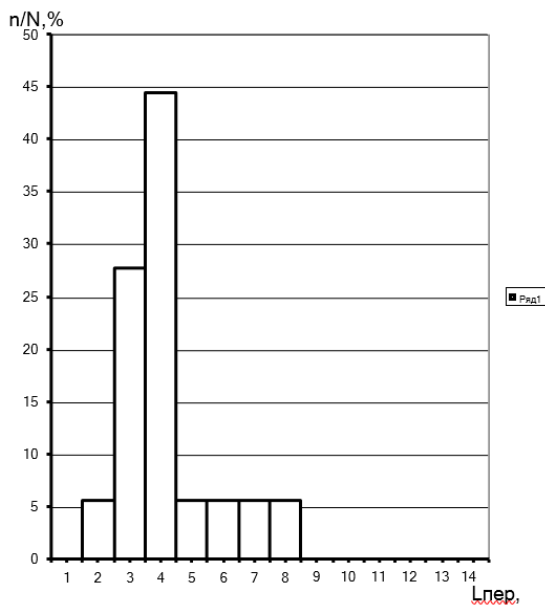
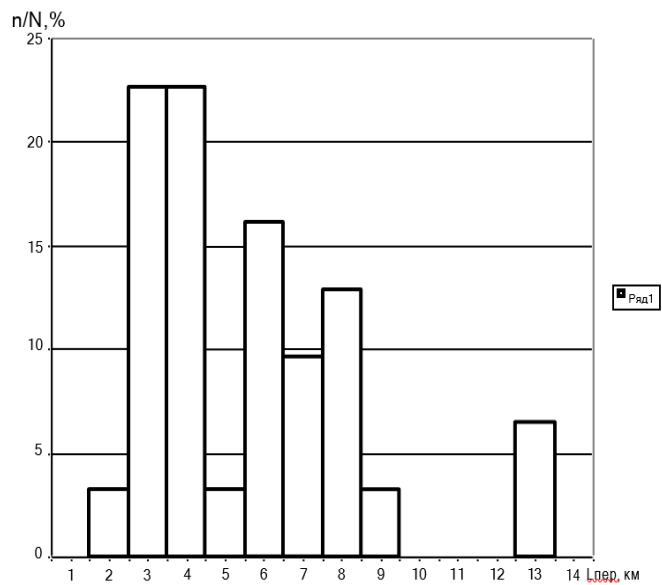


Рисунок 1.3 – гістограми розподілення перегонів n від їх кількості N для Південно – Західної залізниці

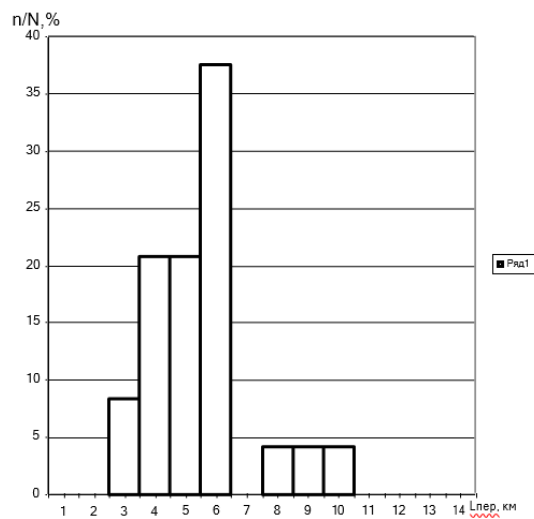
При цьому слід зазначити, що по певним напрямкам розподілення довжин перегонів відрізняються по усередненим даним (див. рис.1.4).



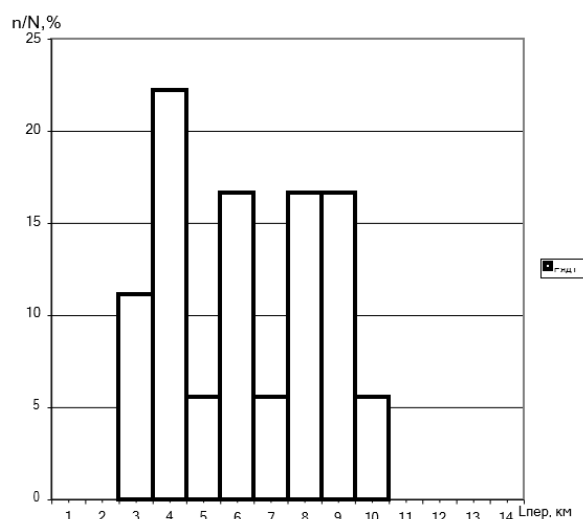
напрямок Київ - Фастів – Київ



напрямок Київ - Гребінка – Київ



напрямок Жмеринка - Гречана – Жмеринка



напрямок Фастів - Миронівка – Фастів

Рисунок 1.4 – гістограми розподілення перегонів n від їх кількості N по напрямках Південно – Західної залізниці

Вище наведені дані по довжинам перегонів на певних напрямках вказують на те, що в реальних умовах можливі режими роботи електропоїзда, що суттєво відрізнятимуться від режиму при русі на умовній ділянці. Крім того, оцінка швидкісних характеристик електропоїзда виходячи з даних руху на умовній ділянці не дає змогу оцінити весь діапазон реальних режимів роботи в експлуатації.

Суттєвий вплив на режим роботи обладнання електропоїздів крім відстані між зупинками і швидкості руху на ній мають план і профіль колії та інші фактори.

Відомо, що план та профіль колії не тільки визначає плавність, комфортність та рівень безпеки руху поїздів, а і має суттєвий вплив на визначення величини маршрутної швидкості на ділянці, режими руху поїздів, енерговитратність та їх надійність. За даними [3], до 50% кривих ділянок залізниць України мають радіуси менші 1200 м. Кількість уклонів крутіших за 8‰ складає від 10 до 20,5 % в залежності від залізниць. Причому, найбільша кількість уклонів крутіших 15 ‰ припадає на Львівську та Донецьку залізниці. До 13,1 % складає питома вага кривих радіусом до 500 м на Львівській залізниці. Частка колії з кривими на деяких напрямках складає до 40 % від довжини ділянок експлуатації поїздів.

Наведені дані вказують на наявність значної кількості ділянок колії, характеристики яких суттєво в тій чи іншій мірі обмежують швидкість руху поїздів.

Стан та характеристики колії ділянок в значній мірі визначають безпеку руху поїздів, плавність руху та рівень комфорту пасажирів. Для забезпечення даних характеристик вводяться обмеження на ряд параметрів. До них відносяться:

- непогашене поперечне прискорення α_{nn} , м/с²;
- швидкість зміни поперечного непогашеного прискорення за одиницю часу ψ , м/с³;
- вертикальні прискорення під час руху по криволінійній ділянці позовжнього профілю α_v , м/с²;
- швидкість підйому колеса по відводу підвищення зовнішньої рейки f , мм/с;
- плавність ходу екіпажу W .

Для запобігання раптового виникнення центробіжної сили при вході в криву передбачається застосування перехідних кривих із змінною кривизною $k=1/\rho$ (ρ –

змінний радіус перехідної кривої). При цьому в межах перехідної кривої плинне значення підвищення h зовнішньої рейки повинно бути пропорційним плинному значення кривизни. В кінці перехідної кривої підвищення h зовнішньої рейки та кривизна k відповідно повинні рівнятися h_0 та $k=1/R$. Процес входження електропоїзда в перехідну криву супроводжується коливаннями вагонів. Інтенсивність коливань залежить від довжини перехідної кривої та швидкості руху електропоїзда.

Питанню будови рельсової колії та її формування для забезпечення безпеки руху поїздів, плавності їх руху та рівню комфорту пасажирів приділяється значна увага. На даний час в Україні прийняті [1], з врахуванням зростання швидкостей руху поїздів, критерії плавності, комфортабельної їзди й безпеки руху, наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - критерії плавності, комфортабельної їзди й безпеки руху на залізницях України

Критерії плавності, комфортабельної їзди та безпеки руху	Прийняті позначення	Значення критеріїв для швидкості руху, км/год	
		141...160	161...200
1. Непогашене поперечне прискорення, м/с^2	α_{np}	0,70	0,70...0,60
2. Швидкість зміни поперечного непогашеного прискорення за одиницю часу, м/с^3	ψ	0,60	0,40
3. Вертикальні прискорення під час руху покриволінійній ділянці поздовжнього профілю, м/с^2	α_v	0,15	0,10

Продовження табл.1.1

4. швидкість підйому колеса по відводу підвищення зовнішньої рейки, мм/с	f	28...35	28
5. Плавність ходу	W	$\leq 1,25$ – відмінно; $1,26...2,5$ – добре; $2,6...3,25$ - задовільно	

Електропоїзд та колія складають єдину динамічну систему, характер протікання перехідних процесів в якій залежить як від параметрів екіпажної частини, так і стану залізничної колії. Спричинити динамічні коливання в системі можуть: нерівномірне зношення рельсів та їх викривлення, нерівномірність пружних властивостей колії по довжині, конічність та нерівність поверхні катання коліс, пориви вітру та інше. Інтенсивність дії вказаних факторів та рівень коливань в результаті їх дії залежать в свою чергу від швидкості руху та навантаження на вісь. Збурення, які діють на рухома одиницю в цілому носять випадковий характер. Однак з певним припущенням, їх можна розділити на детерміновані та випадкові. Останнім часом, особливо з зростанням швидкості руху поїздів, питанню вивчення динаміки системи „рухома одиниця – залізнична колія” та забезпеченню безпеки руху, плавності та комфортної їзди приділяється значна увага [1].

На режим роботи електропоїзда значно впливає якість механічної взаємодії струмоприймача з контактною підвіскою. В значній мірі вона визначає максимальну швидкість руху поїздів, а також величину капітальних та експлуатаційних витрат в залежності від конструкції взаємодіючих елементів та рівня їх зношення.

2 Аналіз систем тягового електроприводу рухомого складу та визначення основних напрямків його удосконалення

Електропоїзди ЕПЛ9Т призначені для експлуатації в режимі приміського пасажирського сполучення на електрифікованих ділянках змінного струму напругою 25 кВ промислової частоти 50 Гц [1, 2].

Електропоїзди ЕПЛ9Т традиційно з існуючим парком електропоїздів формуються з трьох типів вагонів: головного (Г), з якого здійснюється керування електропоїздом; моторного (М), що має електричний привід від чотирьох електродвигунів постійного струму послідовного збудження та причіпного (П).

Основна складеність електропоїздів – 8 вагонів: 2Г+4М+2П.

На візках застосовані тягові електричні двигуни 1ДТ.003.11 пульсуючого струму з доробкою остова під три точкове обпирання на раму візка для ЕПЛ-9Т. Повздовжній та поперечний розріз тягового електричного двигуна показано на рис. 2.1, а основні технічні характеристики приведені в табл. 2.1.

Тягове електричне обладнання електропоїздів латвійського виробництва.

Основними режимами роботи тягового електроприводу електропоїзда ЕПЛ9Т є режими пуску та електричного гальмування.

Схеми силових кіл тягового електроприводу електропоїзда ЕПЛ9Т приведено на рис. 2.2. У тяговому режимі двигуни М1-М4 підключені до тягової обмотки силового трансформатора (ГТ) через кремнієві випрямлячі, включені по однофазній мостовій схемі. Тягові електричні двигуни (ТЕД) утворюють дві паралельні групи по два двигуна послідовно і підключені до випрямляючої установки двома лінійними контакторами ЛК1 і ЛК2.

Швидкість руху регулюється зміною напруги на ТЕД і ослабленням їхнього магнітного поля. Величину напруги змінюють послідовним підключенням головним (силовим) контролером різного числа секцій тягової обмотки трансформатора.

Таблиця 2.1- основні технічні характеристики тягового електричного двигуна
1ДТ.003.11 У

пп	Параметри	Дані
1	Режим роботи	
1.1	Потужність, кВт	220
1.2	Струм, А	295
1.3	Напруга, В	825
1.4	Ступінь збудження, %	50
1.5	Частота обертання, об/хв	820
1.6	Коефіцієнт пульсації, %	25
1.7	ККД, %	90
2	Максимальна експлуатаційна частота обертання, об/хв	2165
3	Напрямок обертання	В обидві сторони
4	Опір обмотки якоря при 20 ⁰ С, Ом	0,050±0,003
5	Збудження	послідовне
6	Спосіб охолодження	самовентиляція
7	Опір обмотки головних полюсів при 20 ⁰ С, Ом	0,097±0,0058
8	Опір обмотки додаткових полюсів при 20 ⁰ С, Ом	0,0152±0,00091
9	Ізоляція обмоток відносно корпусу на номінальну напругу, В	2000
10	Клас нагрівостійкості ізоляції обмоток	F
11	Маса, кг, не більше	2300
12	Дані щіток: - марка - розміри, мм - найменший радіальний розмір, мм - тиск на щітку, Н (кгс) марки ЭГ61А	ЭГ61А (2х10) х 40 х 50 26 25.5÷27.5 (2.6÷2.8)
13	Кількість щіток	8
14	Дані колектора, мм - діаметр - найменший діаметр - зазор між колектором та обіймою щіткоутримувача	440 424 3±1
15	Дані підшипників(по ГОСТ 8528–75, ТУ 37.006.048–73, ГОСТ 3189–89): - зі сторонни колектора - зі сторони приводу мастило	Н0–62417 К1М Н0–32419 М ЖРО ТУ32 ЦТ 520–73

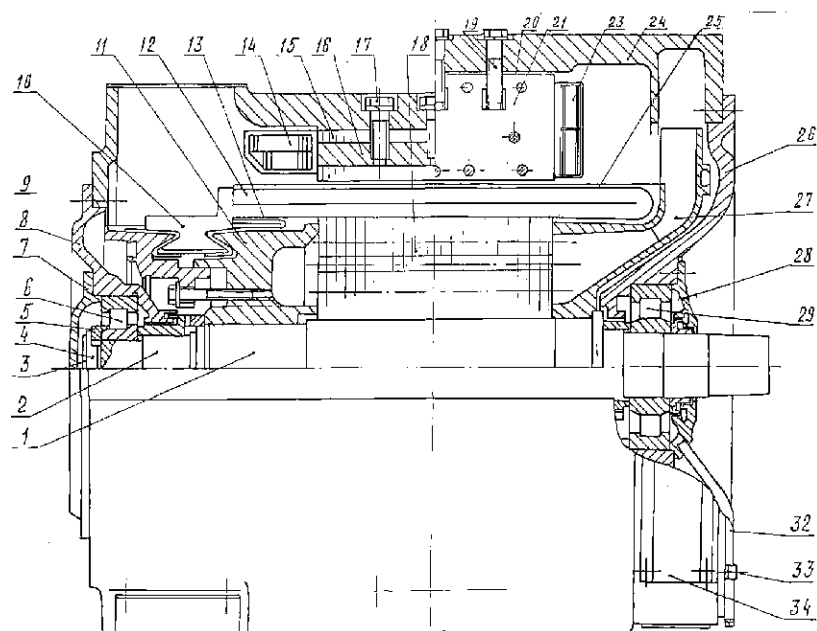
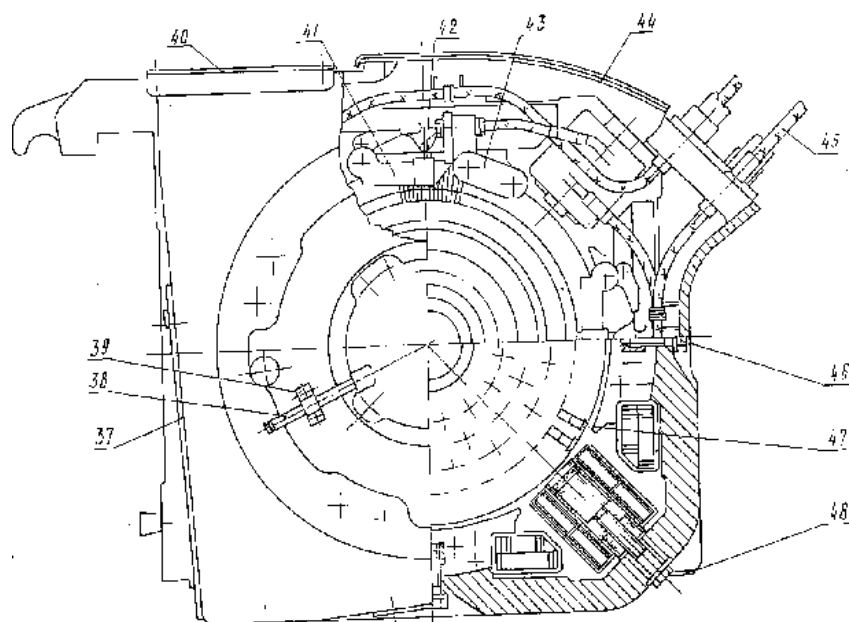


Рисунок 2.1 Повздовжній та поперечний розріз тягового електричного двигуна 1ДТ.003.11 У

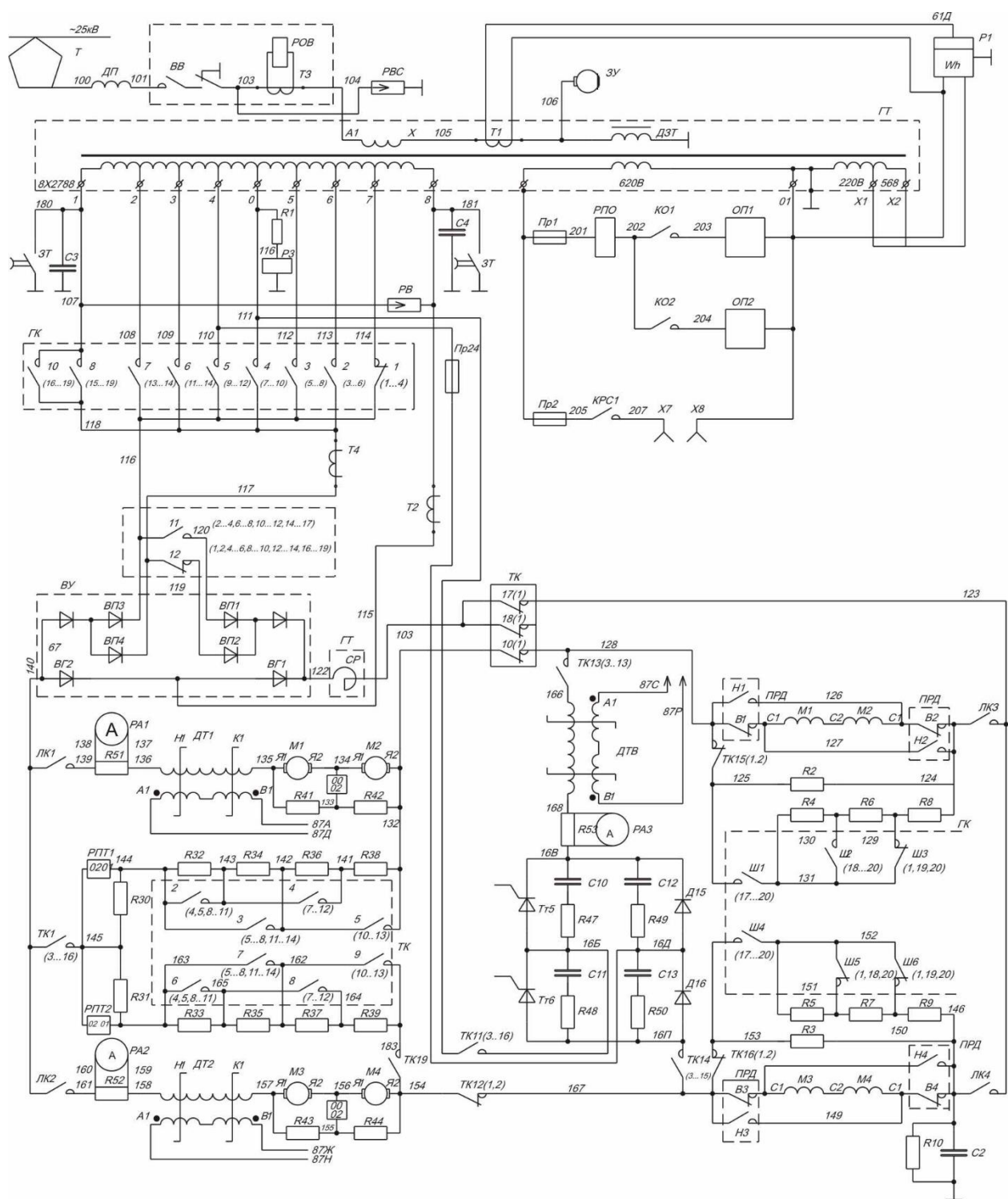


Рисунок 2.2 Схема електрична принципова силових кіл моторного вагону електропоїзда ЕПЛ9Т

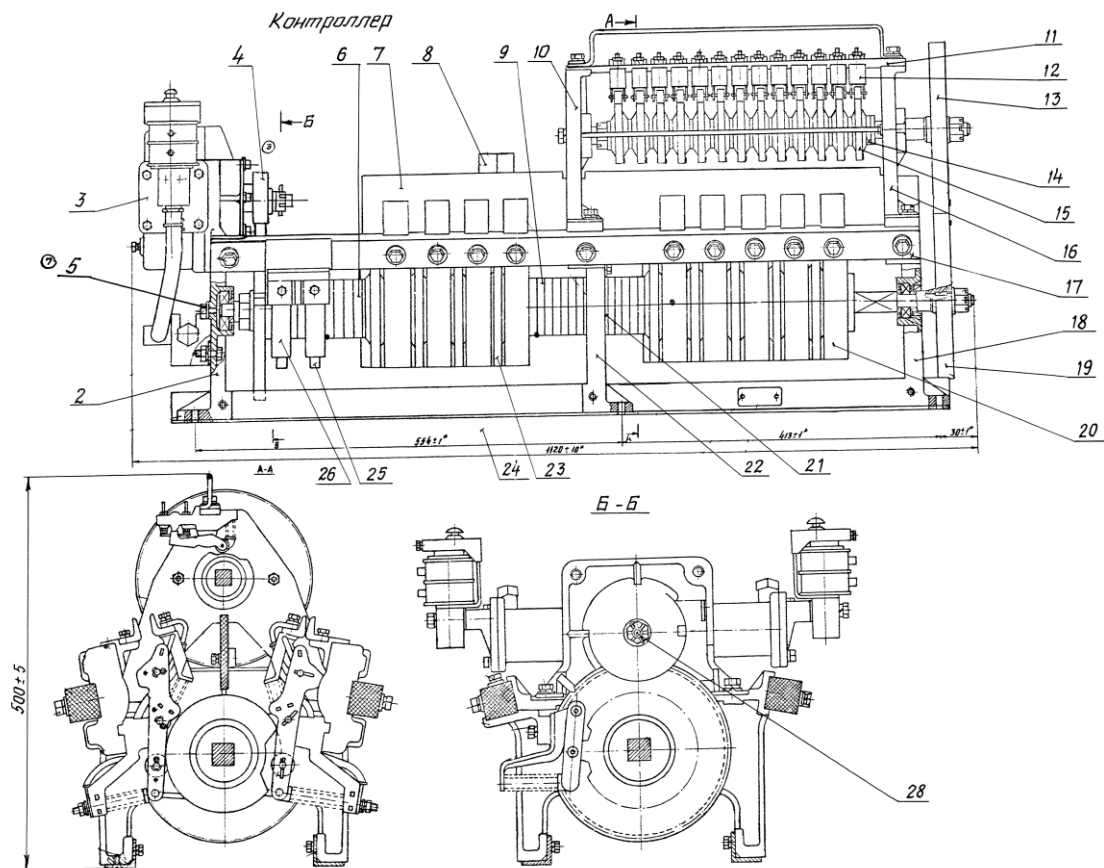


Рисунок 2.3 Силовий контролер

При підключенні ТЕД на повну напругу, подальше регулювання швидкості забезпечується ослабленням їхнього магнітного поля. Для цього паралельно обмоткам збудження двигунів підключаються R4, ..., R9.

Процесом автоматичного пуску електропоїзда управляє електронне реле прискорення з безконтактним переключенням котушок електропневматичних вентилів ГК1 і ГК2 приводу силового контролера (рис.2.2). Реле прискорення виконує автоматичний ступінчастий пуск у залежності від величини струму в колі ТЕД з одночасним контролем часу.

Дозвіл на переключення контролера видається при виконанні двох умов:

- струм якоря ТЕД менший струму уставки блока реле прискорення БРУ;

- інтервал часу від моменту включення тяги або попереднього дозволу до моменту формування нового повинен бути більшим уставки часової затримки (як правило близько 1 с).

При поверненні контролера на першу позицію струм відсутній, тому час повернення контролера визначається тільки уставкою часу. Наявність часової затримки забезпечує достатньо плавне наростання тягового зусилля та виключає пропущення позицій і знижує ймовірність виникнення надлишкового проковзування колісних пар електропоїзда.

Розглянемо більш детально особливості регулювання напруги живлення тягових електродвигунів в режимі тяги.

Як вже зазначалось, в електропоїздів типу ЕПЛ9Т та ЭР9Т регулювання напруги здійснюється на стороні вторинної обмотки трансформатора. Виводи обмоток трансформатора за допомогою силового контролера (рис.2.3) по заданому алгоритму підключаються до випрямної установки. Випрямна установка виконана з додатковими ланками, як це показано на рис.2.4 та 2.5. Це дає змогу уникнути замикання виводів вторинної обмотки при перемиканні обмоток.

Цей процес регулювання називають вентильним регулюванням або діодним.

На рис.2.4 -2.5 дана схема живлення тягових двигунів однієї секції від обмотки трансформатора на 2-й та 3-й позиціях силового контролера.

а) в перший півперіод: від виводу 7 трансформатора, через контактори 1, 11 діоди VD6, VD5, електричні двигуни M1-M4, VD7, вивід 8 трансформатора;

б) в другий півперіод: від виводу 8 трансформатора, VD8, електричні двигуни M1-M4, VD1, VD3, через контактори 1, вивід 7 трансформатора.

На третій позиції замкнуті контактори (1, 2, 11). Напруга на двигунах підвищується.

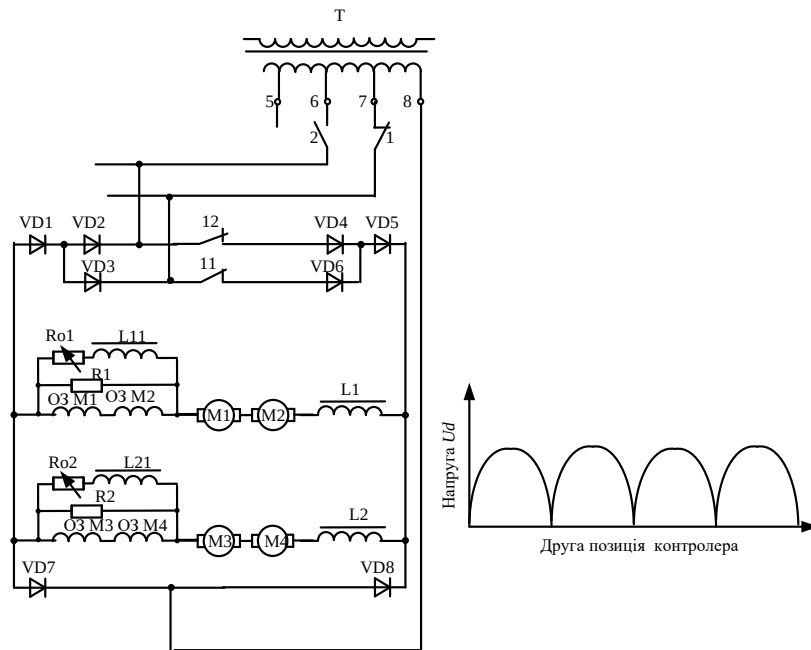


Рисунок 2.4- Регулювання напруги на тягових двигунах електропоїздів ЕПЛ 9Т на другій позиції головного контролера та діаграма напруги

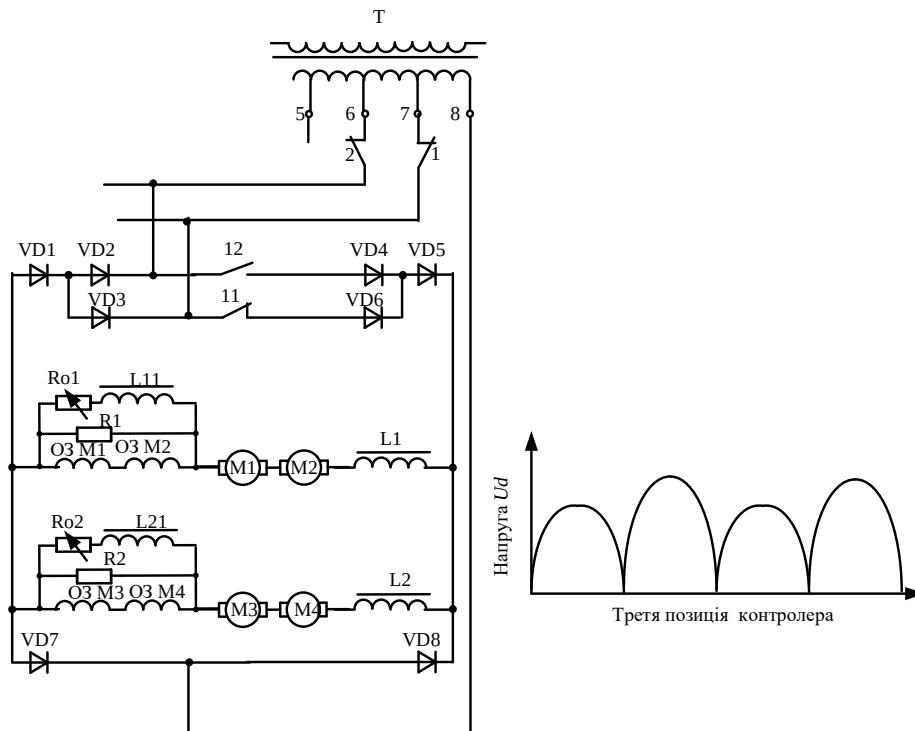


Рисунок 2.5- Регулювання напруги на тягових двигунах електропоїздів ЕПЛ 9Т на третій позиції головного контролера та діаграма напруги

На третій позиції струм протікає:

а) в перший півперіод: від виводу 7 трансформатора, через контактори 1, 11 діоди VD6, VD5, електричні двигуни M1-M4, VD7, вивід 8 трансформатора;

б) в другий півперіод: від виводу 8 трансформатора, VD8, електричні двигуни M1-M4, VD1, VD2, через контактори 2, вивід 6 трансформатора.

В перший півперіод на третій позиції до випрямної установки прикладена напруга двох секцій тягової обмотки трансформатора, струм спрямовано від виводу 6 до виводу 8, а у другий півперіод на двигуни подається напруга тільки однієї секції обмотки трансформатора, струм спрямовано від виводу 8 до виводу 7. Діоди переходу, VD4 розірвано контактором (12). Ця позиція відрізняється підвищеною пульсацією, тому що в перший півперіод напруга на двигунах дорівнює напрузі двох секцій обмотки трансформатора, а в другий півперіод — напрузі однієї секції.

Підвищену пульсацію через нерівність підведеної напруги в різні півперіоди мають всі наступні непарні позиції до п'ятнадцятої включно. Ці позиції використовують тільки як перехідні в процесі пуску.

Подальший процес підвищення напруги на тягових двигунах до шістнадцятої позиції аналогічний описаному вище: на непарних позиціях розімкнутий один з контакторів 11 або 12, і здійснюється несиметричний режим випрямлення з підвищеною пульсацією, а на парних позиціях контактори 11, 12 замкнуті, і здійснюється випрямлення з нормальною пульсацією струму. На 16-й позиції випрямний міст виявляється включеним на повну напругу всіх восьми секцій обмотки нижчої напруги трансформатора. Характер зміни електричних параметрів (струму збудження (I_z) та струму якоря (I_a) тягових електродвигунів M1, M2 моторного вагону) в умовах рядової експлуатації при пуску електропоїзда ЕПЛ9Т приведено на рис.2.6 [1].

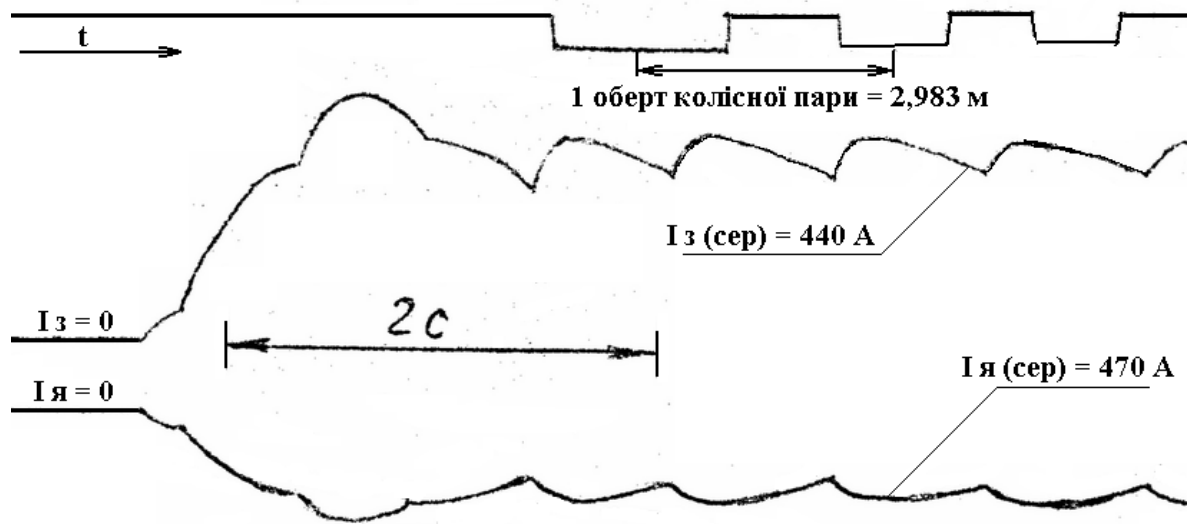


Рисунок 2.6 Осцилографічний запис зміни електричних параметрів (струму збудження (I_z) та струму якоря (I_y) тягових електродвигунів М1, М2 моторного вагону) при пуску електропоїзда ЕПЛ9Т в умовах рядової експлуатації[1]

Що стосується режиму електричного гальмування, то включення електричного гальмування [1] (див. рис.2.2) відбувається при переведенні контролера машиніста КМ в одне з 4 –х гальмівних положень (див. табл.2.2). При цьому обмотки збудження тягових електричних двигунів з'єднуються послідовно і підключаються до тиристорного не повністю керованого випрямляючого мосту, що складається з двох тиристорів Т15, Т16 і двох діодів Д15, Д16 (рис.2.2). Якорі ТЕД з'єднані в два незалежних контури, у кожний із яких уведені гальмівні резистори відповідно R30, R32, R34, R36, R38 та R31, R33, R35, R37, R39.

Автоматичне реостатне гальмування здійснюється до 16 км/год за допомогою системи управління реостатним гальмом СУРТ. СУРТ призначена для регулювання струму якоря ТЕД при різних значеннях опору гальмівних

резисторів та для підтримання струму збудження ТЕД постійним при досягненні ним заданого значення. При досягненні струмом збудження заданого значення (найбільший струм збудження ТЕД – 200 А) система видає сигнал на перехід тормозного контролера (ТК) на наступну позицію (опір гальмівних резисторів гальмівного контуру змінюється від 5,39 до 0,95 Ом. Число ступенів гальмівного резистора - 7). Можливі уставки струму якорів ТЕД в залежності від положення контролера машиніста (КМ), ТК та початкової швидкості гальмування електропоїзда приведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – можливі уставки струму якорів ТЕД в залежності від положення КМ, ТК та початкової швидкості гальмування електропоїзда

Положення КМ	Позиція ТК	Швидкість, км/год	Уставка струму якоря, А
1	3 ... 11	не нормується	100±20
2	3 ... 11	не нормується	250±10
3	3 ... 11	більша 95	300±10
3	3 ... 11	менша 95	320±10
4	3	більша 95	300±10
4	3	менша 95	400±15
4	4 ... 6	менша 95	430±15
4	7 ... 11	менша 95	500±15

Осцилографічний запис зміни електричних параметрів при електричному (реостатному) гальмуванні електропоїзда ЕПЛ9Т показано на рис.2.7 [1].

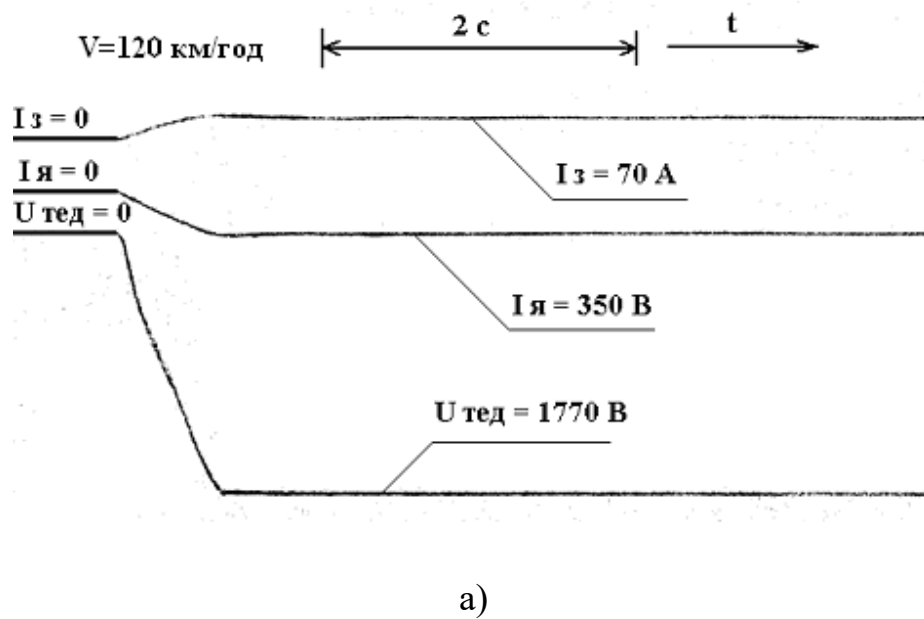
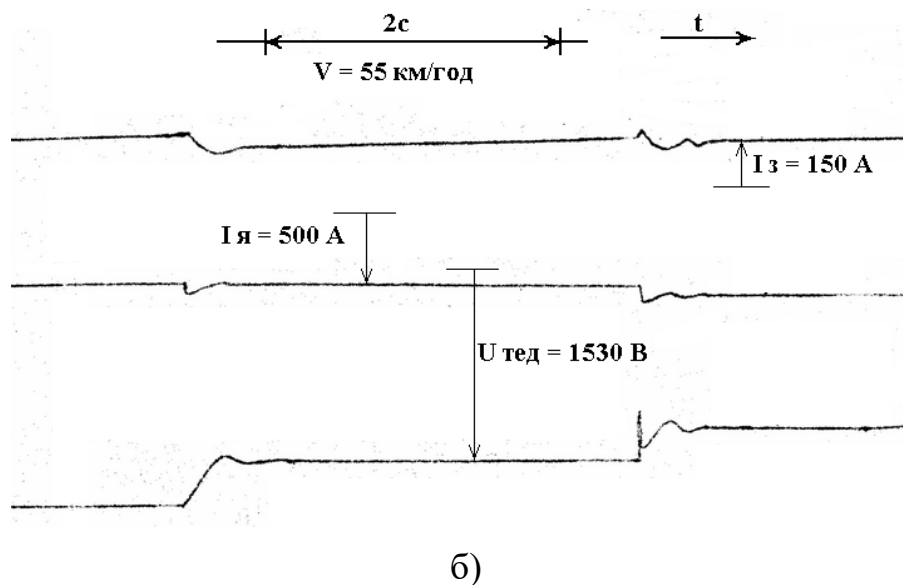


Рисунок 2.7 Осцилографічний запис зміни електричних параметрів(струму збудження (I_z), струму якоря ($I_{\text{я}}$), напруги ($U_{\text{тед}}$) тягових електродвигунів М1, М2 моторного вагону) при електричному (реостатному) гальмуванні електропоїзда ЕПЛ9Т: а - початок гальмування зі швидкості 120 км/год; б – фрагмент процесу гальмування зі зміною величини опору гальмівного резистора.

Таким чином, в режимі реостатного гальмування регулювання величини гальмівного зусилля відбувається шляхом регулювання струму збудження тягових електричних двигунів, та величини опору гальмівних резисторів. На рис.2.8 приведена спрощена силова схема тягового електроприводу.

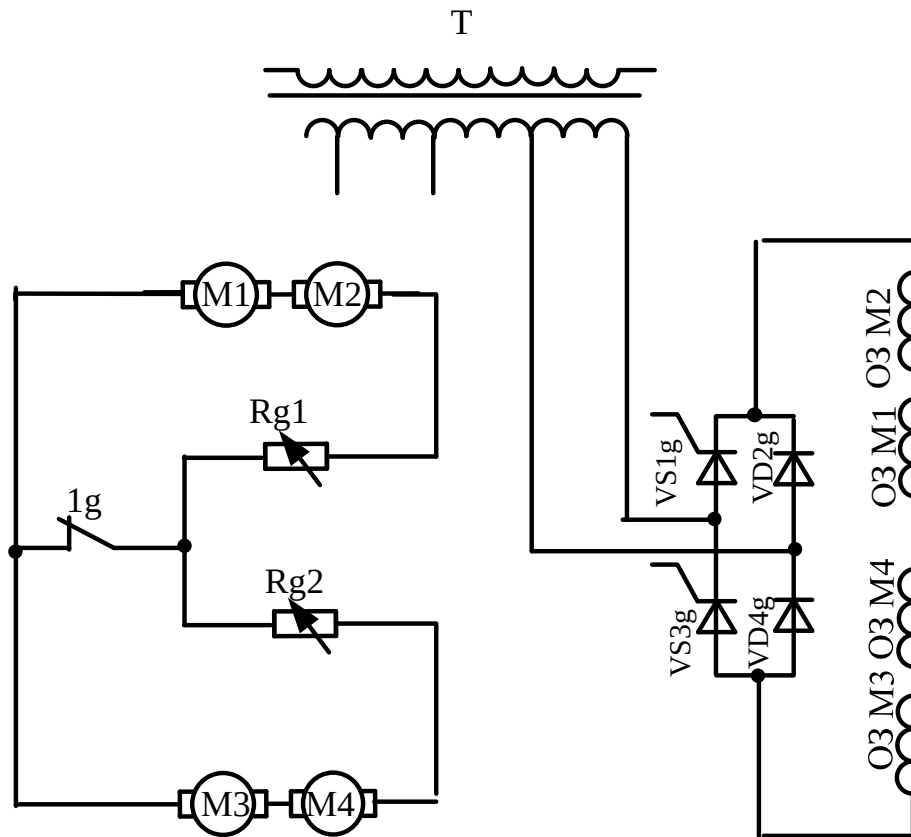


Рисунок 2.8 Спрощена силова схема тягового електроприводу в режимі реостатного гальмування

Аналізуючи дану схему та беручи до уваги технічний рівень основних елементів можна зазначити, що:

1) використання тиристорного моста з системою імпульсно – фазовим управлінням для регулювання струму збудження не має суттєвих зауважень і може бути застосовано в подальшому;

2) використання силового електромеханічного контролера для регулювання величини опору гальмівного резистора не забезпечує плавність його зміни, а сам контролер потребує значних витрат для підтримання його в задовільному стані. Силовий контролер являє собою складну електричну й механічну систему, що потребує при виготовленні значну кількість відповідного, не уніфікованого оснащення. Враховуючи вище зазначене, та незначну їх кількість для оснащення електропоїздів, виготовлення даного складного специфічного обладнання іншим виробником мало ймовірне;

3) система управління режимом гальмування виконана на застарілій елементній базі і потребує заміни;

4) існуюча штатна схема реостатного тормоза не забезпечує ефективне гальмування в області малих швидкостей руху.

На рис.2.9 приведено спрощено тягові та гальмівні характеристики при штатній схемі тягового електроприводу.

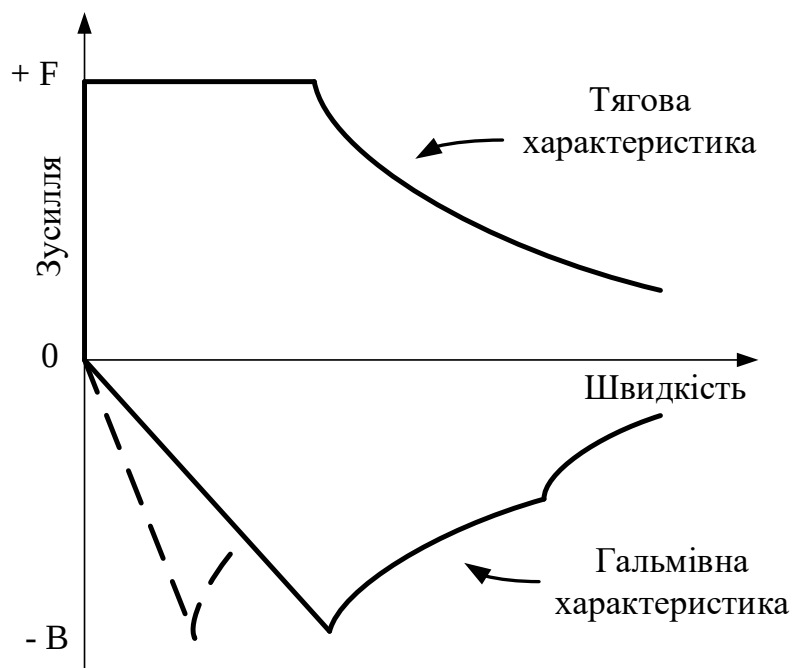


Рисунок 2.9 Тягові та гальмівні характеристики при штатній схемі тягового електроприводу

В рамках проведення аналізу систем тягового електроприводу рухомого складу та визначення основних напрямків його удосконалення розглянемо можливість застосування накопичувачів енергії. На рис.2.10 - рис.2.13 проілюстровано схематично протікання енергообмінних процесів при застосуванні штатного тягового електроприводу та електроприводу з бортовим накопичувачем енергії, де прийнято наступні позначення:

- ТПА (ТПВ) – тягова підстанція;
- ЕРС – електричний рухомий склад;
- НК – накопичувач енергії;
- $\Delta A_{\text{ТПА}}$ ($\Delta A_{\text{ТПВ}}$) - енергетичні втрати у ТПА (ТПВ);
- $\Delta A_{\text{ТМА}}$ ($\Delta A_{\text{ТМВ}}$) - енергетичні втрати у тяговій мережі;
- $\Delta A_{\text{ЕРС}}$ - енергетичні втрати в ЕРС

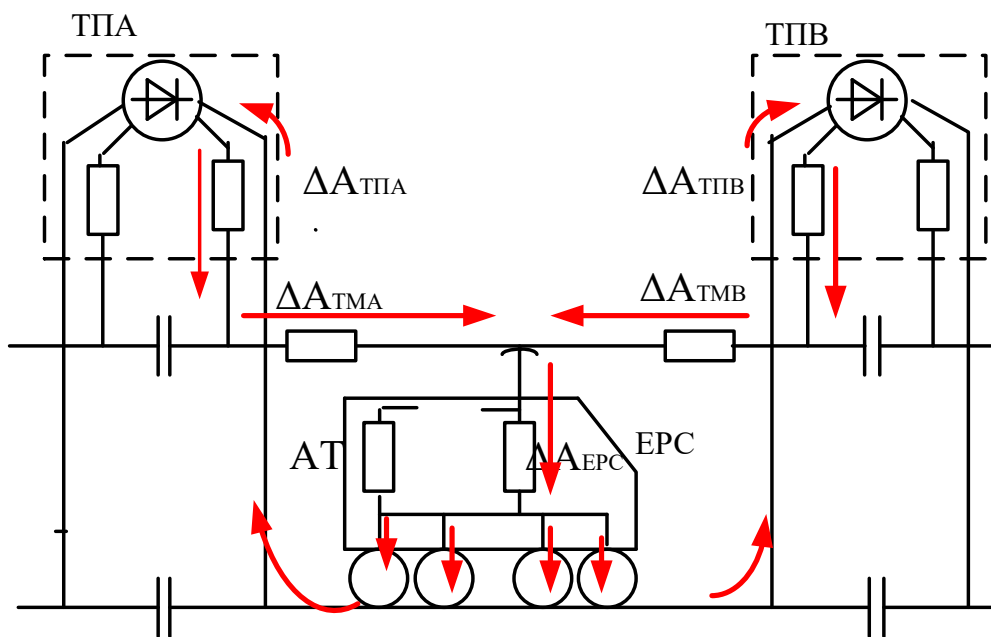


Рисунок 2.10 - Спрощена функціональна схема протікання енергообмінних процесів в тяговій енергосистемі при штатному тяговому електроприводі.

Режим тяги

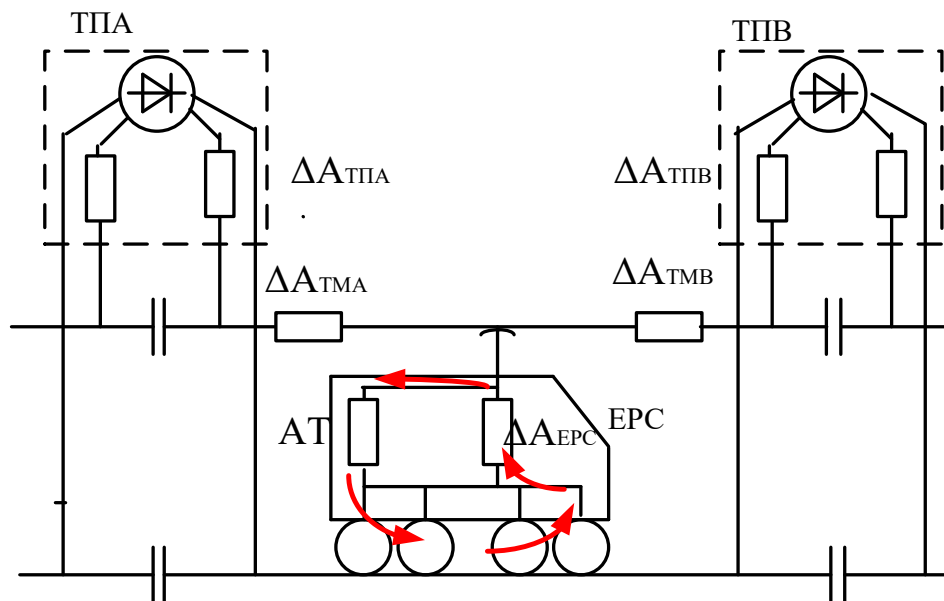


Рисунок 2.11 - Спрощена функціональна схема протікання енергообмінних процесів в тяговій енергосистемі при штатному тяговому електроприводі.

Режим електричного гальмування (реостатного)

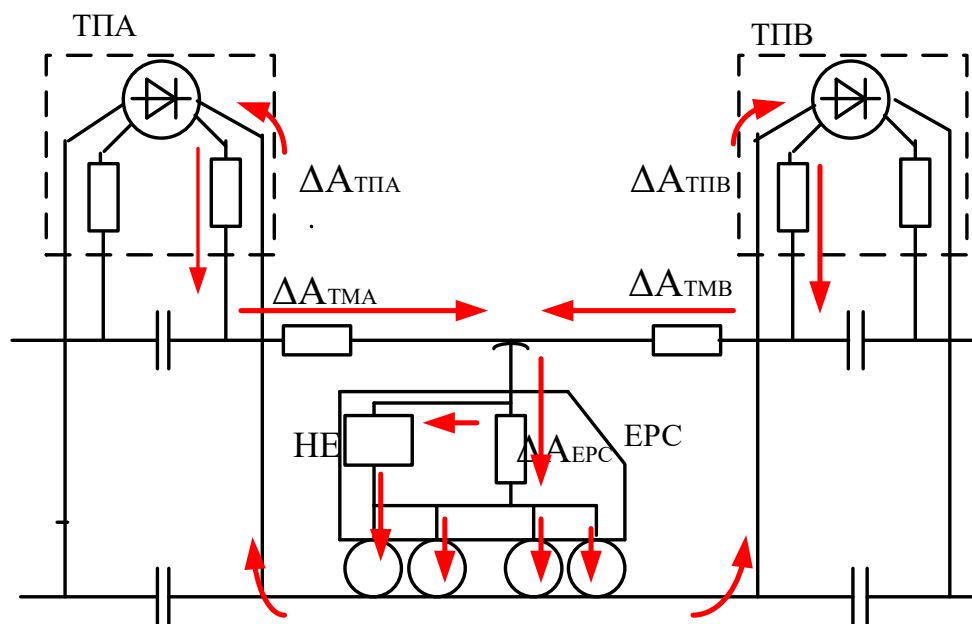


Рисунок 2.12 - Спрощена функціональна схема протікання енергообмінних процесів в тяговій енергосистемі при тяговому електроприводі з бортовим накопичувачем. Режим тяги

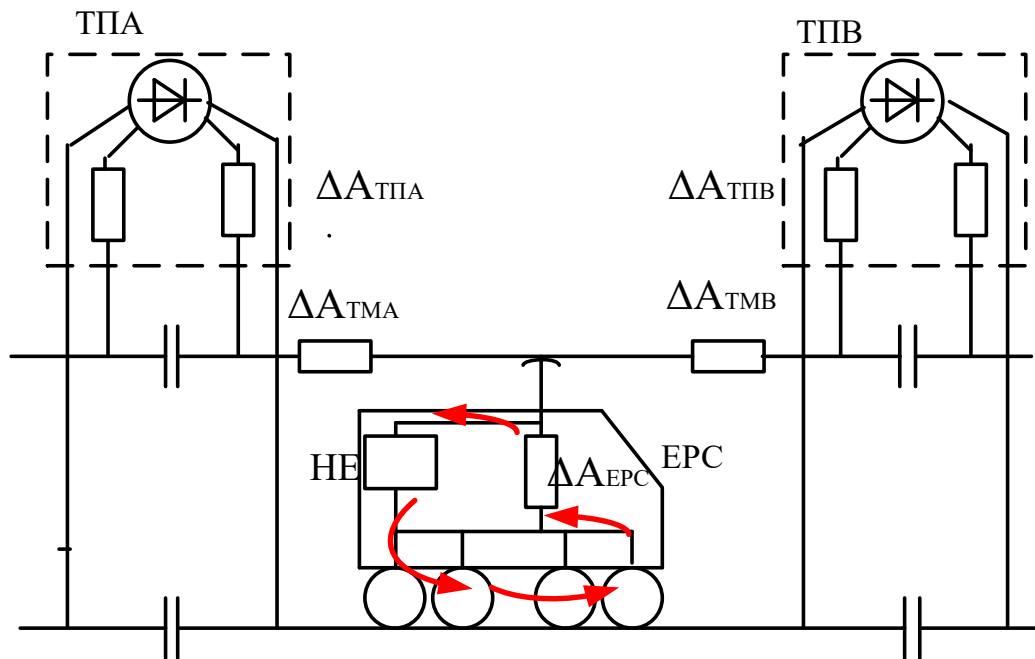


Рисунок 2.13 - Спрощена функціональна схема протікання енергообмінних процесів в тяговій енергосистемі при тяговому електроприводі з бортовим накопичувачем. Режим електричного гальмування

Як видно з рисунків, при застосуванні бортових накопичувачів є можливість повторного використання енергії, яка генерується при гальмуванні.

Для вибору варіанта схеми модернізації розглянемо два варіанти систем:

- систему, прототипом якої є штатна, яка забезпечує ефективне гальмування у всьому швидкісному діапазоні з виключенням силового електромеханічного комутатора;
- система з бортовим накопичувачем енергії.

3 Удосконалення системи електричного реостатного гальмування рухомого складу

3.1 Принципи побудови системи електричного реостатного гальмування рухомого складу

Реостатне гальмування існуючого парку електричного моторвагонного рухомого складу базується на перетворенні кінетичної енергії поїзду в теплову, яка виділяється на гальмівних резисторах. Тягові електричні двигуни, що працюють в режимі генератора постійного струму, підключені на відповідні гальмівні резистори.

Реостатне гальмування використовується в різних режимах. При уповільненні руху поїзда, підгальмовуванні на схилах. Для швидкого уповільнення використовується реостатне гальмування з реалізацією максимальної потужності. На малих швидкостях руху гальмівне зусилля знижується. Тому при швидкості нижчої певного значення відбувається перехід від реостатного гальмування до пневматичного.

Властивості реостатного гальмування визначаються в основному регулятором управління. При розробці регулятора управління необхідно враховувати і механічні властивості всього поїзда. Поїзд є джерелом сили гальмування, й має значну масу. Вагони поїзда з'єднанні між собою за допомогою зчіпного пристрою який характеризується певною жорсткістю, зазором, ..Таким чином, поїзд являє собою довгу лінію з розосередженими параметрами. Виходячи з цього, можливим є те, що при різкій зміні гальмівного зусилля на вході можуть виникнути ударні хвилі, викликані відбиттям на виході. Ці хвилі являють собою поштовхи моменту, які підвищують механічне напруження в зчіпному механізмі вагонів. А також впливають на режим роботи моторвагонного рухомого складу. Для

упередження виникнення поштовхів в поїзді необхідно обмежувати швидкість зміни моменту на ободі колісної пари. Обмеження швидкості зміни гальмівного моменту є важливим завданням управління процесом гальмування.

Регулятор управління повинен забезпечувати заданий коефіцієнт використання зчіпної ваги за рахунок наявності ефективної системи виявлення і усунення надлишкового проковзування та мінімізації втрати гальмівного зусилля.

На електричному моторвагонному рухомому складі передбачається реалізація системи управління на базі мікропроцесорного контролера, яка включатиме в себе елементи як селективного регулювання, так і з підлеглими контурами.

Системи з підлеглими контурами регулювання отримали широке поширення, особливо в системах управління електроприводами, завдяки простоті обмеження параметрів що регулюються, уніфікації регуляторів та їх розрахунків.

З розвитком нової елементної бази з'явилась можливість використання і інших принципів побудови систем автоматичного регулювання і тим самим забезпечити виконання більш високих вимог до систем електричного моторвагонного рухомого складу.

З врахуванням сказаного і пропонується система автоматичного регулювання тяговим електроприводом в режимі реостатного гальмування, яка органічно включає в себе як елементи селективного, так і підлеглого способу регулювання параметрів. За допомогою підлеглих контурів в даній системі передбачається регулювання струму збудження та струму якоря тягових електродвигунів. Зовнішнім контуром планується контур регулювання гальмівного зусилля.

Система автоматичного регулювання забезпечує стабілізацію величини гальмівного зусилля, обмеження струму збудження та якоря тягових електродвигунів.

Для забезпечення регулювання по даним параметрам в системі автоматичного регулювання передбачено наявність логічного елемента в вигляді елемента в виділені мінімального сигналу. На вхід логічного елемента поступають сигнали з контурів регулювання максимального струму якоря тягових електродвигунів, а також завдання тягового зусилля.

Захист від надлишкового проковзування організовано таким чином що він впливає на величину завдання тягового зусилля.

Враховуючи особливість побудови силової схеми тягового електроприводу в режимі реостатного гальмування, а саме, якоря тягових електричних двигунів підключенні до гальмівних реостатів, а обмотки збудження з'єднанні послідовно і підключені до статичного випрямляча. Регулювання відбувається по одному тяговому двигуну.

Синтез системи автоматичного регулювання по заданим показникам якості регулювання (задана швидкодія при мінімальному пере регулюванні, з забезпеченням стійкості) реалізується включенням в її контур регулювання коригуючих пристроїв.

На рис. 3.1 приведена функціональна схема системи автоматичного регулювання в режимі реостатного гальмування. Система автоматичного регулювання забезпечує гальмування до зупинки, гальмування з заданим гальмівним зусиллям, захист від надлишкового проковзування.

В режимі реостатного гальмування створюване гальмівне зусилля обмежується потужністю гальмівних резисторів, комутаційною можливістю тягових електродвигунів та максимальним струмом їх збудження.

Регулювання режимів реостатного гальмування забезпечується трьох контурною системою, яка складається з контурів регулювання струму збудження та якоря тягових електродвигунів, регулювання гальмівного зусилля.

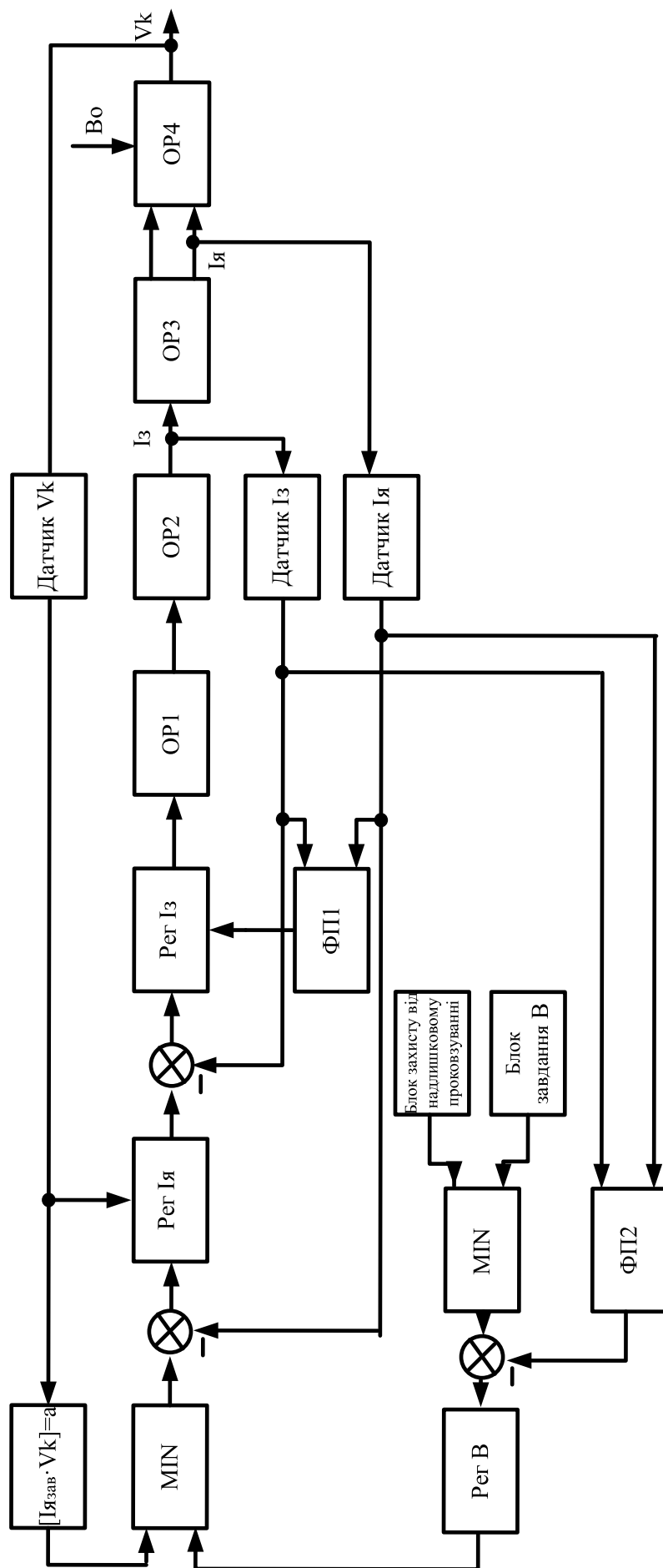


Рисунок 3.1 Функціональна схема системи автоматичного керування реостатного гальмування

Вхідними сигналами регуляторів є сигнали з датчиків:

- Датчик I_a – датчик струму якоря;
- Датчик I_z – датчик струму збудження;
- Датчик V_k – датчик швидкості колісної пари.

Крім вище вказаних сигналів зворотних зв'язків, вхідними сигналами регуляторів є:

- сигнал завдання величини гальмівного зусилля, який визначається як мінімальний сигнал з сигналів «Блока захисту від надлишкового проковзування» та «Блока завдання В»;
- сигнал завдання струму якоря тягового електричного двигуна, який визначається як мінімальний сигнал з сигналів з виходу регулятора «Рег В» та сигналу визначення максимального струму якоря тягового електричного двигуна за умовами комутації (вихідний сигнал блоку « $[I_{зав} \cdot V_k] = a$ »);
- сигнал завдання струму збудження тягового електричного двигуна, який є вихідним сигналом «Рег I_a ».

3.2 Об'єкт регулювання системи реостатного тормоза

3.2.1 Випрямляч

Систему випрямляча можна розглядати як систему, яка складається з системи управління та самого випрямляча.

Вхідною величиною системи є сигнал управління, а вихідною е.р.с. випрямляча. В режимі, коли кут регулювання α не змінюється, вихідну величину випрямляча можна подати у вигляді двох складових – постійної та змінної. Постійна складова, яка є корисним сигналом, визначається за формулою

$$E_d = \frac{m}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} + \alpha} E_{\phi m} \cdot \sin \omega_0 \cdot t d(\omega_0 \cdot t) = E_{dm} \cdot \cos \alpha,$$

де E_{dm} – максимальна значення випрямленої е.р.с. випрямляча при куті управління рівному нулю

$$E_{dm} = (E_{\phi m} / (\pi/m)) \cdot \sin(\pi/m);$$

$E_{\phi m}$ – амплітудне значення фазної е.р.с. випрямляча;

m - число фаз перетворювача;

ω_0 - кругова частота живлення напруги живлення.

Змінна складова е.р.с. випрямляча $E_{\sim}$, яка грає роль перешкоди, має склад гармонік, які визначаються кутом α

$$E_{\sim} = \sum_{k=1}^{\infty} E_{km} \cdot \sin(k \cdot m \cdot \omega_0 \cdot t + \varphi_k),$$

де E_{km} – амплітудна е.р.с. k -ї гармоніки;

φ_k – фазовий зсув k -ї гармоніки відносно моменту відкриття вентиля

$$E_{km} = \frac{2 \cdot E_{dm}}{(k \cdot m)^2 - 1} \cdot \sqrt{\cos^2 \alpha + (k \cdot m)^2 \cdot \sin^2 \alpha}$$

$$\varphi_k = -\arctg\left(\frac{1}{k \cdot m \cdot \tg \alpha}\right)$$

В подальшому, при розробці та дослідженні алгоритму розглядатиметься тільки постійна складова е.р.с. Змінну складову необхідно враховувати в основному як фактор високочастотних перешкод. Також слід виходити з того, що характеристика системи управління є арккосинусоїдальною

$$\alpha = \arccos U^0_y$$

Це дозволить розглядати характеристику випрямляча як лінійну. На рис.3.2 показано статичну характеристику керуемого випрямляча.

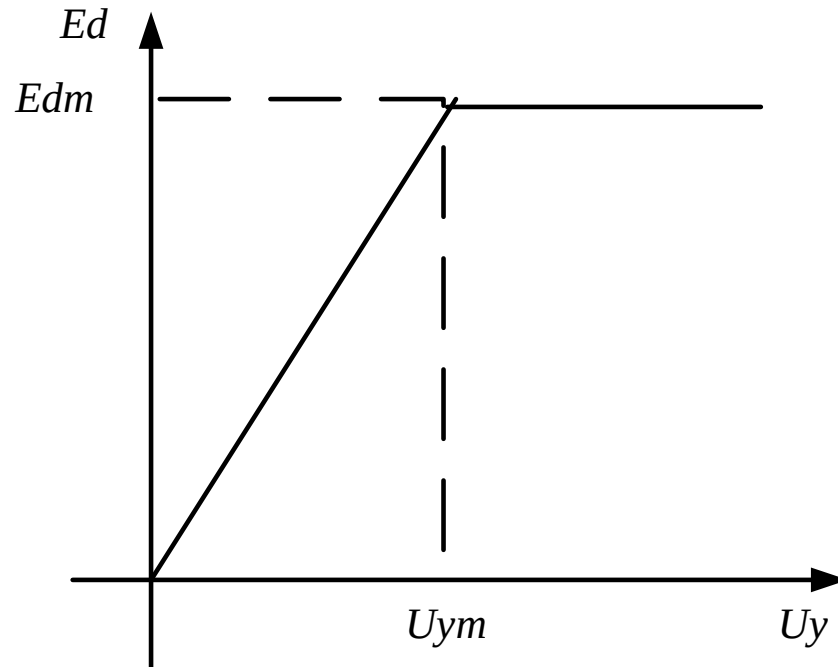


Рисунок 3.2 Статична характеристика керуемого випрямляча

Передавальна функція випрямляча з системою його управління як ланки чистого запізнювання має вид

$$W_g(p) = U_z / U_d = K_g \cdot e^{p\tau} / (T_\phi \cdot p + 1)$$

де $\tau = 1/(m \cdot f)$

m – фазність напруги;

f – частота напруги живлення;

T_ϕ – фільтр системи фазового управління.

Ланку чистого запізнювання $e^{p\tau}$ при полосі частот що розглядаються можна апроксимувати аперіодичною ланкою $1/(\tau p + 1)$.

Для спрощення добуток двох аперіодичних ланок можна замінити на аперіодичну ланку з сталою часу

$$Tg = T\phi + \tau.$$

Перевіримо дане судження шляхом моделювання в програмному середовищі MATLAB. На рис.3.3 та рис.3.4 приведено моделі, де передавальна функція випрямляча представлена в виді:

$$a) \frac{1}{(T\phi + \tau)s + 1},$$

$$б) \frac{1}{T\phi s + 1} \cdot e^{-\tau s}$$

$$в) \frac{1}{T\phi s + 1} \cdot \frac{1}{\tau s + 1}$$

при $Tg = T\phi + \tau$ для чотирьох випадків:

$$T\phi = 0,9Tg, \quad \tau = 0,1Tg$$

$$T\phi = 0,75Tg, \quad \tau = 0,25Tg$$

$$T\phi = 0,5Tg, \quad \tau = 0,5Tg$$

$$T\phi = 0,25Tg, \quad \tau = 0,75Tg$$

Результати моделювання приведені на рис.3.5 – 3.8

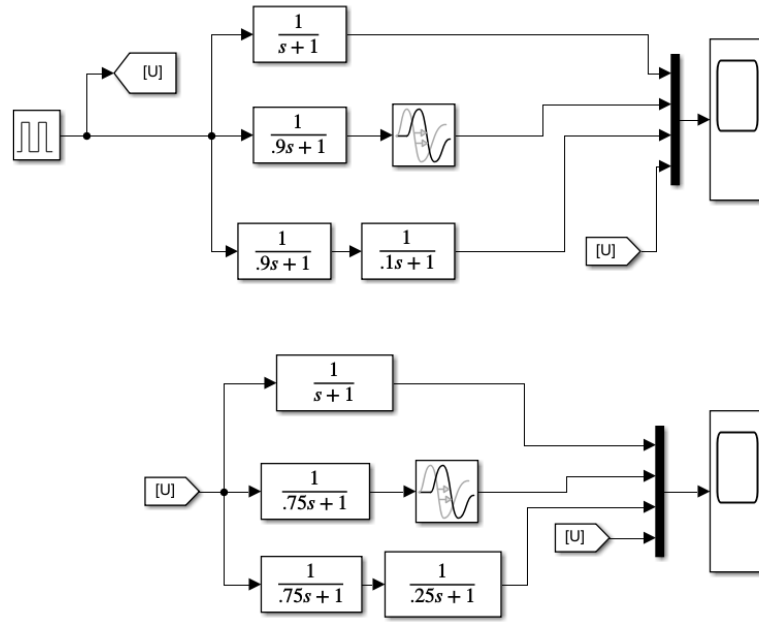


Рисунок 3.3 Моделі передавальної функції випрямляча при $T\phi=0,9Tg$, $\tau=0,1Tg$ та $T\phi=0,75Tg$, $\tau=0,25Tg$

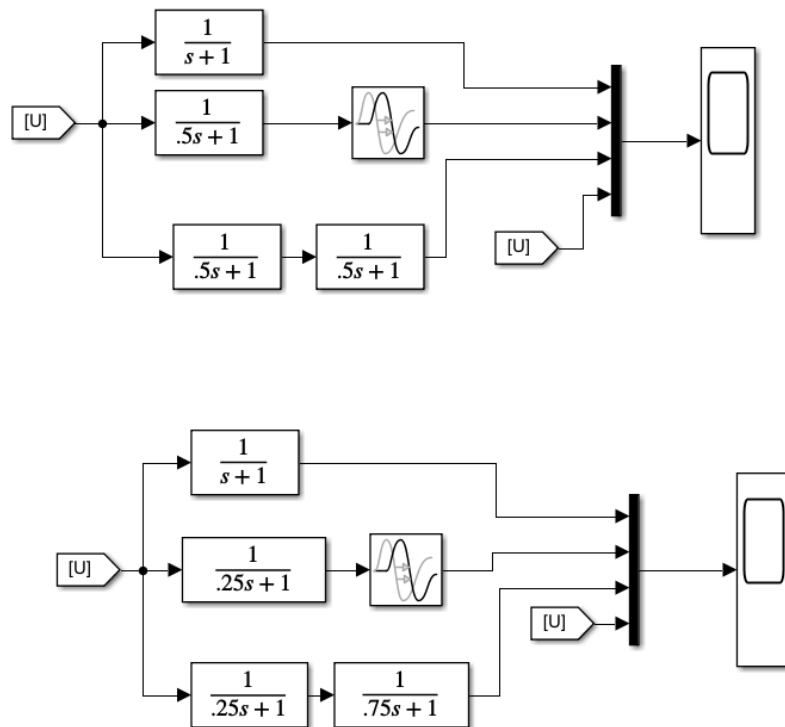


Рисунок 3.4 Моделі передавальної функції випрямляча при $T\phi=0,5Tg$, $\tau=0,5Tg$ та $T\phi=0,25Tg$, $\tau=0,75Tg$

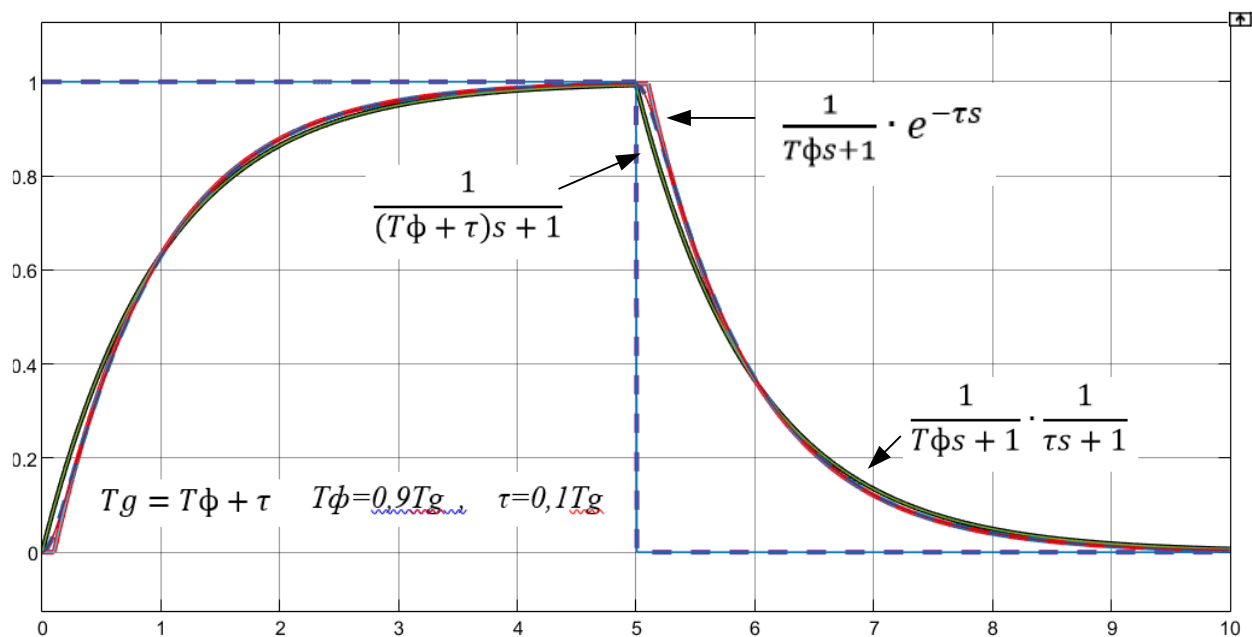


Рисунок 3.5 Перехідний процес на виході випрямляча при ступінчатій зміні вхідного сигналу. Передавальні функції і їх параметри приведені на осцилограмі

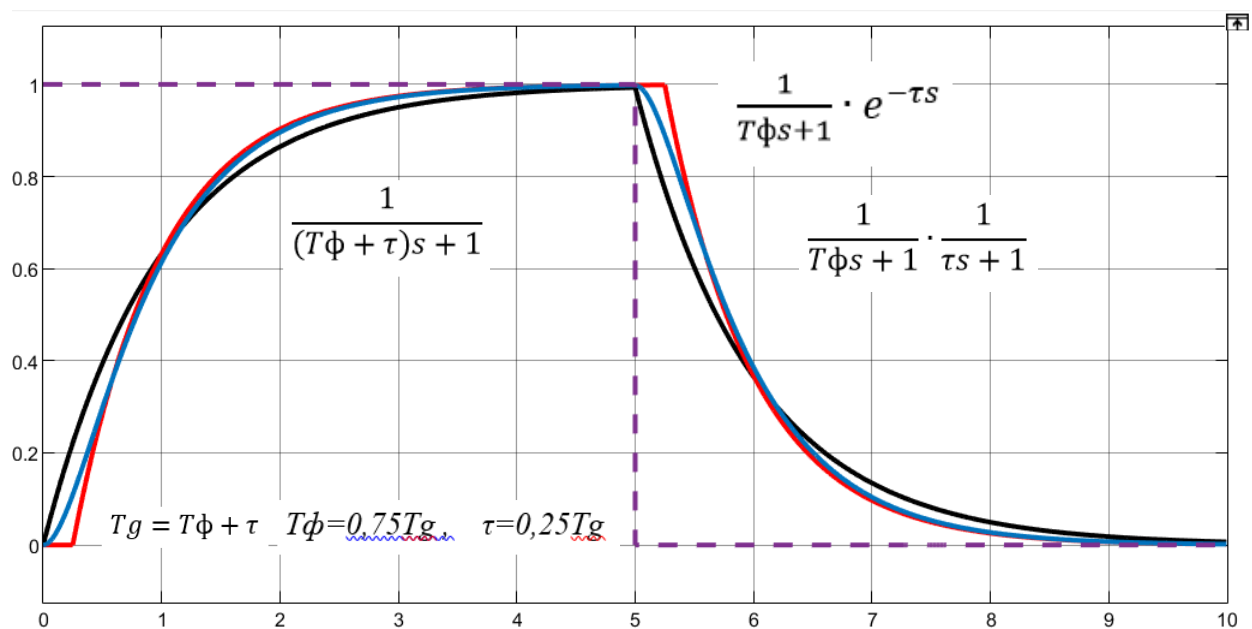


Рисунок 3.6 Перехідний процес на виході випрямляча при ступінчатій зміні вхідного сигналу. Передавальні функції і їх параметри приведені на осцилограмі

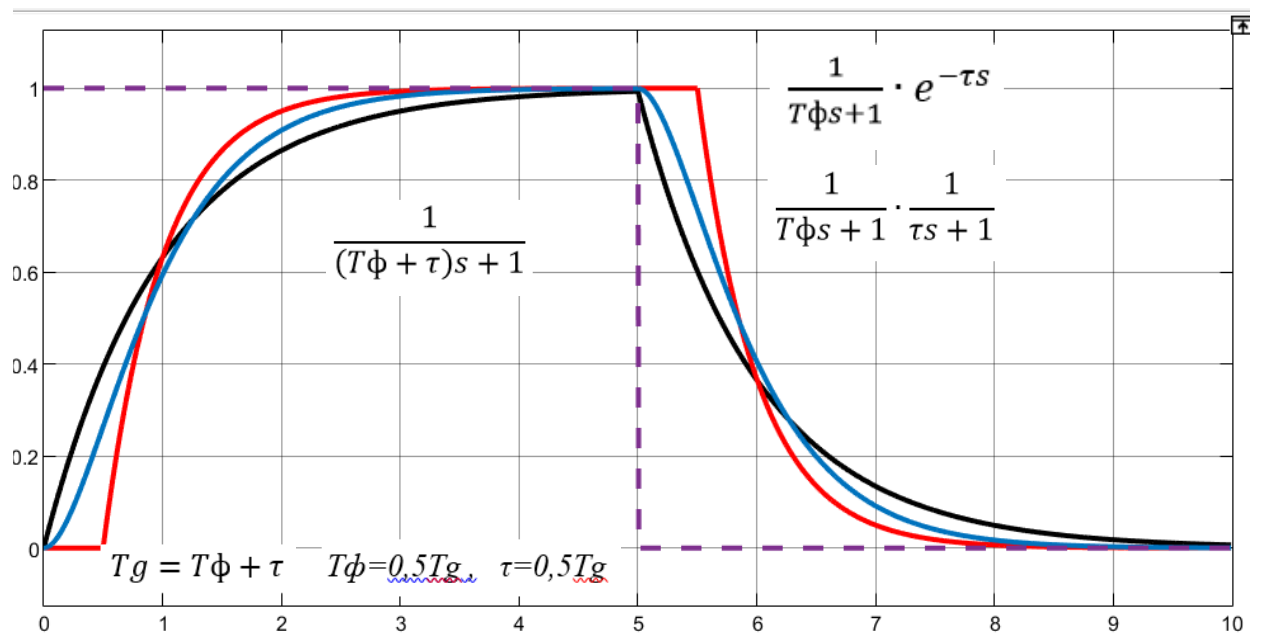


Рисунок 3.7 Перехідний процес на виході випрямляча при ступінчатій зміні вхідного сигналу. Передавальні функції і їх параметри приведені на осцилограмі

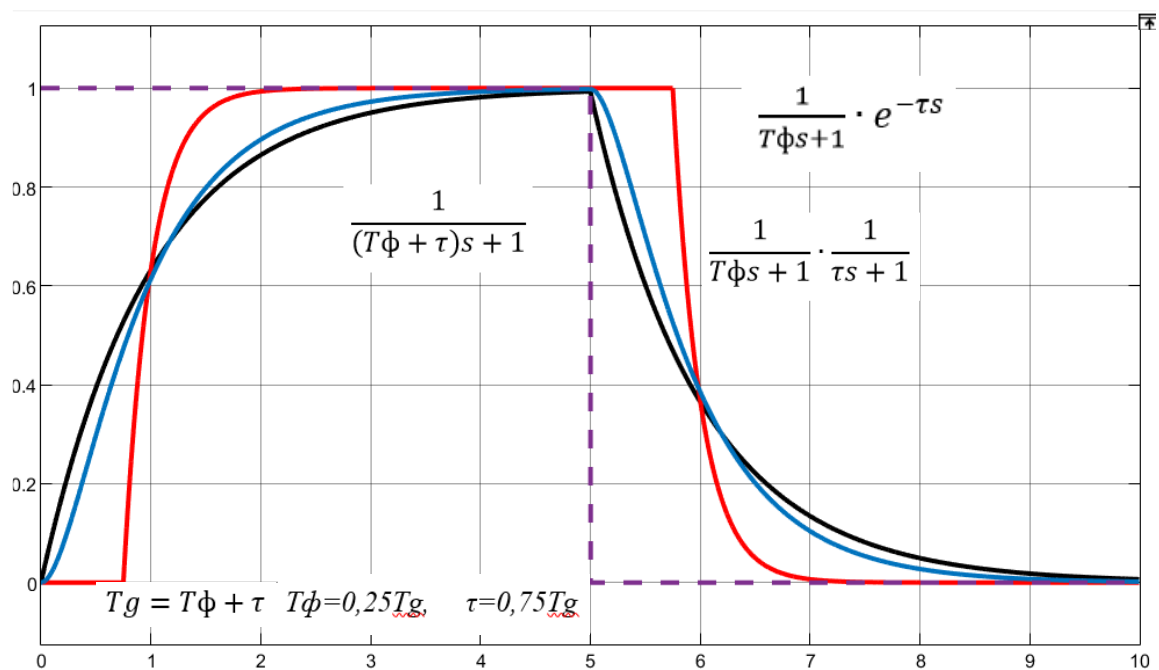


Рисунок 3.8 Перехідний процес на виході випрямляча при ступінчатій зміні вхідного сигналу. Передавальні функції і їх параметри приведені на осцилограмі

Провівши аналіз результатів моделювання , можна зробити висновок, що передавальну функцію випрямляча можна розглядати у вигляді

$$W_g(p)=U_z/U_d=K_g/(T_g \cdot p+1),$$

де $T_g = T_\phi + \tau$ при умові, що $\tau < 0,3 T_\phi$.

3.2.2 Тяговий електричний двигун – колісна пара

Об'єкт тяговий електричний двигун – колісна пара можна представити структурною схемою, яка приведена на рис.3.9.

Передавальна функція обмотки збудження в операторній формі

$$W_{oz}(s)=I_z(s)/U_z(s)= 1/(L_z s + R_z)$$

де R_z – опір кола обмотки збудження, Ом;

L_z – індуктивність кола обмотки збудження, Гн.

Стала часу кола обмотки збудження тягових електродвигунів визначається як

$$T_z = L_z/R_z = 2 \cdot p_0 \cdot \omega_z \cdot C_e \cdot R_z^{-1} \cdot (\Delta(E/\omega))/(\Delta(I_z))$$

де ω_z – кількість витків головного полюса тягового електродвигуна;

p_0 – кількість пар полюсів;

C_e – конструктивна стала

$$C_e = p_0 \cdot N \cdot a^{-1}$$



a – число пар паралельних ниток обмотки якоря;

N – число стержнів обмотки якоря

$(\Delta(E/\omega))/(\Delta(I_z))$ – визначається по характеристикам навантаження тягового електродвигуна. Як правило, $\Delta(E/\omega)/(\Delta(I_z))$ у діапазоні зміну струму збудження від 0 до $(I_z)_{\max}$ змінюється в 3 -4 від максимальної величини до мінімальної.

На рис. 3.10 приведено структурну схему розрахунку струму збудження та вид нелінійної залежності L_z^{-1} від величини струму збудження тягового електродвигуна.

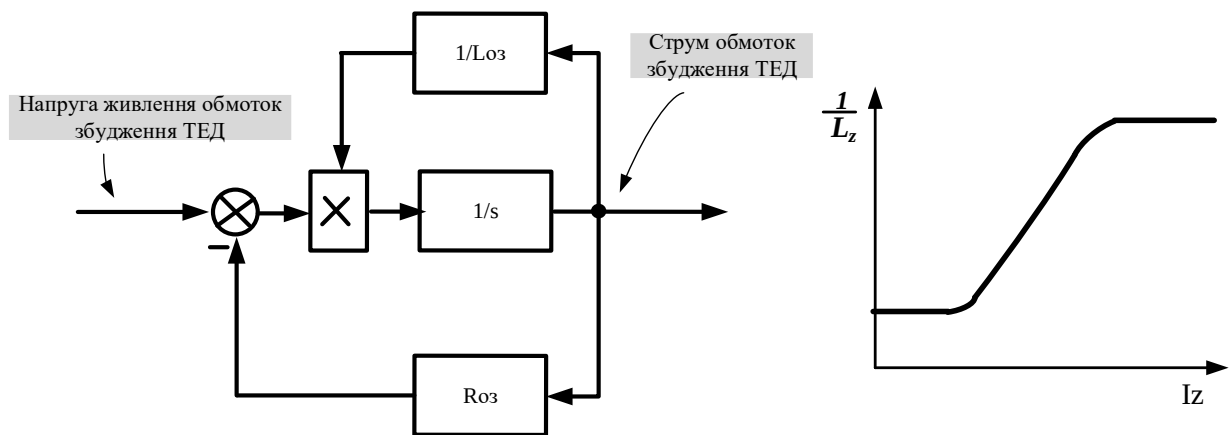


Рисунок 3.10 Структурна схема розрахунку струму збудження та вид нелінійної залежності $L_z^{-1}(I_z)$

Фрагмент структурної схеми розрахунку електричної рушійної сили ТЕД та величини струму якорної ланки приведено на рис. 3.11.

Передавальна функція електричної рушійної сили ТЕД при допущенні що відсутнє надлишкове проковзування колісних пар, тобто $V_k = V$ може матиме лінійну залежність і бути представленою

$$E_d = K_e \cdot V_k \cdot I_z$$

де K_e – перевідний коефіцієнт;
 $V_k = V$ – швидкість руху в м/с;
 I_z – струм обмотки збудження ТЕД, А.

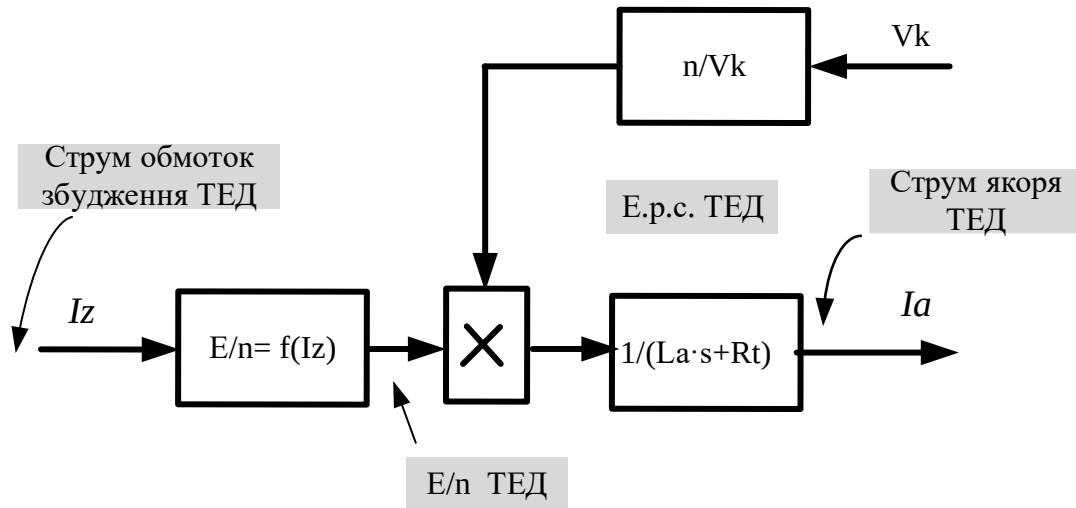


Рисунок 3.11 Фрагмент структурної схеми розрахунку електричної рушійної сили ТЕД та величини струму якорної ланки

Передавальна функція якорної ланки ТЕД в операторній формі

$$W_a(p) = I_a(s) / E_d(s) = (1/R_t) / ((L_a/R_t) \cdot s + 1)$$

де R_t – активний опір якорної ланки;

L_a – індуктивність якорної ланки.

У випадку, якщо величину гальмівного резистора можна змінювати, структурна схема розрахунку величини струму якоря буде мати вигляд, приведений на рис. 3.12.

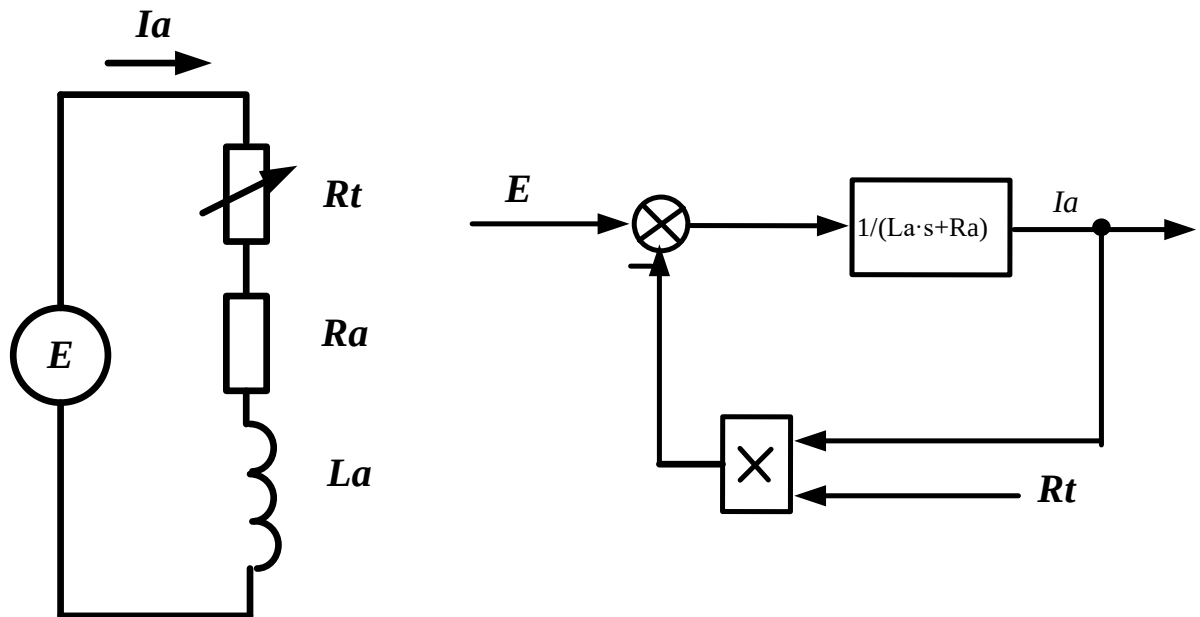


Рисунок 3.12 Схема заміщення та структурна схема розрахунку величини струму якірної ланки при $R_t = \text{var}$

Передавальну функція визначення величини гальмівного зусилля на ободі колісної пари можна розглядати як функцію залежності від добутку струму збудження на струм якоря ТЕД

$$B = K_b \cdot I_a \cdot I_z$$

де K_b – перевідний коефіцієнт.

Передавальна функція визначення швидкості руху

$$V = B \cdot / (m \cdot s)$$

де m – приведена маса поїзда до 1 ТЕД.

3.3 Регулятор системи автоматичного регулювання режимів реостатного гальмування

На рис.3.13 приведена структурна схема розрахунку величини струму збудження та струму якірної ланки ТЕД, а на рис.3.14 - структурна схема двоконтурної системи регулювання по струму збудження та струму якоря тягового електродвигуна.

Передавальну функцію об'єкту регулювання внутрішнім контуром (регулювання струму збудження ТЕД) з врахуванням попередніх зауважень, можна записати у вигляді:

$$W_1(s) = W_g(s) \cdot W_{oz}(s) = [K_g / (T_g \cdot s + 1)] \cdot [(1/R_z) / ((L_z/R_z) \cdot s + 1)]$$

де $L_z/R_z \gg T_g$. $L_z/R_z = 1 \dots 0,3$ с, а $T_g \approx 0,02$ с.

Застосуємо в якості регулятора струму збудження ПІ – регулятор, передавальна функція якого визначатиметься як:

$$W_{pi1}(p) = [T_z \cdot s + 1] / [4 \cdot (1/R_z) \cdot K_g \cdot T_g \cdot s] = T_z / [4 \cdot (1/R_z) \cdot K_g \cdot T_g] + 1 / [4 \cdot (1/R_z) \cdot K_g \cdot T_g \cdot s]$$

де $T_z \gg T_g$.

Визначаємо параметри ПІ – регулятора:

$$K_{m1} = T_z / [4 \cdot (1/R_z) \cdot K_g] = 1 / [4 \cdot 5 \cdot 20 \cdot 0,02] = 0,125$$

$$1/T_{m1} = 1 / [4 \cdot (1/R_z) \cdot K_g] = 1 / [4 \cdot 5 \cdot 20 \cdot 0,03] = 0,125$$

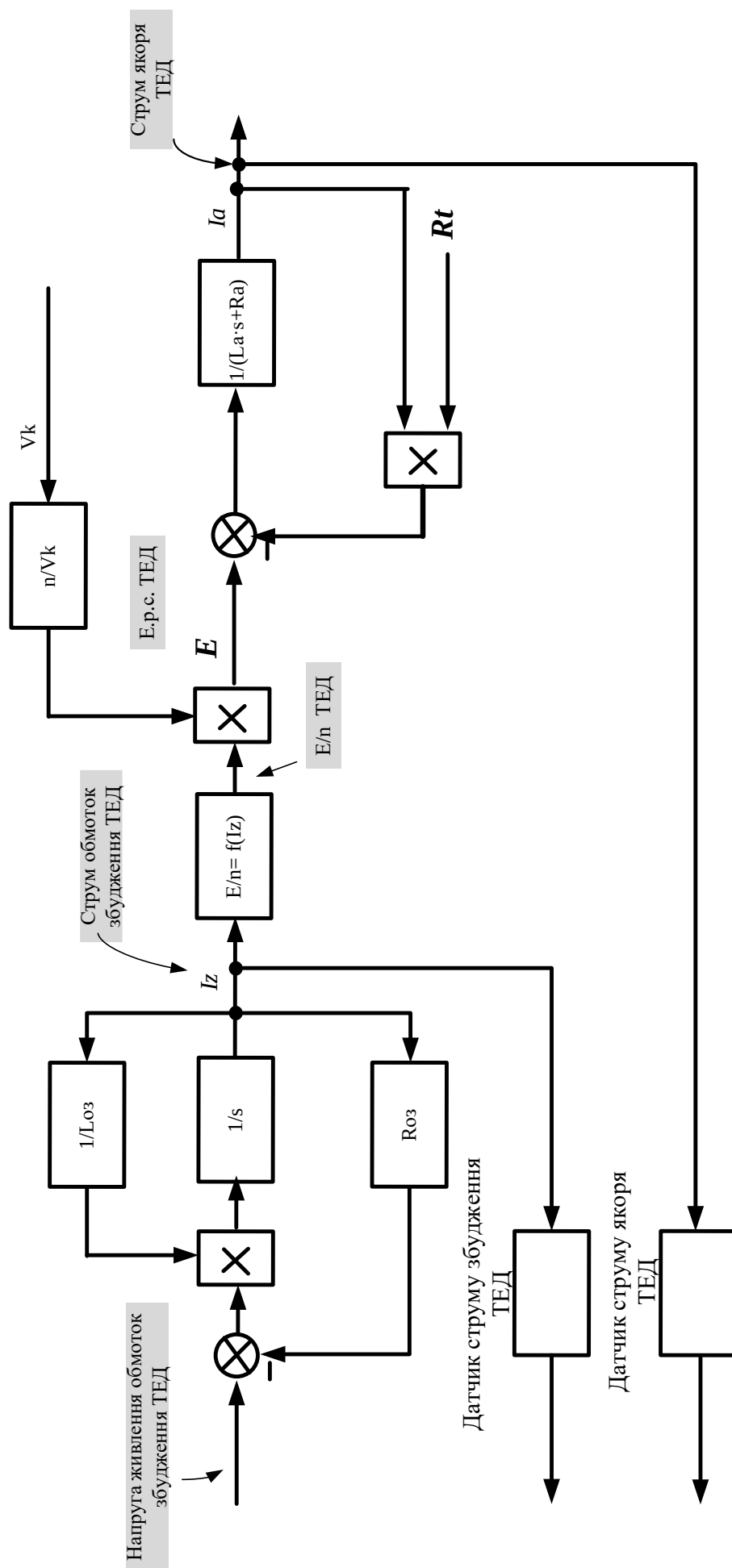


Рисунок 3.13 Структурна схеми розрахунку величини струму збудження та струму якорної ланки ТЕД

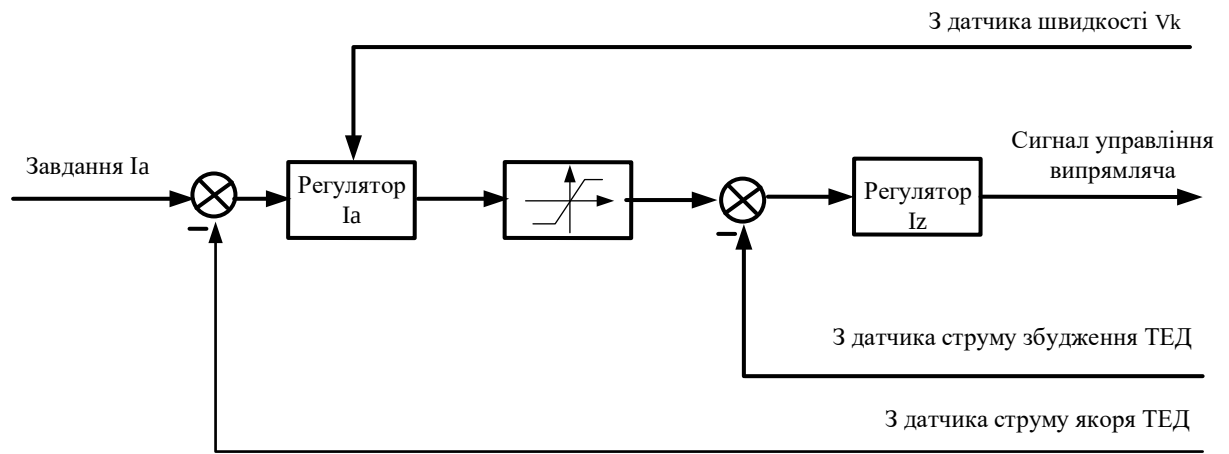


Рисунок 3.14 Структурна схема двоконтурної системи регулювання по струму збудження та струму якоря тягового електродвигуна.

Для визначення передавальної функції регулятора струму якоря визначаємо передавальну функцію внутрішнього контуру регулювання струму збудження

$$W_{ol}(s) = W_g(s) W_{oz}(s) \cdot W_{pil}(s) / [1 + W_g(s) \cdot W_{oz}(s) \cdot W_{pil}(s)] =$$

$$= [[K_g / (T_g \cdot s + 1)] \cdot [(1/R_z) / (T_z \cdot s + 1)] [T_z \cdot s + 1]] / [4 \cdot (1/R_z) \cdot K_g s]] /$$

$$[1 + [K_g / (T_g \cdot s + 1)] \cdot [(1/R_z) / (T_z \cdot s + 1)] \cdot [T_z \cdot s + 1]] / [4 \cdot (1/R_z) \cdot K_g s] = 1 / (2 \cdot T_g \cdot s + 1)^2$$

$$W_{ol}(p) = 1 / (2 \cdot T_g \cdot s + 1)^2$$

Передавальну функцію об'єкту регулювання струму якоря ТЕД, структурна схема якого приведена на рис.3.15, можна записати у вигляді:

$$W_2(s) = W_{ol}(s) = [1 / (2 \cdot T_g \cdot s + 1)^2] \cdot K_e \cdot V_k \cdot (1/R_t) / ((L_d/R_t) \cdot s + 1)$$

де $R_t = 3 \text{ Ом}$ – активний опір якірної ланки;

$L_a = 0,2 \text{ Гн}$ – індуктивність якірної ланки.

$$2 \cdot T_g = 0,04$$

$$K_e = 0,1.$$

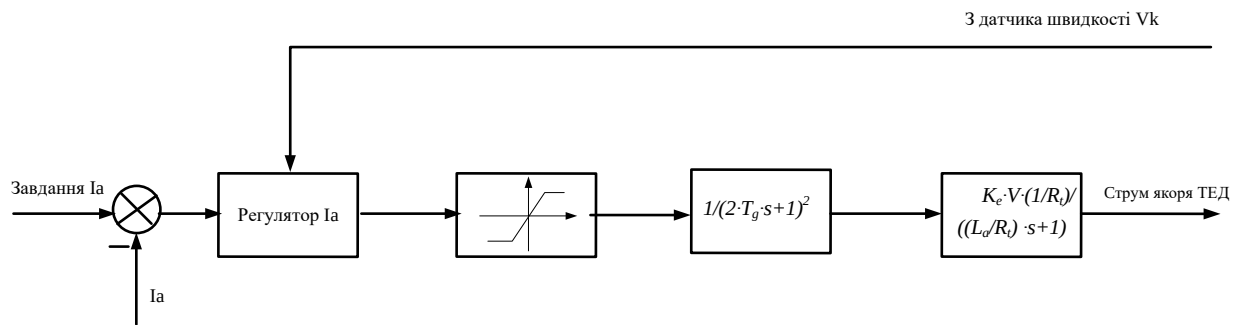


Рисунок 3.15 Структурна схема об'єкту регулювання струму якоря ТЕД

В якості регулятора пропонується вибрати ПІ- регулятор.

Враховуючи, що $T_a \gg 2 \cdot T_g$, коефіцієнти ПІ-регулятора можна визначити як:

$$K_{PI1} = T_a / [4 \cdot (K_e \cdot V) \cdot (1/R_t) \cdot (4 \cdot T_g)]$$

$$1/T_{PI1} = 1 / [4 \cdot (K_e \cdot V) \cdot (1/R_t) \cdot (4 \cdot T_g)]$$

$$K_{PI1} = 0,1 / [4 \cdot (0,1 \cdot V) \cdot 0,3 \cdot (4 \cdot 0,02)] \approx 10 \cdot (1/V)$$

$$1/T_{PI1} = 1 / [4 \cdot (0,1 \cdot V) \cdot 0,3 \cdot (4 \cdot 0,02)] \approx 100 \cdot (1/V)$$

Як видно з вище приведенного розрахунку коефіцієнтів ПІ-регулятора струму якоря, величина коефіцієнтів обернено пропорційна від швидкості руху поїзда. На рис.3.16 приведена реалізована в середовищі програмного забезпечення модель регулятора струму якоря тягового електричного двигуна.

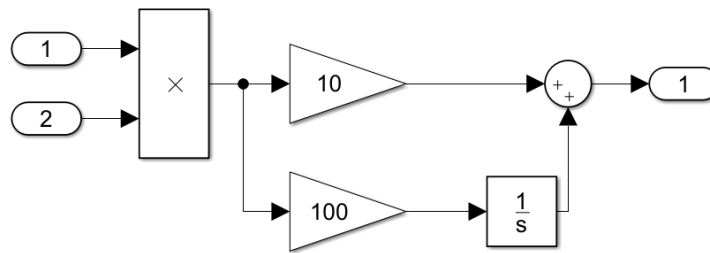


Рисунок 3.16 Регулятор струму якоря тягового електричного двигуна

Таким чином, на основі проведеного аналізу та розрахунків запропонована система тягового електроприводу, яким передбачено:

- 1) якорі тягових електродвигунів підключені до гальмівних резисторів;
- 2) обмотки збудження отримують живлення від окремого джерела енергії;
- 3) система регулювання є двоконтурною з підлеглим контуром регулювання струму збудження. Завдання величини струму збудження є вихідним сигналом регулятора струму якоря;

4) завдання регулятора струму якоря формується на основі трьох, а саме: завдання максимальної величини струму якоря по нагріву, по комутації по наявності надлишкового проковзування.

Запропоноване рішення має основний недолік, це лінійна залежність величини гальмівного зусилля від швидкості руху при максимальному значенні струму збудження. Тобто, при зниженні швидкості руху знижується величина гальмівного зусилля. Як наслідок, ефективність реостатного гальмування знижується при зменшенні швидкості руху.

Усунути даний недолік можна, впровадивши регулювання величини опору гальмівного резистора. При цьому пропонується при досягненні максимального струму збудження перехід в режим стабілізації струму збудження і регулювати величину струму якоря шляхом регулювання величини опору гальмівного резистора.

На рис.3.17 приведено імітаційна модель системи електричного реостатного гальмування підвищеної ефективності.



При проведенні досліджень на імітаційній моделі отримані осцилограми зміни струмів збудження та якоря тягових електродвигунів, характер зміни швидкості руху, гальмівного зусилля та величини опору гальмівного зусилля. На рис.3.18 - 3.20 приведені декілька з них.

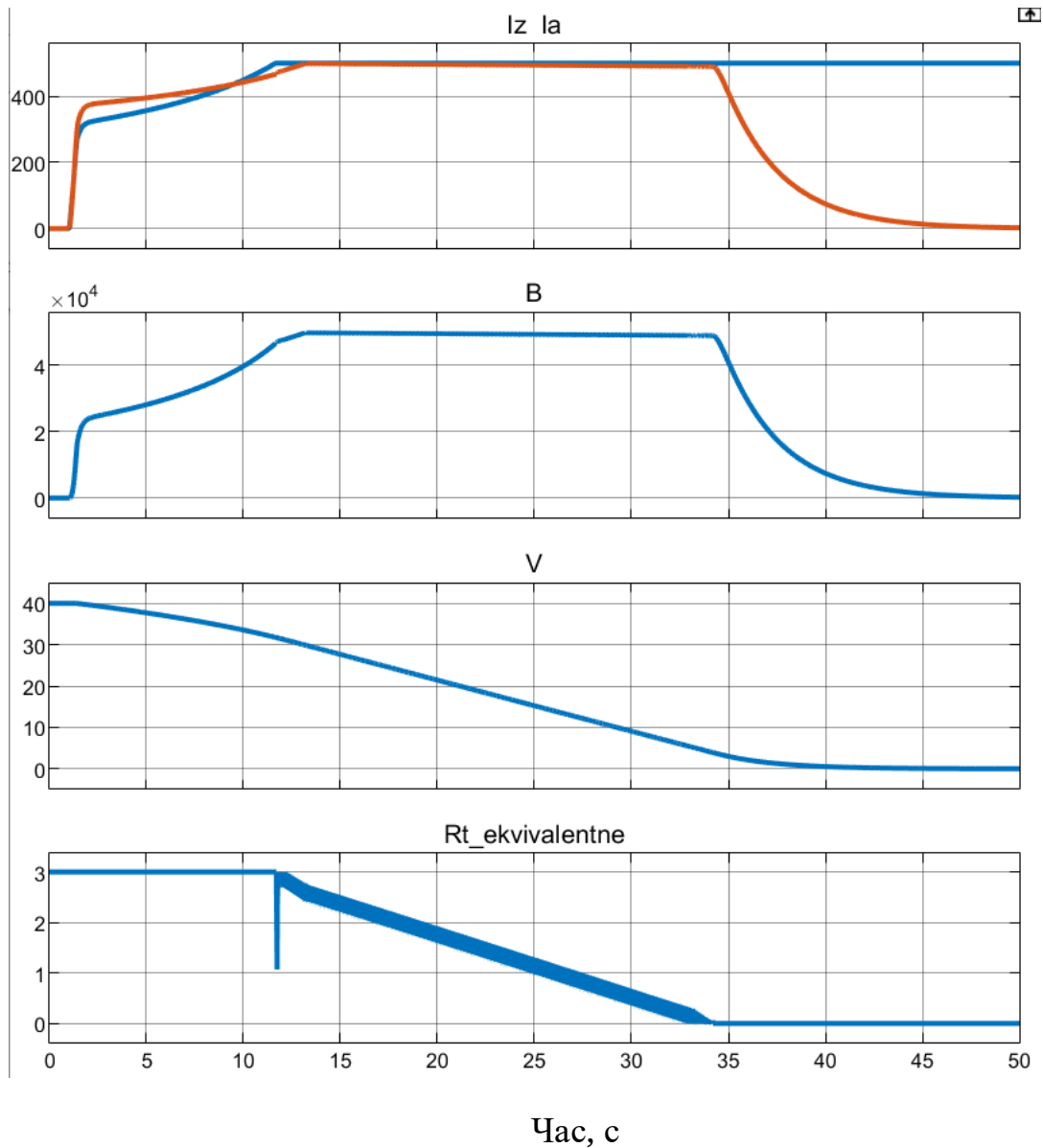


Рисунок 3.18 Осцилограми режиму гальмування до зупинки при початковій швидкості руху 40 м/с. Максимально допустимому значенні струмів збудження і якоря тягового електродвигуна 500 А

Як видно на рис.3.18, перехід на режим регулювання відбувається на 12 с відразу, як струм збудження досягає своєї максимально допустимої величини 500А. Струм якоря максимально допустимий дорівнює 500 А.

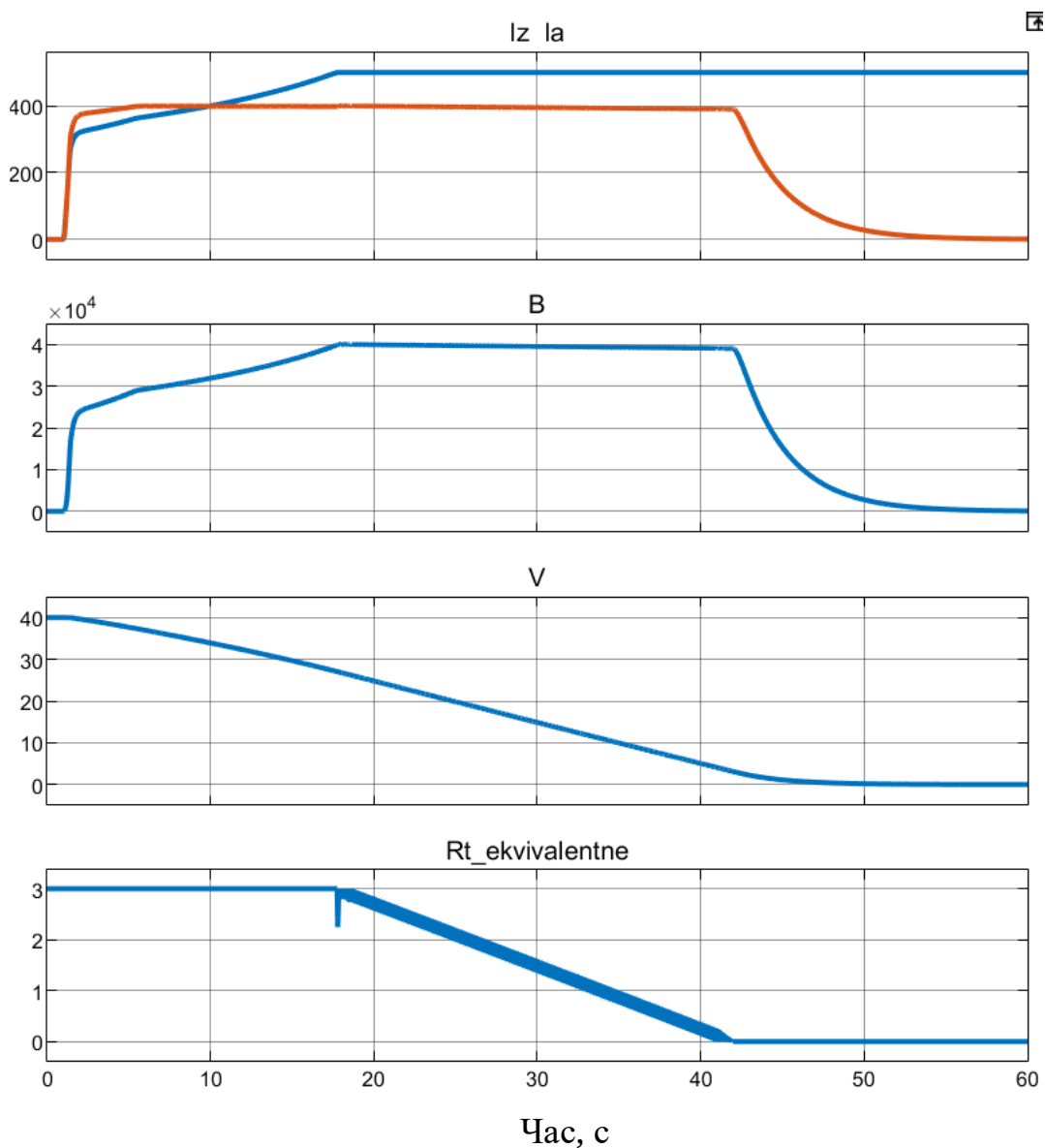


Рисунок 3.19 Осцилограми режиму гальмування до зупинки при початковій швидкості руху 40 м/с. Максимально допустимому значенні струму збудження 500 А, а струму якоря тягового електродвигуна 400 А

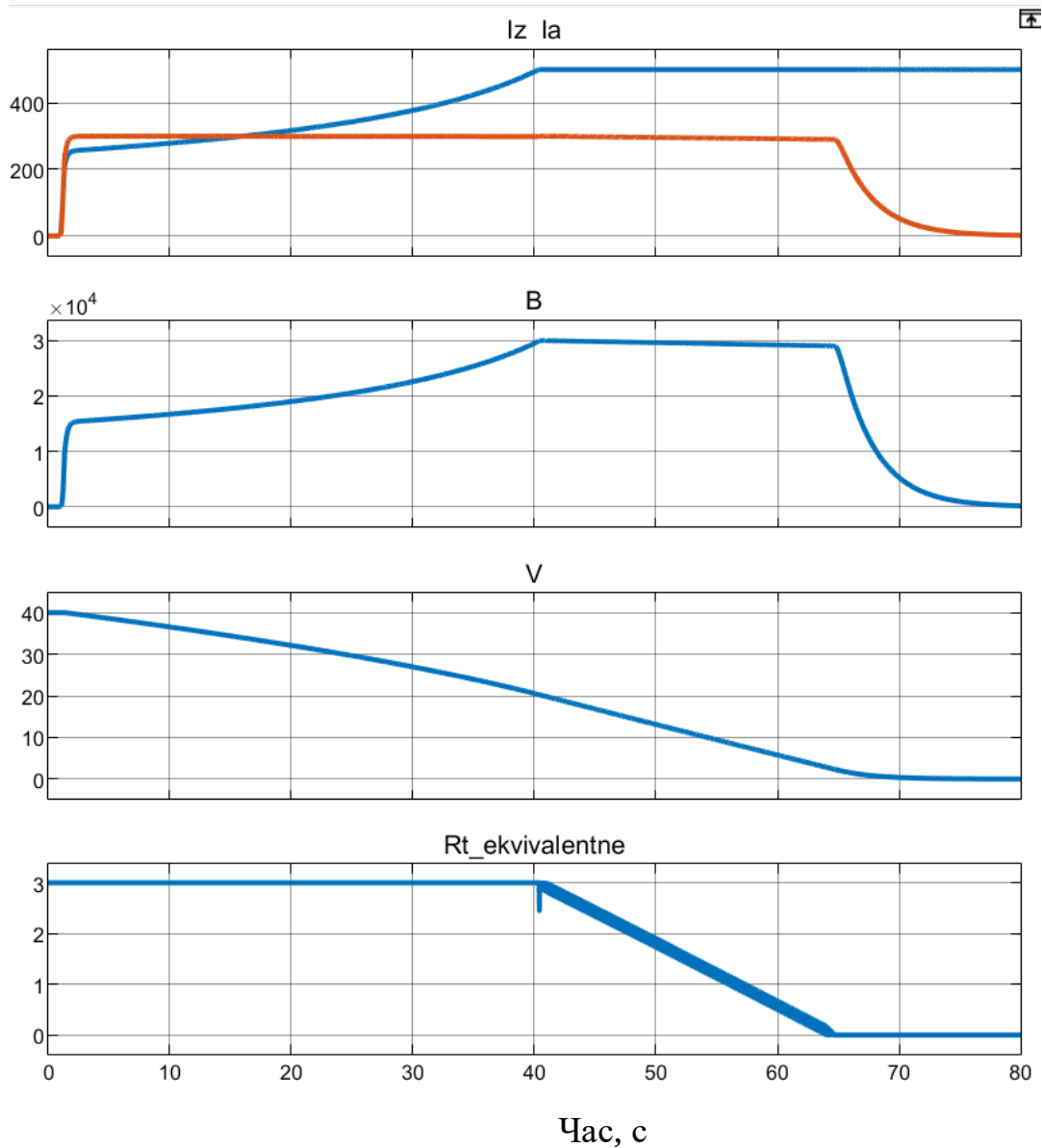


Рисунок 3.20 Осцилограми режиму гальмування до зупинки при початковій швидкості руху 40 м/с. Максимально допустимому значенні струму збудження 500 А, а струму якоря тягового електродвигуна 300 А

На рис.3.18 – 3.20 проілюстровано, що наслідком зниження допустимої величини струму якоря з 500 А до 300 А є збільшення часу гальмування з 50 с до 70 с.

Тягові характеристики тягового електроприводу при різних значеннях допустимої величини струму якоря та струму збудження приведено на рис.3.21.

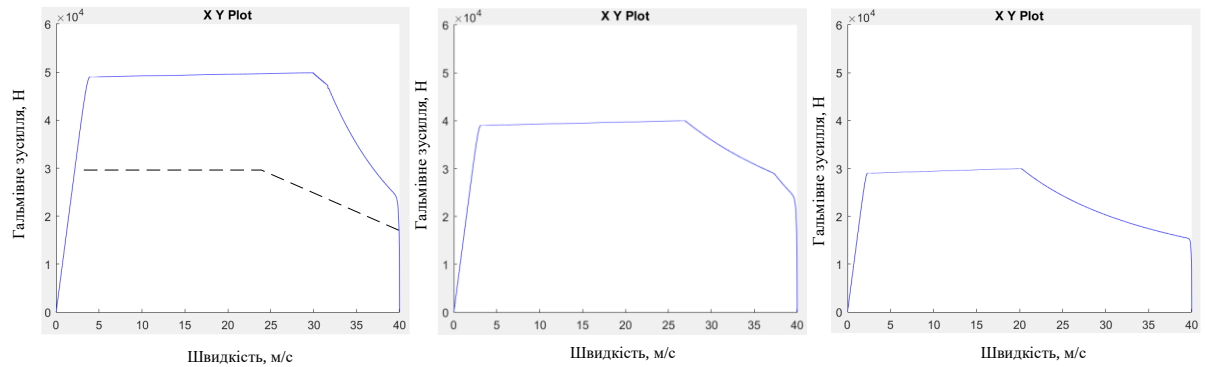


Рисунок 3.21 Залежність гальмівного зусилля в функції швидкості руху при обмеженні максимальної величини струму збудження 500 А, та максимальної величини струму якоря 500; 400; та 300А

В системі регулювання тягового електроприводу підвищеної ефективності передбачено регулювання тягового зусилля з метою усунення надлишкового проковзування. На рис.3.21 приведено залежність тягового зусилля в функції швидкості руху з зниженням гальмівного зусилля на 40% в діапазоні швидкостей $V1 - V2$.

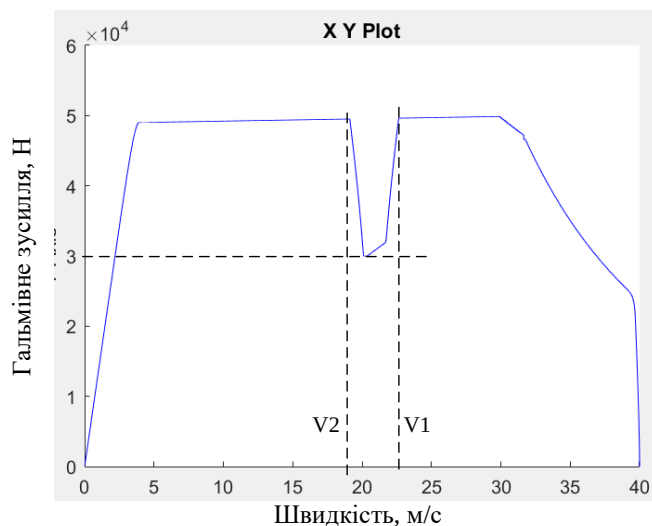


Рисунок 3.21 Залежність тягового зусилля в функції швидкості руху з зниженням гальмівного зусилля на 40% в діапазоні швидкостей $V1 - V2$

Висновок

Запропонована система тягового електроприводу підвищеної ефективності, і якій на відміну від штатної передбачено режим плавного регулювання величини опору гальмівного резистора. Запропоновані рішення підтримані результатами імітаційного моделювання.

4 Система електричного гальмування з бортовим накопичувачем енергії

На сьогодні альтернативою стаціонарним накопичувачам енергії НЕ розглядаються бортові. Розміщення НЕ на борту рухомого складу дозволяє додатково отримати ряд суттєвих переваг [6-8] у порівнянні зі стаціонарним розміщенням. Це можливість зменшення габаритних розмірів гальмівних резисторів тягового рухомого складу, більш якісне згладжування піків енергії без необхідності зміни існуючої інфраструктури системи електропостачання, звести до мінімуму втрати в елементах тягової мережі від передачі енергії.

Бортове розміщення дозволяє виключити частку енергетичних втрат в елементах тягової мережі (рис.4.1) ΔA_{TM} від протікання енергії

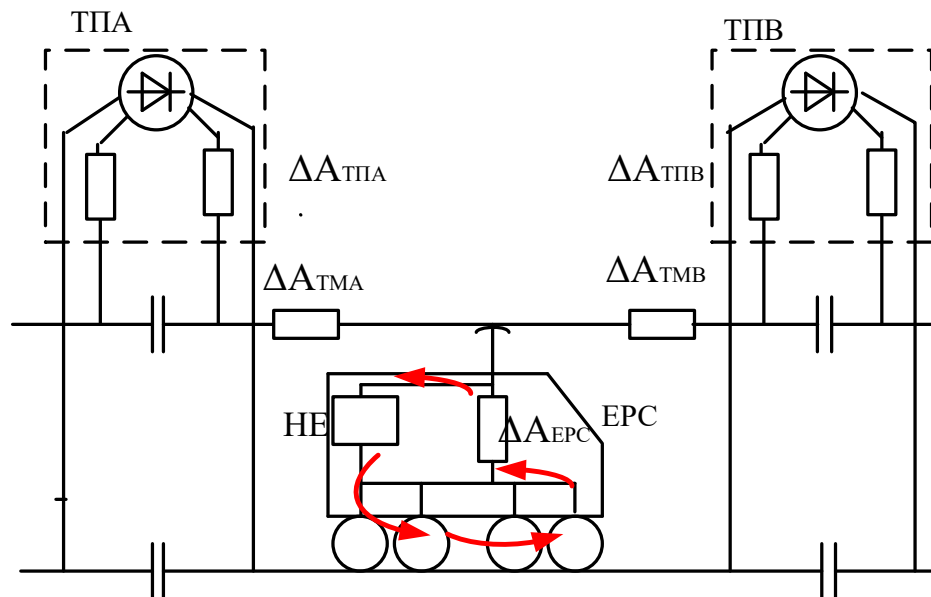


Рисунок 4.1 - Спрощена функціональна схема протікання енергообмінних процесів в тяговій енергосистемі при тяговому електроприводі з бортовим накопичувачем. Режим електричного гальмування

рекуперативного гальмування, а також зменшити втрати не лише в агрегатах тягових підстанцій $\Delta A_{ТП}$ а й частку енергетичних втрат у елементах тяговій мережі $\Delta A_{ТМ}$, що виникають при енергоспоживанні тягового рухомого складу (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 - Порівняльна оцінка складових втрат в системі електричної тяги при застосуванні стаціонарних та бортових НЕ

Варіант розміщення	Режим роботи	$\Delta A_{ТП}$	$\Delta A_{ТМ}$	$\Delta A_{ЕРС}$
Стаціонарний	Тяга	$\pm$	+	+
	Гальмування	—	+	+
Бортовий	Тяга	$\pm$	$\pm$	+
	Гальмування	—	—	+
+ втрати залишаються; — відсутність втрат; $\pm$ зменшення втрат				

Особливо це є актуальним для міського та приміського електричного транспорту [1]. Специфічна особливість роботи міського та приміського електричного транспорту пов'язана зі значною нерівномірністю споживання електроенергії при русі. У приміському сполученні середня відстань між зупинками звичайно становить 3 - 5 км, в метрополітенах від 0,6 до 0,7 км., в метрополітенах країн центральної і західної Європи від 0,3 до 0,5 км. При цьому період енергообміну електропоїзду з тяговою мережею становить менше 3 хвилин в приміському сполученні, та хвилини у метрополітені. Такий несприятливий режим енергоспоживання призводить до виникнення вагомих втрат енергії як у тяговій мережі, в агрегатах тягових підстанцій і в первинній мережі змінного 3-фазного струму.

Даний варіант розміщення передбачає проведення модернізації існуючого рухомого складу електропоїзду на предмет зміни схеми розміщення його обладнання. Окрім цього суттєвим недоліком є збільшення маси електропоїзду (у межах 2%), що у свою чергу призводить до збільшення

питомих енергозатрат на тягу. У зв'язку з цим, одними з основних вимог, що висувають до бортової НЕ є висока щільність потужності та енергоємності. Окрім цього вона має бути нечутливою до вібрацій та сил інерції, що виникають під час експлуатації та підтримувати модульну компоновку накопичувача. Немало важливим є і дотримання безпекового фактору, оскільки даний варіант розміщення передбачає максимальну близькість до пасажирів. Разом з цим розміщення НЕ на борту рухомого складу є достатньо перспективною, оскільки дозволяє найбільш повно вирішити проблему з прийомом енергії рекуперації та звести до мінімуму енергетичні втрати у системі електропостачання.

Недоліки кожного з варіантів розміщення не дозволяють отримати універсальне схемне технічне рішення. Вибір варіанту розміщення має базуватися на результатах аналізу економічної доцільності та можливості його технічної реалізації.

На залізничному транспорті найбільшого розповсюдження набули системи накопичення енергії з електрохімічними (ЕСНЕ), індуктивними (ІнСНЕ), ємнісними (ЄСНЕ) та інерційними (ІСНЕ) накопичувачами енергії.

Порівняння та оцінка накопичувачів на придатність їх використання у бортових системах накопичення енергії у першу чергу має проводитися за наступними критеріями:

- щільність енергії (енергоємність системи накопичення енергії на одиницю її маси);
- щільність потужності (потужність системи накопичення енергії на одиницю її маси);
- Об'ємна щільність енергії (енергоємність системи накопичення енергії на одиницю її об'єму);
- Об'ємна щільність потужності (потужність системи накопичення енергії на одиницю її об'єму);
- Ефективність зарядно-розрядного циклу (відношення вихідної електричної енергії до вхідної електричної енергії);

- Інтенсивність саморозряду (відношення розсіяною енергії до загальної кількості накопиченої енергії за певний період зберігання);
- Кількість циклів роботи;
- Питома вартість;
- Безпека експлуатації.

Відомо, що в режимі електричного гальмування тяговий електричний двигун працює в режимі генератора електричної енергії. В якості споживача електричної енергії виступає накопичувач енергії НЕ. Узгодження режимів роботи джерела енергії та споживача реалізується за допомогою перетворювачів DC/DC. В режимі електричного гальмування можна виділити два основні режими:

- РЕЖИМ 1 - величина струму якоря регулюється шляхом регулювання струму збудження ТЕД;
- РЕЖИМ 2 (рис.4.2) - при максимальному значенні струму збудження величина струму якоря (струм заряду накопичувача) регулюється шляхом накопичення додаткової енергії в індуктивності $L1$ з наступним підключенням послідовно з'єднаних якоря і індуктивності $L1$ до накопичувача..

Дослідження особливостей роботи системи тягового електроприводу з накопичувачем енергії на базі конденсатора були проведені на імітаційній моделі приведені.

Основними елементами моделі є:

- ТЕД, обмотка збудження якого підключена до окремого джерела живлення за допомогою перетворювача DC/DC (рис.4.3);
- накопичувач енергії НЕ, підключений за допомогою статичного перетворювача DC/DC до якоря ТЕД;
- регулятор струму якоря та струму збудження ТЕД. Регулятор релейного типу. Реалізується «РЕЖИМ 1»;

- регулятор струму якоря та струму збудження ТЕД. Регулятор релейного типу. Реалізується «РЕЖИМ 2»;

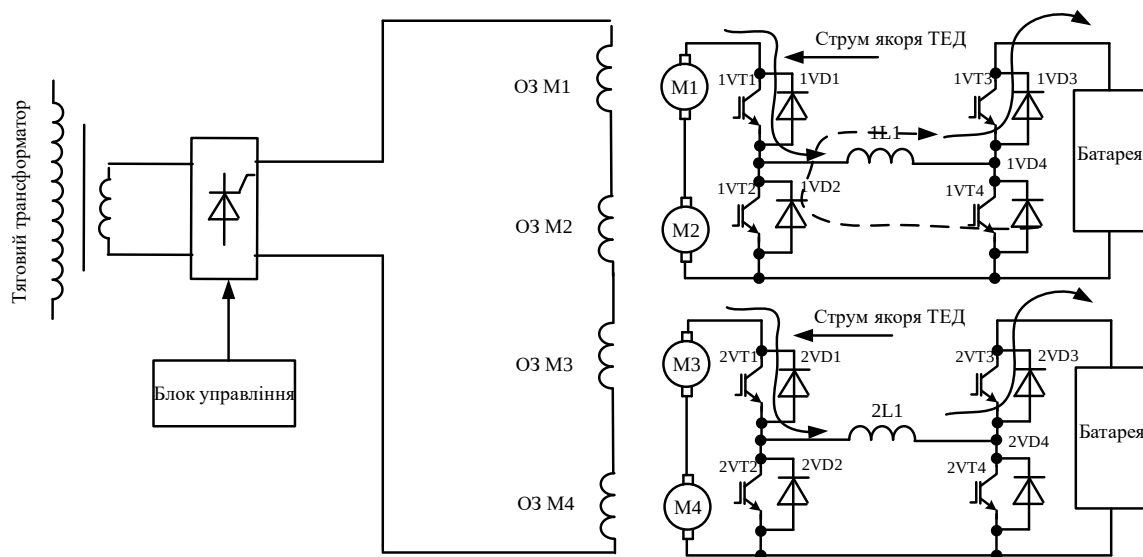


Рисунок 4.2 Спрощена силова схема тягового електроприводу з накопичувачем енергії при гальмуванні

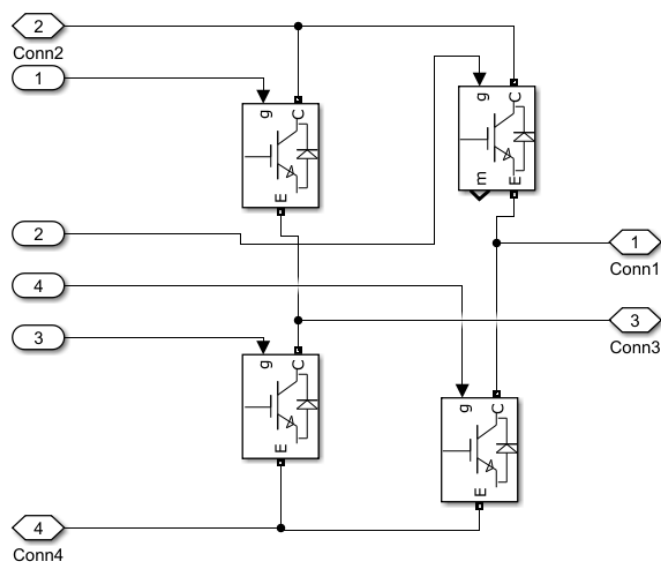


Рисунок 4.3 Перетворювач джерела живлення обмотки збудження ТЕД

Імітаційна модель системи електричного гальмування з накопичувачем енергії приведено на рис.4.4.

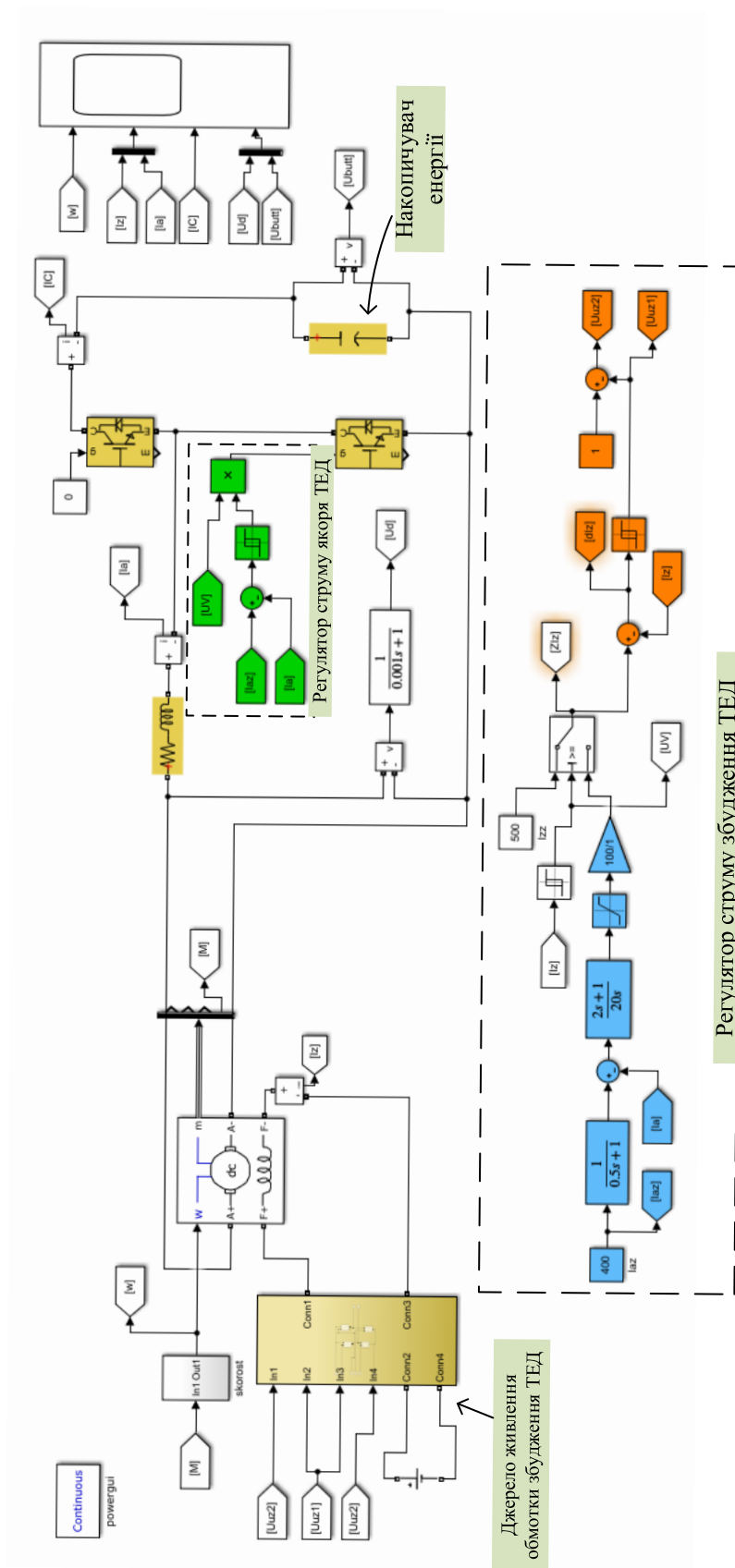


Рисунок 4.4 Імітаційна модель системи електричного гальмування з накопичувачем енергії

На рис.4.5 та рис. 4.6 приведено осцилограми перехідних процесів при гальмуванні. Ємність конденсатора 20 Ф, початкова напруга 250 В та 50 В.

Результати порівняльного аналізу отриманих осцилограм приведені в табл.4.2.

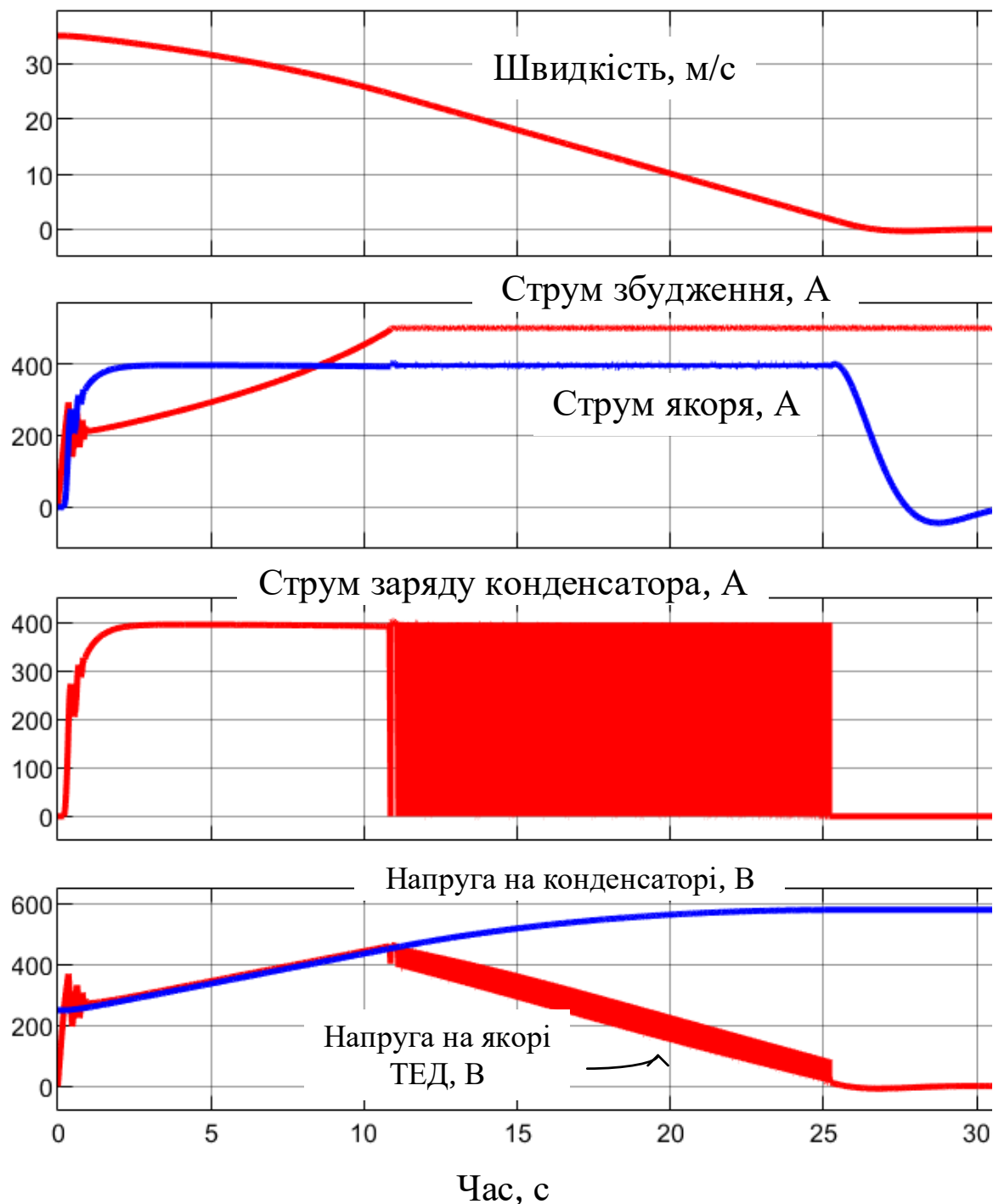


Рисунок 4.5 Осцилограми перехідних процесів при гальмуванні. Ємність конденсатора 20 Ф, початкова напруга 250 В

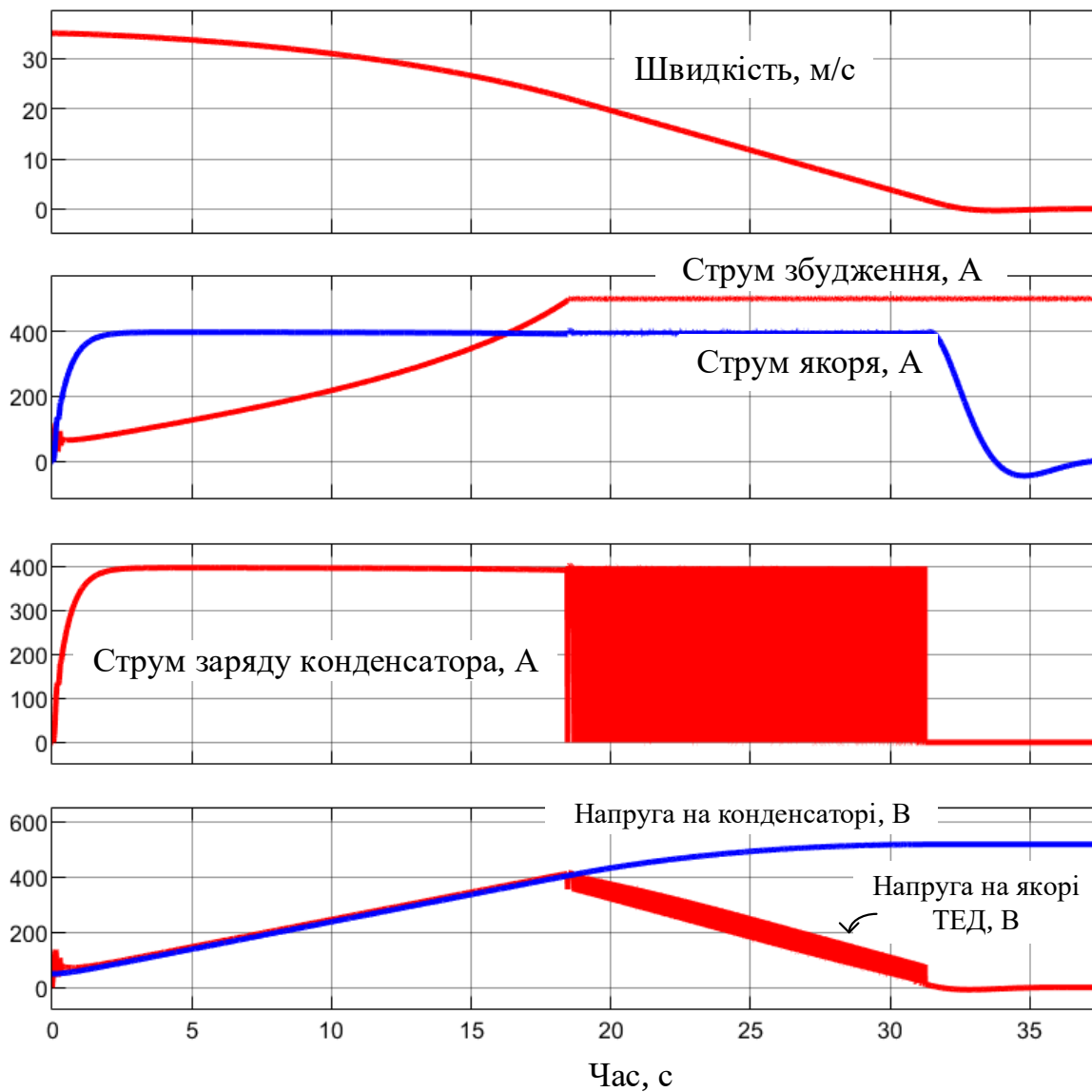


Рисунок 4.6 Осцилограми перехідних процесів при гальмуванні. Ємність конденсатора 20 Ф, початкова напруга 50 В

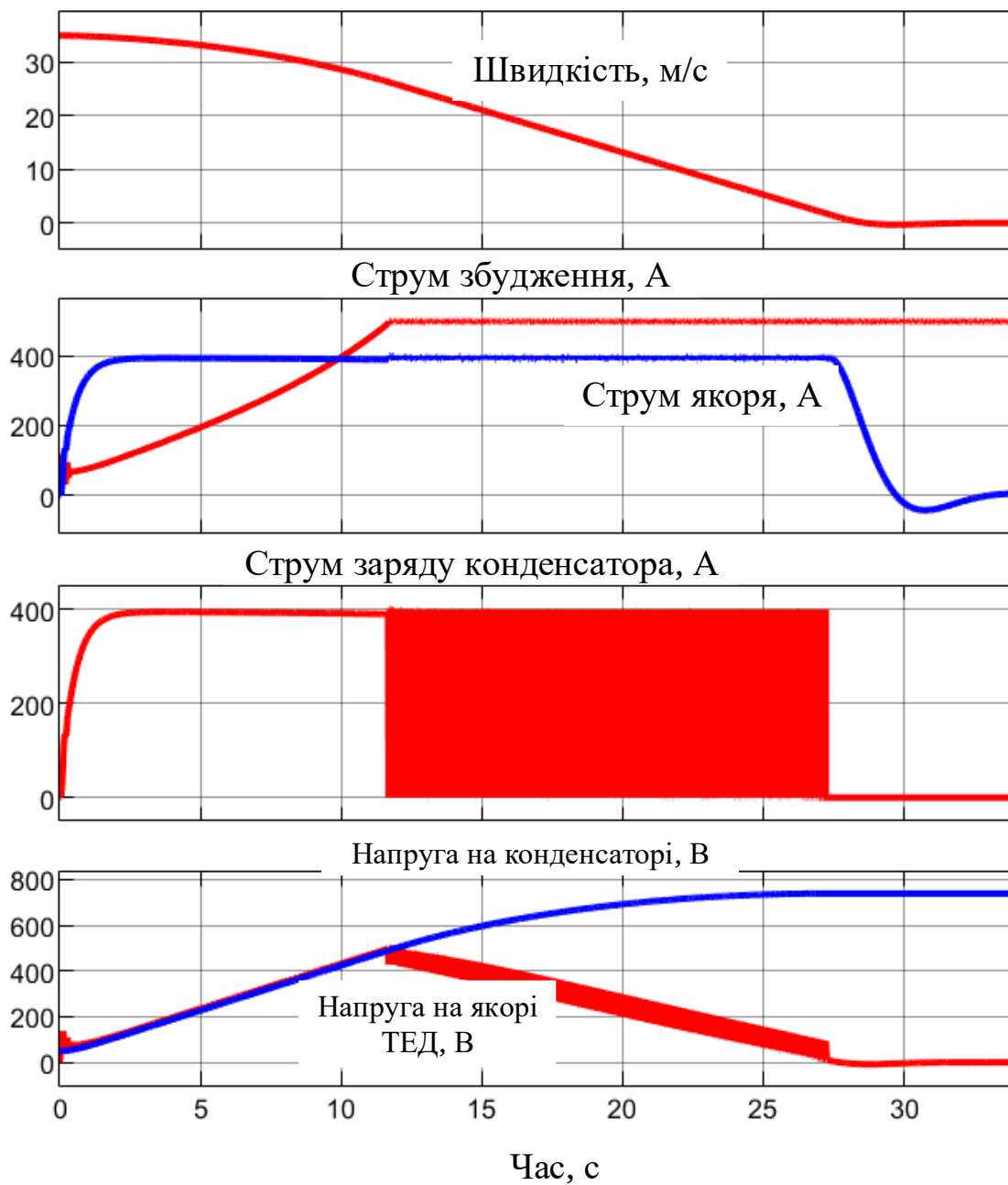


Рисунок 4.7 Осцилограми перехідних процесів при гальмуванні. Ємність конденсатора 10 Ф, початкова напруга 50 В

Таблиця 4.2 Результати порівняльного аналізу отриманих осцилограм
приведені в табл.4.2.

Параметри	Початкова напруга на конденсаторі накопичувача, В		
	C=20 Ф	C=20 Ф	C=10 Ф
	$U_c=50\text{ В}$	$U_c=250\text{ В}$	$U_c=50\text{ В}$
Початкова швидкість гальмування, м/с	35	35	35
Максимальний струм збудження, А	500	500	500
Максимальний струм якоря, А	400	400	400
Тривалість РЕЖИМУ 1, с	18	11	12
Тривалість РЕЖИМУ 2, с	14	14	15
Тривалість гальмування до зупинки, с	32	26	27
Середнє значення величини уповільнення, м/с ²	~1,1	~1,3	~1,3
Максимальна напруга на конденсаторі, В	~600	~510	~720

Аналіз результатів досліджень, приведених в табл. 4.2, вказує на доцільність передбачити комутацію елементів батареї для зміни величини ємності конденсатора для більш прискореного збільшення напруги на конденсаторі в умовах обмеження струму його заряду. Це ускладнює систему бортового накопичувача.

Аналогічна ситуація при забезпеченні режиму тяги з живленням від бортового накопичувача. На рис. 4.8 приведена спрощена силова схема тягового електроприводу.

В цілому, тяговий електропривод з бортовим накопичувачем енергії потребує модернізації тягового трансформатора, розробки не тільки ряду

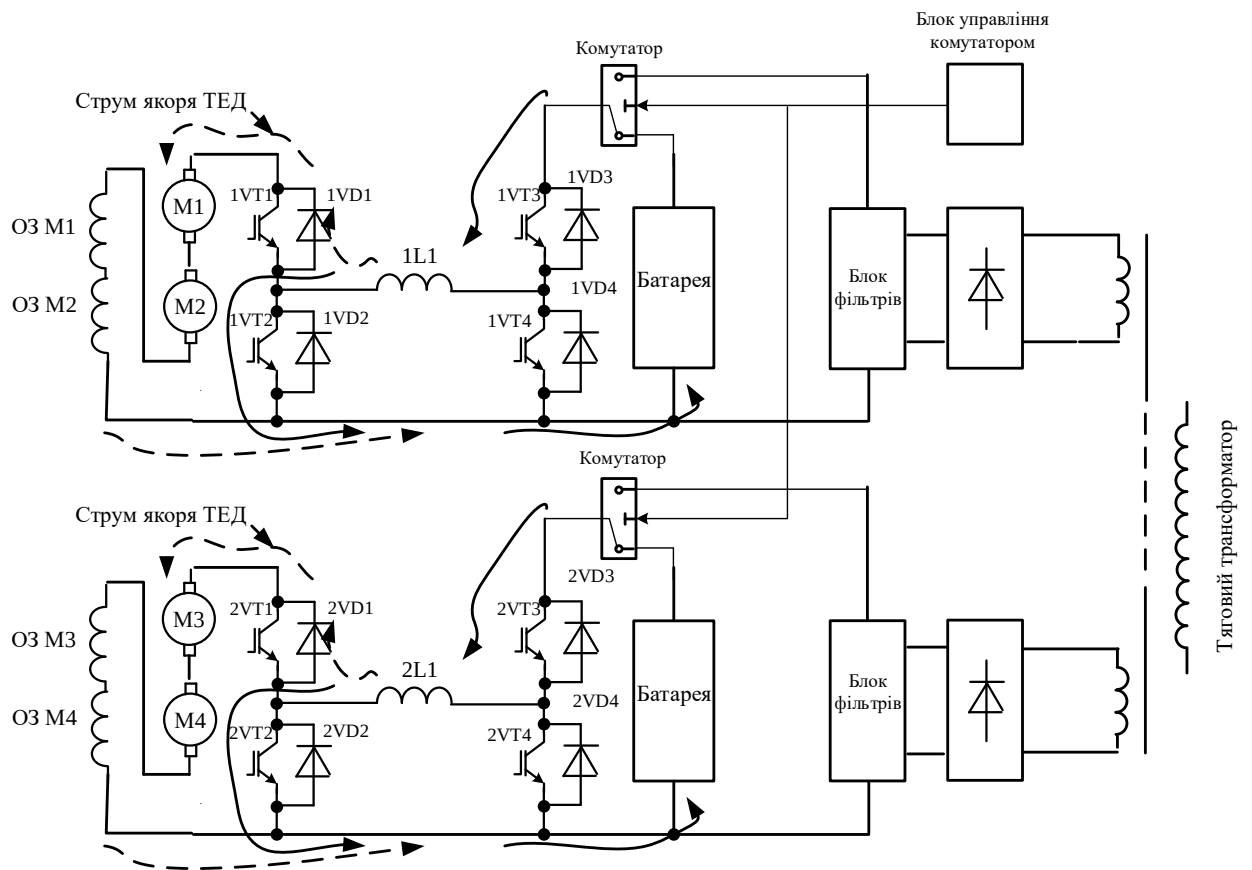


Рисунок 4.8 Спрощена силова схема тягового електроприводу в режимі тяги

статичних перетворювачів для регулювання струму якоря та збудження ТЕД, а і статичний перетворювач для забезпечення необхідної потужності заряду та розряду накопичувача. В цілому слід очікувати, що впровадження накопичувача енергії у порівнянні з модернізацією реостатного гальмування, потребуватиме значно більших коштів.

5 Розрахунок економічного ефекту від реалізації системи електричного гальмування підвищеної ефективності

5.1 Характеристика запропонованого заходу

5.2 Методика розрахунку економічного ефекту

Економічний ефект заходу НТП визначається за весь розрахунковий період, включаючи розробку, виробництво і використання нової техніки, тобто є інтегральним ефектом.

Сумарний по рокам розрахункового періоду економічний ефект (E_T) визначається як перевищення сумарної вартісної оцінки результатів заходу НТП за розрахунковий період (P_T) над вартісною оцінкою сукупних витрат на здійснення заходу НТП за розрахунковий період ($З_T$)

$$E_T = P_T - З_T. \quad (5.1)$$

При розрахунку економічного ефекту проводиться обов'язкове приведення різночасових витрат і результатів до єдиного для всіх варіантів реалізації заходу НТП моменту часу – розрахунковому року t_p . Приведення різночасових витрат і результатів всіх років періоду реалізації до розрахункового року здійснюється шляхом множення їхньої величини за кожний рік на коефіцієнт приведення α_t , що визначається за формулою

$$\alpha_t = (1 + E_n)^{tp-t}, \quad (5.2)$$

де E_n – норматив приведення різночасових витрат і результатів, $E_n=0,15$;

t_p – розрахунковий рік;

t – рік, витрати і результати якого приводяться до розрахункового року.

В табл.5.1 наведено приклад розрахунку коефіцієнтів приведення результатів і витрат до розрахункового року по формулі (5.2). За розрахунковий рік прийнятий третій рік реалізації заходу.

Оскільки технічний захід не впливає на доходи і не відобразиться на доходній частині економічного ефекту в порівнянні з базовим варіантом приймаємо, що $P_T^{\bar{}} = P_T^H$. Тоді економічний ефект визначається зменшенням витрат за період у відповідності з встановленими нормативами і розраховується за формулою

$$E_T = E_T^H - E_T^{\bar{}} = Z_T^{\bar{}} - Z_T^H. \quad (5.3)$$

Таблиця 45.1 – Приклад розрахунку приведення при $E_n=0,15$

Показники	Позначення	Розрахунковий період (роки)				
		1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
1. Норматив приведення результатів і витрат до розрахункового року	E_n	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
2. Кількість років, що відділяють результати і витрати t-го року від розрахункового	$p-t$	0	-1	-2	-3	-4
3. Коефіцієнт приведення результатів і витрат до розрахункового року	α_t	1,0	0,87	0,756	0,658	0,572

Витрати при проведенні заходу НТП розраховуються за формулою

$$Z_T = \sum_{t=t_1}^{t_k} Z_t \cdot \alpha_t = \sum_{t=t_1}^{t_k} (u_t + k_t - l_t) \cdot \alpha_t \quad (5.4)$$

де Z_t - витрати всіх ресурсів у рік t (включаючи витрати на отримання супутніх результатів);

u_t - поточні витрати при виробництві (використанні) нової техніки у рік t без урахування амортизаційних відрахувань на реновацію;

k_t - одноразові витрати при виробництві (використанні) нової техніки у рік t ;

l_t - залишкова вартість (ліквідаційне сальдо) основних фондів, що вибувають у рік t .

5.3 Розрахунок вартісної оцінки витрат запропонованого заходу

Витрати запропонованого заходу складаються з одноразових витрат та поточних.

5.3.1 Визначення одноразових витрат

Одноразові витрати на запровадження системи електричного гальмування складаються з:

$$K_t = n \cdot (C_{\text{сист.}} + V_{\text{монт.обл.}}), \quad (5.5)$$

де Цсист. - вартість системи електричного гальмування. Вартість одного комплекту обладнання склала Цсист.=200 000 грн. В табл.5.2 приведено вартість додаткових складових системи гальмування з накопичувачем енергії в розрахунку на одну секцію.

Вмонт..обл. – витрати на монтаж;

n – кількість секцій електропоїзда.

Таблиця 5.2 - Вартість додаткових складових системи гальмування з накопичувачем енергії в розрахунку на одну секцію

Найменування	Вартість, грн..	Примітка
1. Два імпульсних ключа на 1000 А кожний	50 000	На базі IGBT транзистора МТКИ – 1200 – 33Н (напруга 3 300В, струм 1200А)
2. Акумулятори з системою управління зарядки на 4 кВт·год	100 000	Для виготовлення транспортних акумуляторних батарей використовується літєво-іонні (Li-Ion) елементи фірми Panasonic типу IGR 18650 – 1S1P (3,7В; 2,2А·год), Вартість батареї потужності 1 кВт·год приймаємо рівну 25 000 грн.
3. Автономний інвертор напруги	50 000	На базі силового модуля SKIM400GD126DM (1,2 кВ; 300А)
Всього:	200 000	Вартість системи

При оцінці витрат на монтаж обладнання однієї секції електропоїзда враховували:

1) витратами на оплату праці слюсаря – монтажника 4 розряду

$$V_{\text{оп}}^{\text{осн}} = TC \cdot t_m = 17,89 \cdot 30 = 536,7 \text{ грн.},$$

де TC – тарифна ставка. $TC = 17,89 \text{ грн./год}$;

t_m – трудомісткість монтування обладнання, годин. $t_m = 30 \text{ годин.}$

2) додаткова заробітна плата:

$$V_{\text{оп}}^{\text{дод}} = (V_{\text{оп}}^{\text{осн}} \cdot (\alpha V_{\text{оп}}^{\text{дод}})) / 100 = 536,7 \cdot 20 / 100 = 107,34 \text{ грн.}$$

де $(\alpha V_{\text{оп}}^{\text{дод}}) = 20\%$ - відсоток додаткової зарплати.

3) нарахування на заробітну плату:

$$V_{\text{вдр}} = ((V_{\text{оп}}^{\text{осн}} + V_{\text{оп}}^{\text{дод}}) \cdot (\alpha V_{\text{вдр}})) / 100 =$$

$$= (536,7 + 107,34) \cdot 22 / 100 = 141,69 \text{ грн.},$$

де $(\alpha V_{\text{вдр}})$ – відсоток нарахування на заробітну плату (22%).

$$\begin{aligned} \text{Тоді } V_{\text{монт.обл}} &= V_{\text{оп}}^{\text{осн}} + V_{\text{оп}}^{\text{дод}} + V_{\text{вдр}} = 536,7 + 107,34 + 141,69 = \\ &= 785,73 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Таким чином, одноразові витрати на одну секцію склали

$$B_1 = C_{\text{сист}} + V_{\text{монт.обл}} = 200\,000 + 785,73 = 200\,785,73 \text{ грн.}$$

Виходячи з цього розраховуємо одноразові витрати на придбання та впровадження системи електричного гальмування з накопичувачем енергії на один електропоїзд:

$$Kt = n \cdot B_1 = 4 \cdot 200\,785,73 = 803\,142,92 \text{ грн.} \quad (5.6)$$

де n – кількість секцій електропоїзда, $n = 4$ секцій;

B_1 – витрати на одну секцію, $B_1 = 200\,785,73$ грн.

5.3.2 Розрахунок поточних витрат

Економія поточних витрат досягається за рахунок зниження витрат на електроенергію на власні потреби. Однак ця економія буде скоригована на величину витрат, необхідних для обслуговування додаткового обладнання:

$$\Delta_{ut} = \Delta_{Вел} - В_{обсл.дод.обл.},$$

де $В_{обсл.дод.обл.}$ - величина витрат, необхідних для обслуговування додаткового обладнання, грн

Зниження витрати електроенергії на власні потреби визначається за формулою:

$$\Delta_{Вел} = L \cdot A \cdot C_e \cdot 365,$$

де L - середній добовий пробіг одного електропоїзду. $L=400$ км;

A – економія електроенергії при впровадженні системи електричного гальмування з накопичувачем енергії на 1 км пробігу $A=2,38$ кВт·год/електроп.·км;

C_e - вартість одного кіловата електроенергії на тягу поїздів
 $C_e=143,14$ коп.;

365 – кількість днів в 1 році.

Економія електроенергії на власні потреби електропоїздів за один рік складає:

$$\Delta_{Вел} = L \cdot A \cdot C_e \cdot 365 = 400 \cdot 2,38 \cdot 1,43 \cdot 365 = 496\,896,40 \text{ грн.} \quad (5.7)$$

$В_{обсл.дод.обл.}$ - обслуговування додаткового обладнання.

Вобсл.дод.обл. визначається за:

1) витратами на оплату праці слюсаря – монтажника 4 розряду

$$V_{\text{обсл}}^{\text{осн}} = TC \cdot t_{\text{м 1}} = 17,89 \cdot 60 = 1\,073,40 \text{ грн.},$$

де TC – тарифна ставка. $TC = 17,89 \text{ грн./год}$;

$t_{\text{м 1}}$ – трудомісткість обслуговування додаткового обладнання електропоїзда однієї секції за рік експлуатації, годин. $t_{\text{м1}} = 60 \text{ годин}$.

2) додаткова заробітна плата:

$$V_{\text{обсл}}^{\text{дод}} = (V_{\text{обсл}}^{\text{осн}} \cdot (\alpha V_{\text{обсл}}^{\text{дод}})) / 100 = 1\,073,40 \cdot 20 / 100 = 214,68 \text{ грн.}$$

де $(\alpha V_{\text{обсл}}^{\text{дод}}) = 20\%$ - відсоток додаткової зарплати.

3) нарахування на заробітну плату:

$$V_{\text{вдр.}} = ((V_{\text{обсл}}^{\text{осн}} + V_{\text{обсл}}^{\text{дод}}) \cdot (\alpha V_{\text{вдр.}})) / 100 = (1\,073,40 + 214,68) \cdot 22 / 100 = 283,78 \text{ грн.},$$

де $(\alpha V_{\text{вдр.}})$ – відсотки нарахування на заробітну плату (22%).

Тоді

$$\begin{aligned} \text{Вобсл.дод.обл.} &= V_{\text{обсл}}^{\text{осн}} + V_{\text{обсл}}^{\text{дод}} + V_{\text{вдр.}} = 1\,073,40 + 214,68 + 283,78 = \\ &= 1571,46 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Таким чином

$$\Delta_{\text{ут}} = \Delta_{\text{Вел}} - \text{Вобсл.дод.обл.} = 496\,896,40 \text{ грн.} - 1571,46 = 495\,324,94 \text{ грн.}$$

5.4 Розрахунок економічного ефекту

На основі методики, викладеної у підрозділі 5.2, розрахуємо економічний ефект наростаючим підсумком як:

$$E = \sum(E_t \cdot \alpha_t),$$

Де E_t - економічний ефект;

α_t - коефіцієнт приведення.

Результати розрахунків представимо у вигляді таблиці.

Таблиця 5.3 Результати розрахунку економічного ефекту від впровадження системи електричного гальмування з накопичувачем енергії.

Показник	Розрахунковий період (роки)					
	1	2	3	4	5	6
1. Одноразові капітальні вкладення k_t , грн..	803 142,92	-	-	-	-	-
2. Економія поточних витрат Δu_t , грн..	495 324,94	495 324,94	495 324,94	495 324,94	495 324,94	495 324,94
3. Економічний ефект E_t , грн..	-307817,98	495 324,94	495 324,94	495 324,94	495 324,94	495 324,94
4. Коефіцієнт приведення α_t	1	0,87	0,756	0,658	0,572	0,5
5. Економічний ефект з урахуванням приведення $E_t \cdot \alpha_t$, грн..	-307817,98	430932,70	374465,65	325923,81	283325,87	247662,47
6. Економічний ефект наростаючим підсумком $E_1 + E_2 + \dots + E_k$, грн.	-307817,98	123114,72	497580,37	823504,18	1106830,05	1354492,52

Як видно з таблиці 5.3 економічний ефект від впровадження системи електричного гальмування з накопичувачем енергії наростаючим підсумком за 6 років складає 1 354 492,52 грн., що вказує на доцільність запропонованого заходу. Повернення капітальних вкладень відбувається в другий рік застосування заходу.

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи показано, що тяговий електропривод електропоїздів змінного струму приміського сполучення, який експлуатується залізницями України, потребує модернізації із-за зростання експлуатаційних витрат.

На основі проведених досліджень запропоновано варіант модернізації штатного тягового електроприводу змінного струму, яким передбачено розширення області ефективного гальмування. При цьому пропонується впровадження плавного регулювання струму якоря тягових електродвигунів як в режимі тяги так і в режимі гальмування шляхом заміни електромеханічного комутатора (силового контролера) на статичний перетворювач.

Проведені в середовищі програмного середовища MATLAB дослідження запропонованої схеми модернізованого електроприводу електропоїзда типу ЕПЛ9Т та алгоритму регулювання підтвердили її працездатність. Крім того, представлена імітаційна модель дозволяє оцінити завантаженість обладнання модернізованого тягового електроприводу та перспективність запропонованого технічного рішення.

Список використаних джерел

1. Басов Г.Г., Яцько С.І. Розвиток електричного мотовагонного рухомого складу. Ч.2 – Харків: «Апекс+», 2005.- 248с.
2. Електропоїзд ЕПЛ9Т. Технічні умови ТУ У 35.2-05763797-027-2002
3. Кірпа Г.М. Інтеграція залізничного транспорту України у європейську транспортну систему: Монографія.- 2-ге вид., переробл. і допов. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. В. Лазаряна, 2004. – 248 с.
4. Гетьман Г.К. Теория электрической тяги. Монография в 2 т./Г.К. Гетьман /[Текст]– Дн – вск: Изд-во Маковецкий, 2011. Т1. – 456 с.
5. Гетьман Г.К. Теория электрической тяги. Монография в 2 т./Г.К. Гетьман/[Текст] – Дн – вск: Изд-во Маковецкий, 2011. Т2. – 364 с.
6. Яцько С. І. Енергоощадний модернізований електропривод електропоїзда типу ЕПЛ9Т / С. І. Яцько, В. О. Тараненко // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. - 2014. - Вип. 147. - С. 148-151.
7. Системи електропостачання рухомого складу залізниць і метрополітенів [Текст]: підручник /С.В. Панченко, В.С. Блиндюк, М.М. Бабаєв, С.І. Яцько, Я.В. Ващенко – Харків: УкрДУЗТ, 2018. – 308 с., рис. 254, табл..4. ISBN 978-617-654-093-9
8. Yatsko S. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock / Serhiy Yatsko, Yaroslav Vashchenko, Anatoliy Sydorenko // Computational Problems of Electrical Engineering. — Lviv : Lviv Politechnic Publishing House, 2019. — Vol 9. — No 1. — P. 44–52.

Додаток

Ілюстративний матеріал до кваліфікаційної роботи «УДОСКОНАЛЕННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЕЛЕКТРИЧНОГО МОТОРВАГОННОГО РУХОМОГО СКЛАДУ»

МРМ. 273.8/24.01.24.01 ПЗ

Розробив студент групи 214-ЕЕП-323

Рівень вищої освіти: другий

Ступінь вищої освіти: магістр

Спеціальність: 273 Залізничний транспорт

Освітня програма: Електровози та електропоїзди

Басов О.О..

Український державний університет залізничного транспорту
Механіко – енергетичний факультет

Кафедра: «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Магістерська робота

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

ЕЛЕКТРИЧНОГО МОТОРВАГОННОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

МРМ. 273.8/24.01.24.01 ПЗ

Розробив студент групи 214-ЕЕП-323

Рівень вищої освіти: другий

Ступінь вищої освіти: магістр

Спеціальність: 273 Залізничний
транспорт

Освітня програма: Електровози та
електропоїзди

Басов О.О.

ВСТУП

Існуючий парк електропоїздів приміського сполучення залізниць України складають електропоїзди типу ЕПЛ та ЕР. Незалежно від струму живлення, тяговий електропривод базується на використанні колекторних тягових двигунів послідовного збудження. Швидкість руху електропоїздів регулюється зміною величини напруги живлення тягових електричних двигунів і ослабленням їхнього магнітного поля.

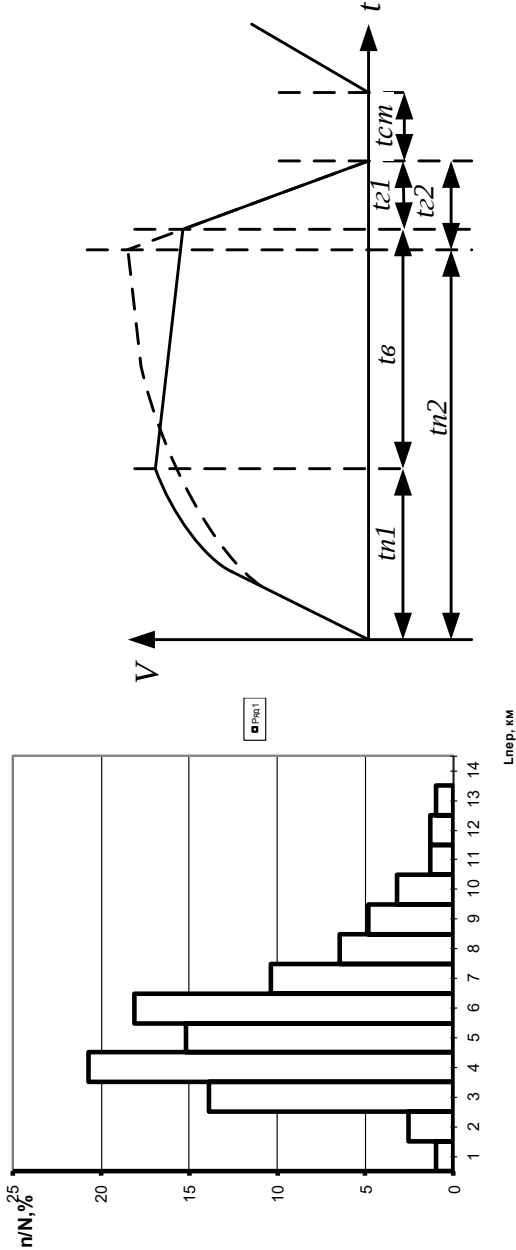
На електропоїздах останніх років випуску передбачено рекуперативно – реостатне (на електропоїздах постійного струму живлення) та реостатне (на електропоїздах змінного струму живлення) гальмування.

Метою даних дослідження є пошук рішень по модернізації штатного тягового електроприводу електричного рухомого складу з метою його удосконалення. У кваліфікаційній роботі розглянуто варіанти модернізації електричного рухомого складу з тяговим електроприводом. Запропоновано систему електричного гальмування підвищеної ефективності.

РЕЖИМ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОГО МОТОРВАГОННОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

для Південно – Західної залізниці

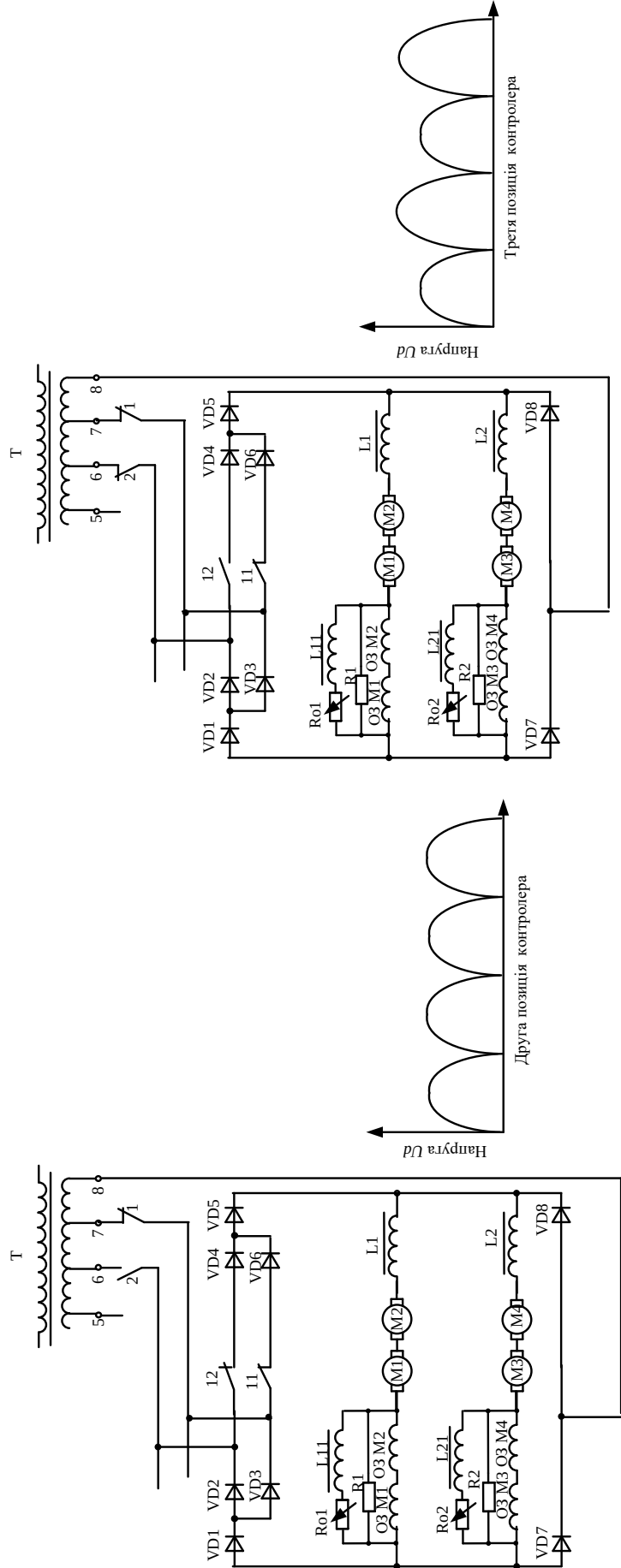
поїзда в приміському сполученні:



Показники	Характеристика електропоїзда ЕПЛ9Т
Напруга в контактній мережі, кВ, 50Гц	25
Основний склад поїзда	2Г+4М+2П
Швидкість конструкційна, км/год	130
Сумарна потужність година тягових двигунів, кВт	3520
Регулювання напруги на тягових двигунах	ступінчате
Тягові електродвигуни	пост. струму колекторні
Гальмування	реостатне
Прискорення максимальне при пуску та навантаженому поїзді, м/с ²	0,7
Сповільнення максимальне при гальмуванні, м/с ²	0,75
Питома енергоспоживання на рух електропоїзда основної складеності при розрахунковій населеності, не більше, кДж/пас.км.	59

АНАЛІЗ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ РУХОМОГО СКЛАДУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ НАПРЯМКІВ ЙОГО УДОСКОНАЛЕННЯ Спосіб регулювання напруги на тягових двигунах електропоїздів типу ЕПЛ

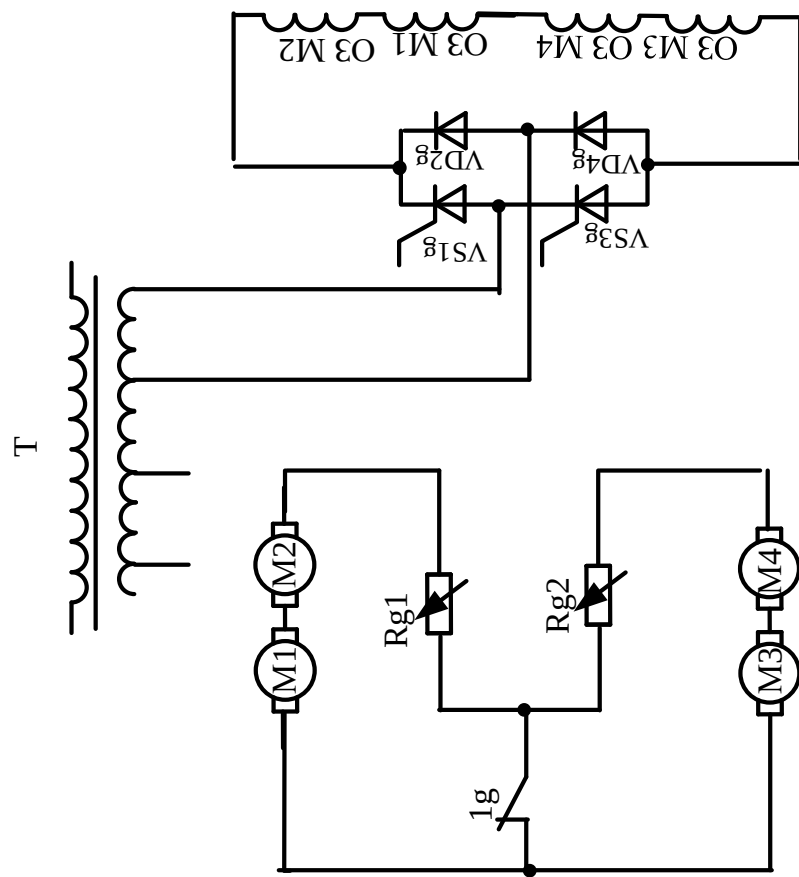
9Т та ЭР9Т в режимі тяги та діаграми напруги



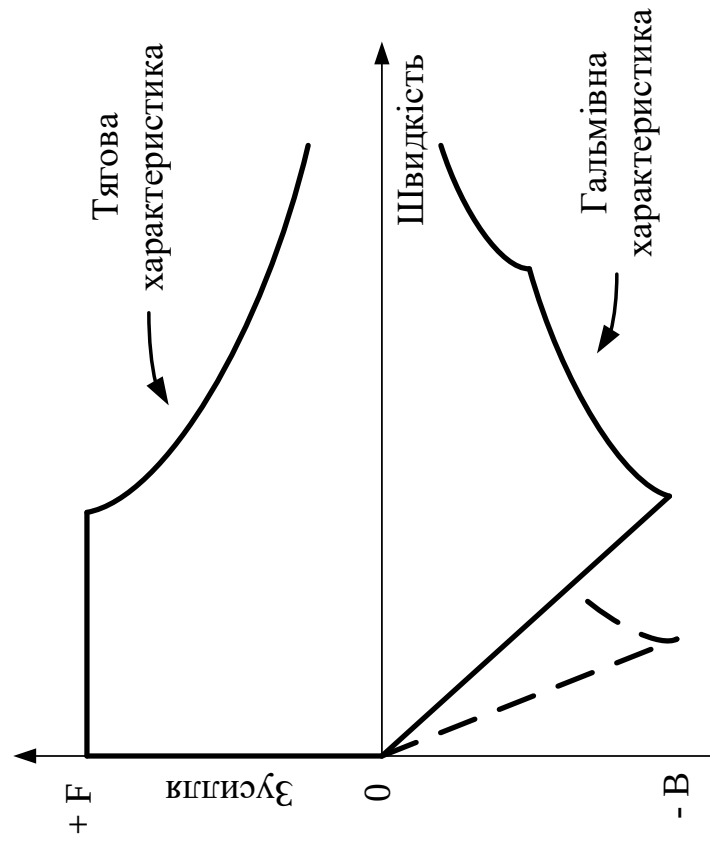
друга позиція головного контролера

третя позиція головного контролера

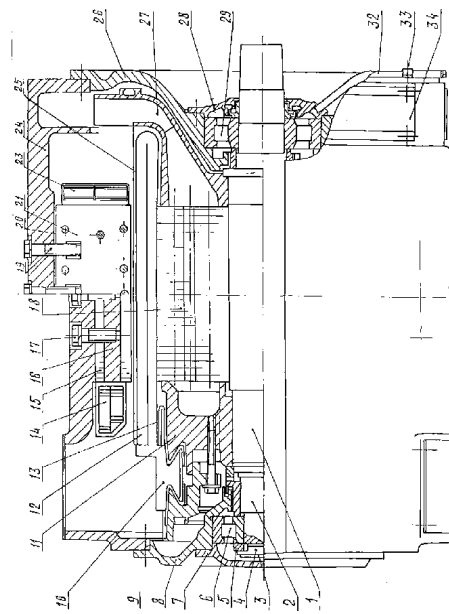
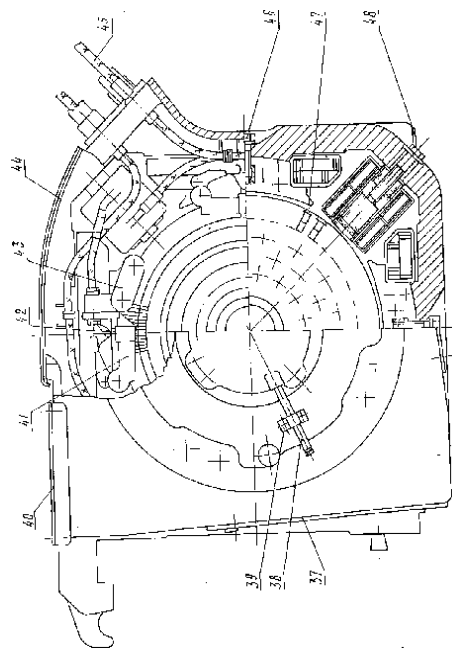
Силовая схема тягового электроприводу электропоездов типа ЕПЛ 9Т та ЭР9Т в режиме реостатного гальмування



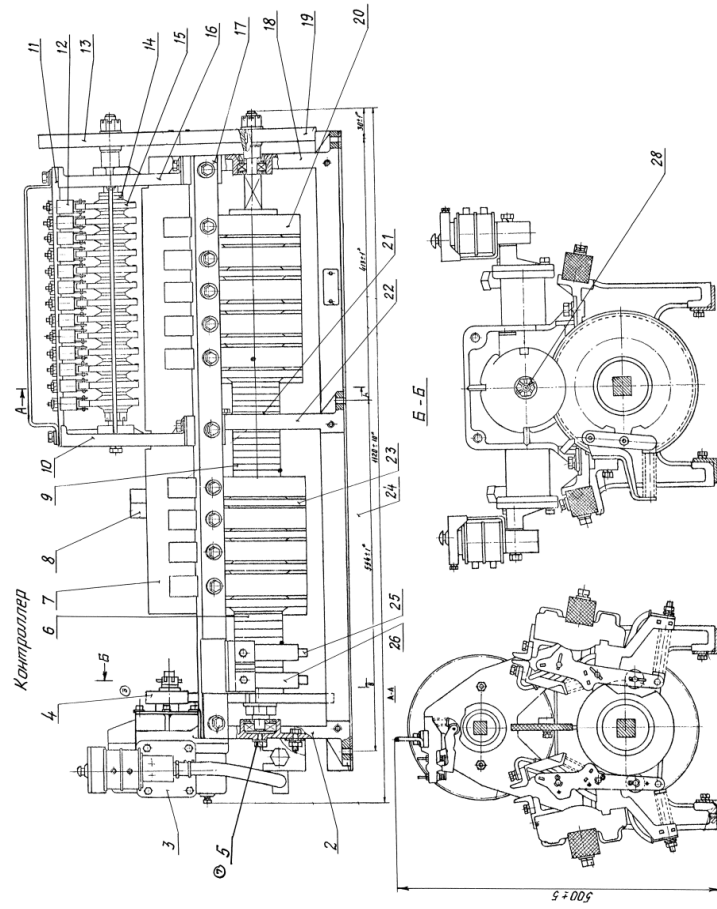
Тягова та гальмівна характеристики електропоездів типу ЕПЛ 9Т та ЭР9Т



Повздовжній та поперечний розріз тягового електричного

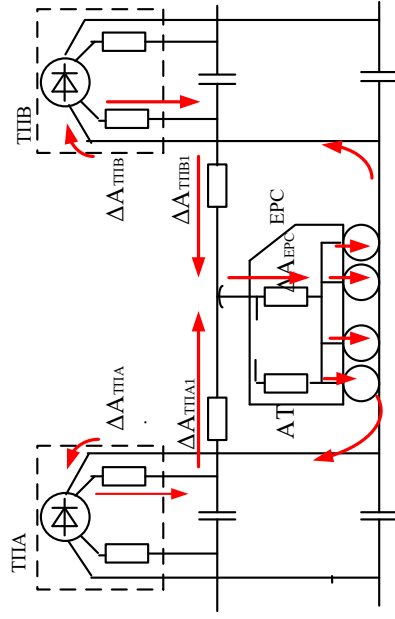


Силовий контролер 6

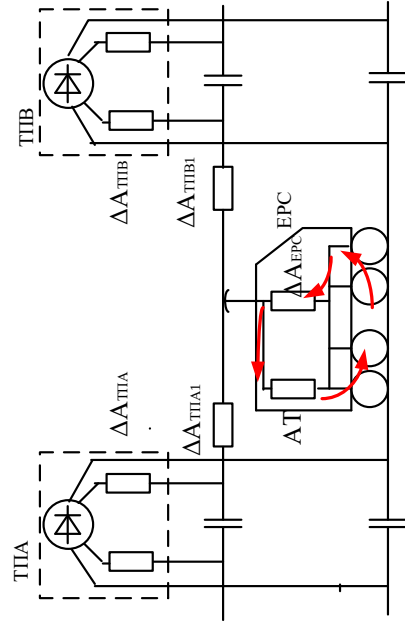


Спрощена функціональна схема протікання енергообмінних процесів в тяговій енергосистемі

При штатному тяговому електроприводі

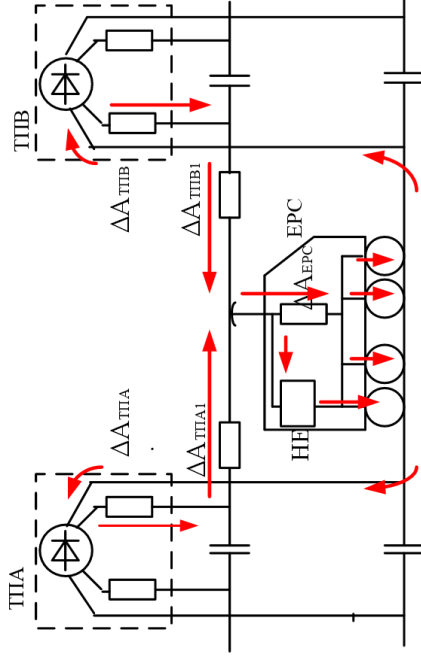


Режим тяги

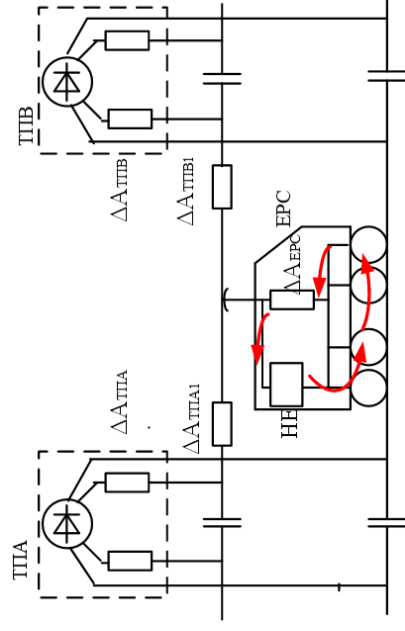


Режим електричного гальмування (реостатного)

При тяговому електроприводі з бортовим накопичувачем



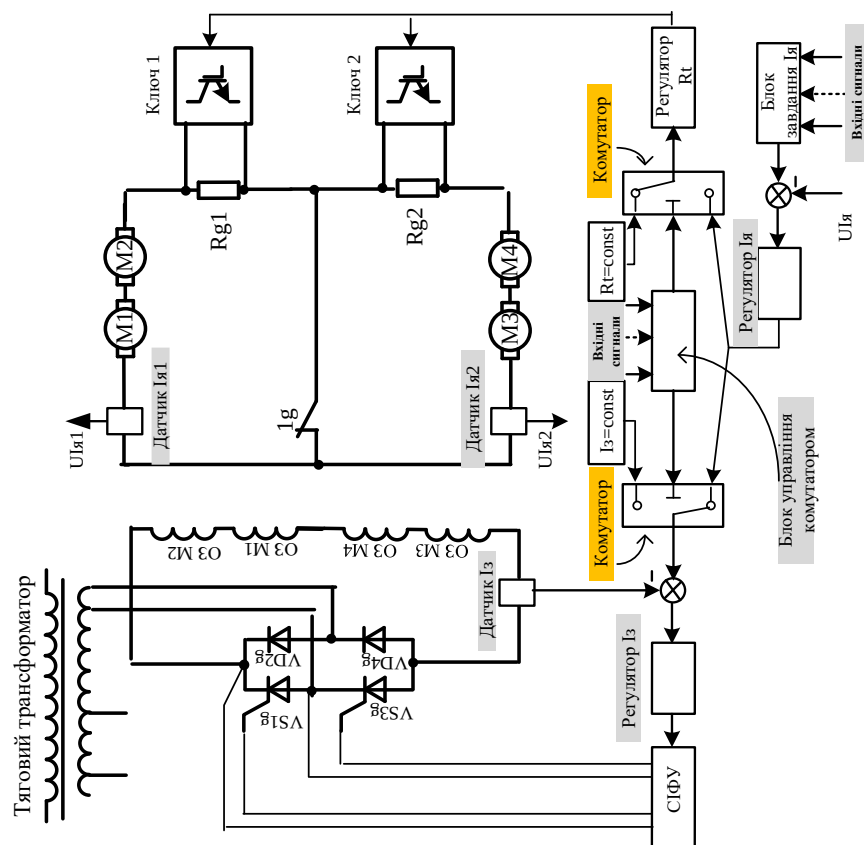
ТПА (ТПВ) – тягова підстанція; ЕРС – електричний рухомий склад; НК – накопичувач енергії; $\Delta A_{ТПА}$ ($\Delta A_{ТПВ}$) – енергетичні втрати у ТПА (ТПВ); $\Delta A_{ТМА}$ ($\Delta A_{ТМВ}$) – енергетичні втрати у тяговій мережі; $\Delta A_{ЕРС}$ – енергетичні втрати в ЕРС



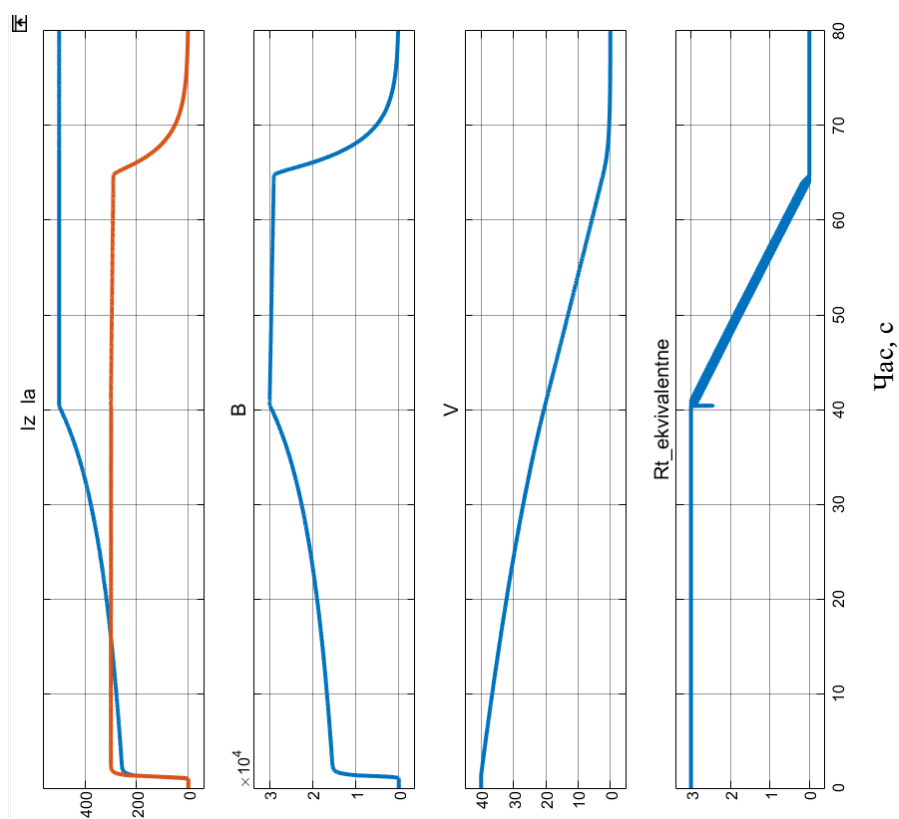
Режим електричного гальмування з накопичувачем енергії

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОГО РЕОСТАТНОГО ГАЛЬМУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ

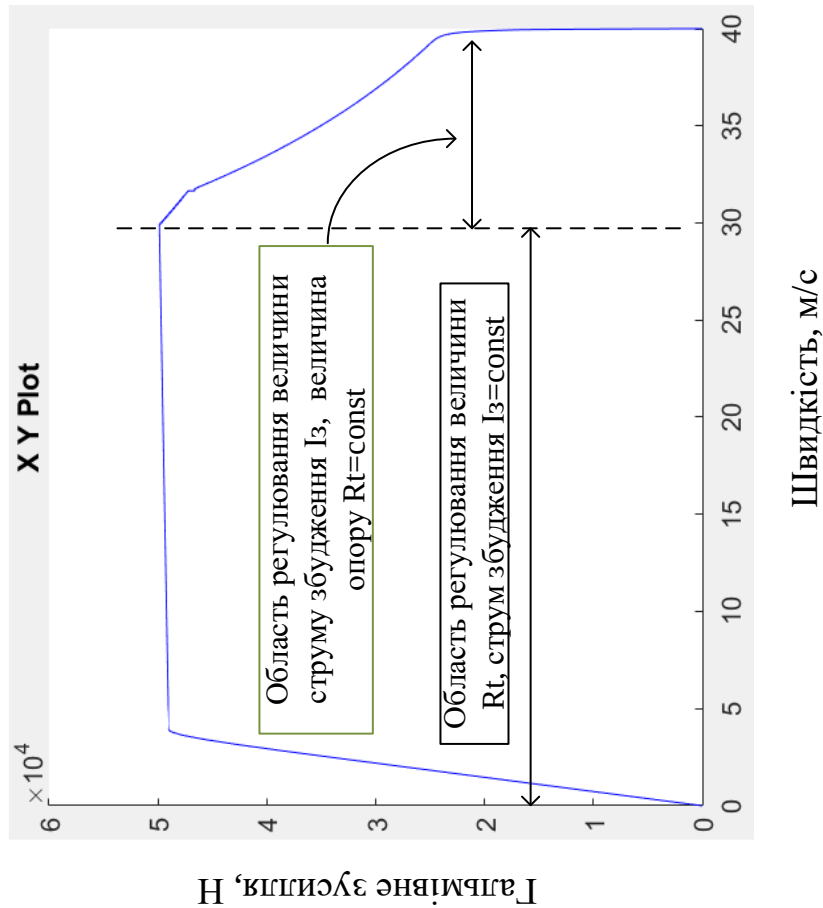
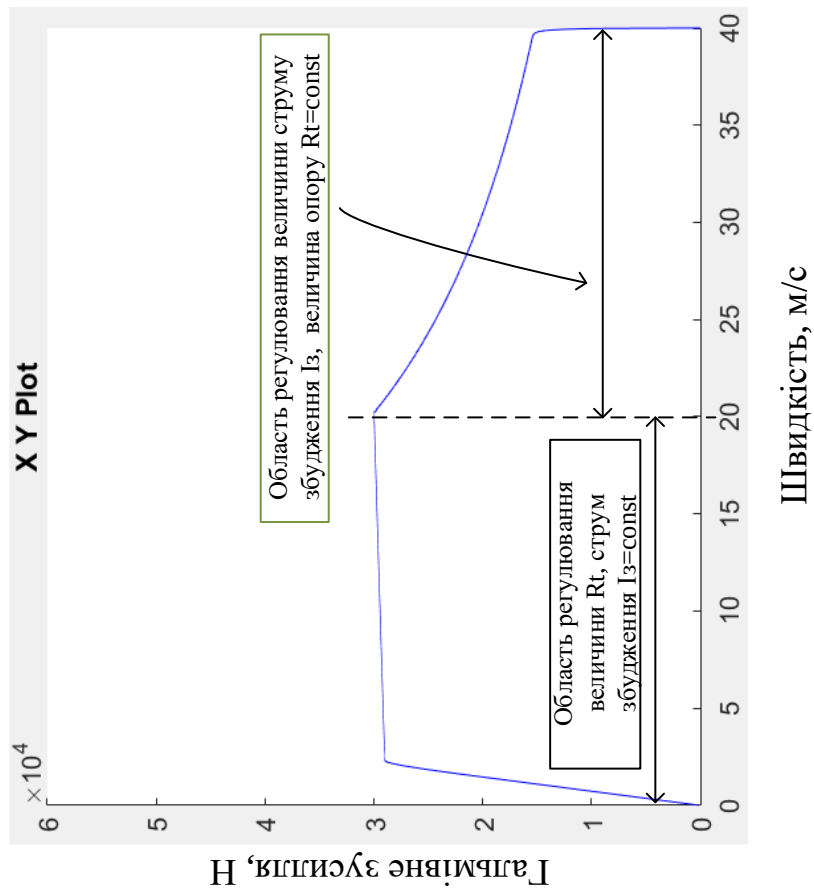
Спрощена функціональна схема удосконаленого тягового електроприводу



Осцилограми параметрів удосконаленого тягового електроприводу в режимі гальмування



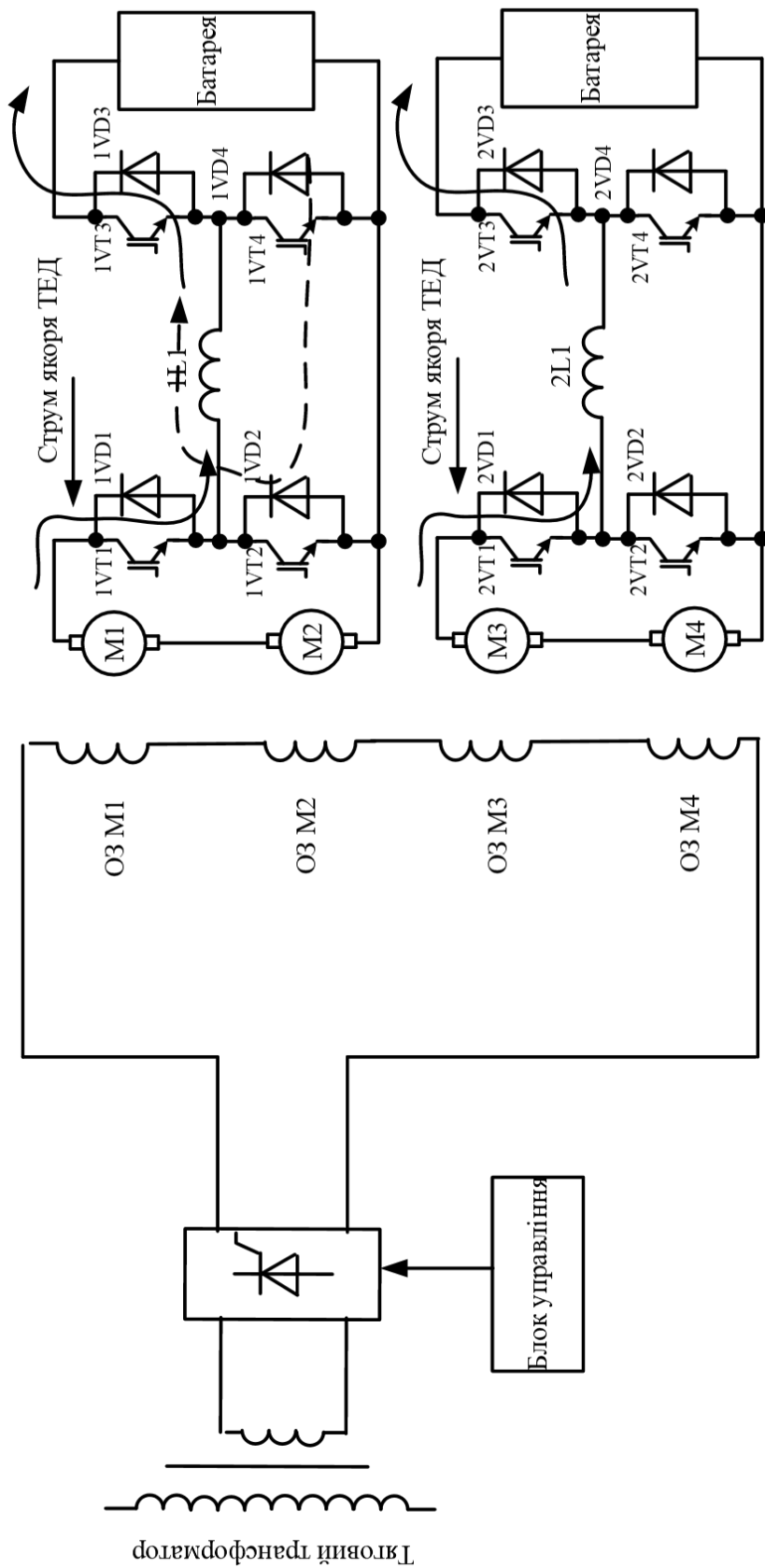
Залежність гальмівного зусилля в функції швидкості руху при обмеженні максимальної величини струму збудження 500 А, та максимальної величини струму якоря 500; та 300А



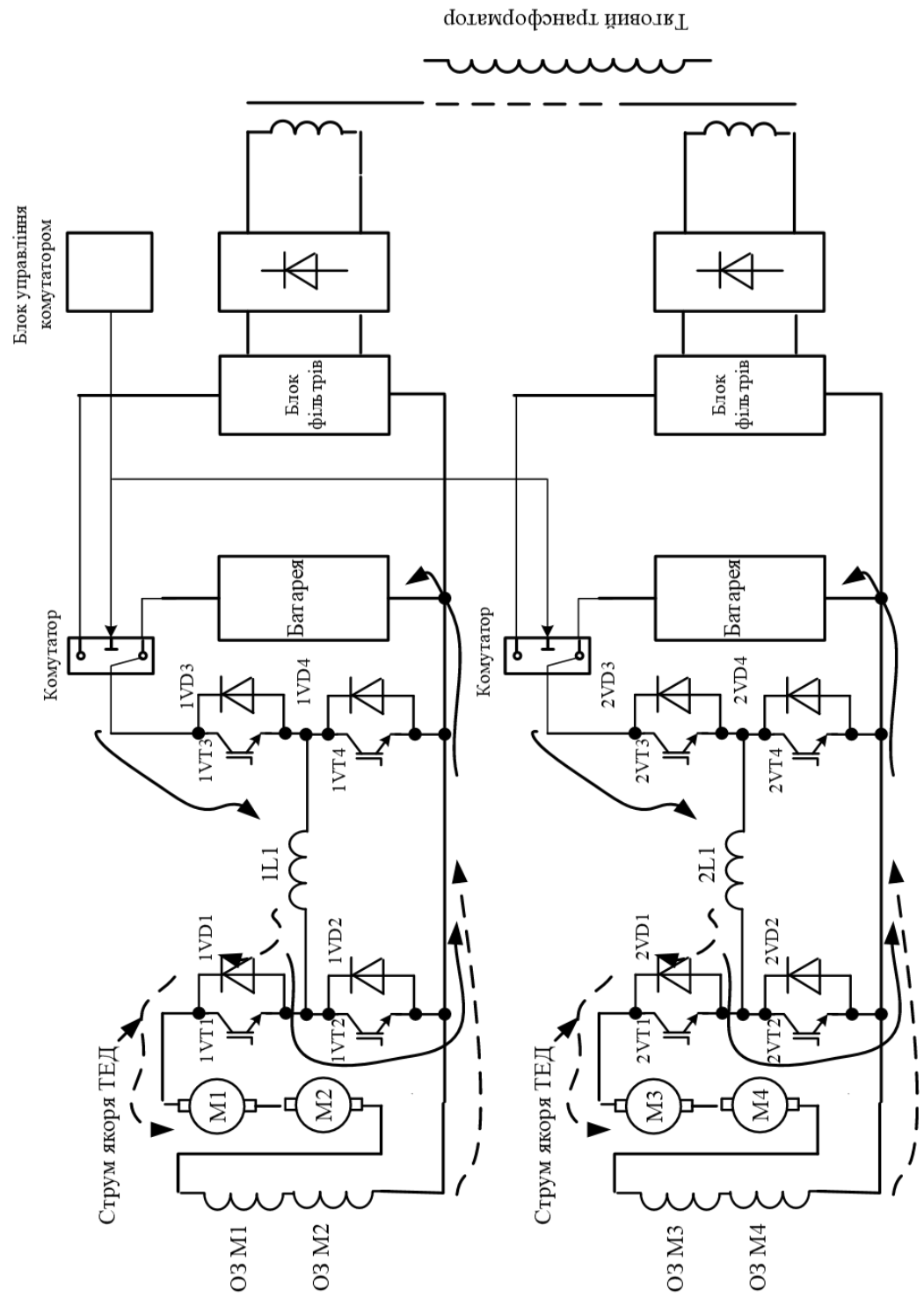
СИСТЕМА ЕЛЕКТРИЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ З БОРТОВИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ

10

Режим електричного гальмування з накопичувачем енергії



Режим тяги



Висновки

В ході виконання кваліфікаційної роботи показано, що тяговий електропривод електропоїздів змінного струму приміського сполучення, який експлуатується залізними України, потребує модернізації із-за зростання експлуатаційних витрат.

На основі проведених досліджень запропоновано варіант модернізації штатного тягового електроприводу змінного струму, яким передбачено розширення області ефективного гальмування. При цьому пропонується впровадження плавного регулювання струму якоря тягових електродвигунів як в режимі тяги так і в режимі гальмування шляхом заміни електромеханічного комутатора (силового контролера) на статичний перетворювач.