

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна**

Кафедра Електрорухомий склад залізниць  
(повна назва)

**«ДО ЗАХИСТУ»**

Завідувач кафедри

Гетьман Г.К.  
(підпис) (ПІБ)

2020 р. \_\_\_\_\_  
« \_\_\_\_\_ »

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань 14 Електрична інженерія  
(шифр) (назва)

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код) (повна назва)

Спеціалізація Електричний транспорт  
(повна назва)

Тема Енергозберігаюча система тягового електроприводу  
електропоїздів постійного струму

Theme Energykeeping system of hauling  
electromechanic of electric trains of direct-  
current

Керівник дипломної роботи ст. викладач Васильєв В. Є  
(посада) (підпис) (ПІБ)

Нормоконтролер ст. викладач Васильєв В. Є.  
(посада) (підпис) (ПІБ)

Студент групи ЕТ1912 Маханьов О.В.  
(група) (підпис) (ПІБ)

Student Makhanov Oleksandr  
(Family name)

Дніпро

2020

## РЕФЕРАТ

Дипломна магістерська робота на тему «Енергозберігаюча система тягового електропривода електропоїздів постійного струму» складається з вступу, п'яти основних розділів, виконаних на 82 сторінках машинописного тексту, містить 34 ілюстрації, 12 таблиць, перелік посилань включає в себе 16 найменувань і трьох додатків на 14 сторінках. Загальний об'єм роботи 99 сторінок.

Об'єктом досліджень є методики більш точного розрахунку пуско-гальмівних діаграм з врахуванням впливу на процеси змінювання струмів якорів тягових машин і сил гальмування електропоїздів, затримки росту струму якорів при вимиканні ступенів пускового реостату і включення ступенів послаблення збудження з-за наявності в їх колі індуктивності, затримки зміни потоку збудження внаслідок дії вихрових струмів в осердях тягових машин і зміни швидкості руху в процесі росту струму якорів.

Предметом дослідження є методики розрахунки тягових і гальмівних характеристик з обґрунтуванням спрощеного врахування суми магнітних втрат в тяговій машині і механічних втрат в редукторі і оцінка з використанням методик енергетичної ефективності технічних рішень: зменшення зниження сил тяги і гальмування в процесі перегрупування тягових машин; зменшення часу хронометричного часу обертання реостатного контролера; використання при руху по тривалим перегонам при повторному включенні тяги тільки послідовного угруповання тягових машин.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження проводились з використанням методів основ електричної тяги, теорії тягового електроприводу і автоматичного управління. В розроблених методиках розрахунку пуско-гальмівних діаграм на електронних обчислювальних машинах використано чисельні методи розрахунку електричних кіл. Для апроксимації навантажувальних характеристик використовувалась кусочно-лінійна апроксимація кривої намагнічування.

Галузь застосування – залізничний транспорт, підприємства по ремонту електричного рухомого складу, локомотивні депо.

У вступі обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета і основні завдання роботи.

Перший розділ присвячений аналізу енергозберігаючої системи тягового електропривода електропоїздів постійного струму. Проаналізовано стан розвитку електропоїздів постійного струму, проведені роботи по

зниженню витрати енергії на тягу, виконано оцінку енергетичної ефективності, проаналізовано алгоритм роботи схеми силових кіл. Виявлене у випробуваннях підвищене нагрівання індуктивного шунта, використовуваного в режимі рекуперативного гальмування в якості струмообмежувального реактора в колі якорів ТМ обумовлює необхідність теоретичної оцінки можливості роботи рекуперативного гальма без струмообмежувального реактора.

У другому розділі виконано розрахунок пуско-гальмових діаграм з урахуванням прискорення поїзда, індуктивності і вихрових струмів тягових машин. Оцінено вплив способу обліку втрат в тяговим приводом на пуско-гальмові діаграми, виконано порівняння характеристик, які отримані в результаті розрахунку, з дослідними даними. Отримані з використанням уточнених розрахунків пуско-гальмових діаграм і розрахованих по ДСТУ втрат в передавальному механізмі значення витрати енергії значно відрізняються від дослідних, що може бути наслідком відмінності реальних втрат від розрахованих по ДСТУ. Тому розрахунки з використанням рекомендованої ДСТУ залежності втрат енергії від переданої потужності, дають невірні результати, що свідчить про необхідність уточнення даних про втрати енергії в редукторах тягового приводу.

В третьому розділі проводиться оцінка можливості вдосконалення та підвищення енергетичних показників енергозберігаюча система тягового приводу. Розглянуто питання забезпечення сталості сил тяги і гальмування на послідовно угруповання тягових машин. Усунення провалів сил тяги та гальмування технічно досягається за рахунок регулювання уставки струму якорів при послідовному з'єднанні тягових машин сплотки в режимі тяги в процесі ослаблення поля, а в режимі рекуперації - при виключенні баластного резистора. ці заходи покращують динаміку поїзда і знижують витрату енергії орієнтовно на 2.5%.

Ключові слова: контакт, геркон, реле, котушка, обмотка, опір, характеристика, якір, ресурс, параметр, ізоляція, замикання, пробій, стан, імпульс, діагностування, стенд.

## **Перелік умовних позначок, символів, скорочень і термінів**

ЕП - приміський електропоїзд;  
ПЗ – регіональна філія «Придніпровська залізниця»;  
ПС - постійний струм;  
ТМ - тягова машина;  
ОП - ослаблення поля;  
РРГ - рекуперативно-реостатне гальмування;  
ТЕП - тяговий електропривод;  
ЕС - енергозберігаюча система;  
ВВ ТМ - високовольтна тягова машина;  
НВ ТМ - низьковольтна тягова машина;  
ЕО – електрообладнання;  
НЗ ТМ - незалежне збудження тягових машин;  
ПГР - пуско-гальмівний резистор;  
РК - реостатний контролер;  
ЕРС - електрорухомий склад.

## ВСТУП

У вирішенні транспортних проблем великих міст нашої країни взагалі і їх зв'язків з обласними населеними пунктами і з найближчими обласними центрами і містами особливо важливе, а часто і вирішальне, місце займають приміські електропоїзди (ЕП). Залізниці великих міст країни, в першу чергу Харкова і Дніпра, електрифіковані на постійному струмі і споживають на забезпечення руху електропоїздів найбільшу кількість електроенергії. Зокрема, на регіональній філії «Придніпровська залізниця» АТ «Укрзалізниця» (ПЗ) електропоїзди постійного струму (ПС) споживають за рік з системи зовнішнього електропостачання близько 0,5 млрд. кВт\*год електроенергії і її абсолютна і питома витрата на одиницю роботи (пробігу поїздів) постійно зростає. Останнє обумовлено тим, що реальні енергетичні показники кожної нової серії ЕП виявляються гіршими, ніж попередніх.

Сьогодні більшу частину експлуатованих ЕП ПС (на ПЗ близько 50%) становлять однотипні по електричному обладнанню поїзда серій ЕР1 і ЕР2 випуск яких почався ще в 1957 р. Низькі енергетичні показники цих ЕП обумовлені відсутністю у них рекуперативного гальмування і поганою динамікою, зумовленими відносно малою потужністю тягових машин (ТМ) і високим для таких машин напругою на їх колекторах (більш 1,5 кВ в реальних умовах експлуатації), що при відсутності компенсаційної обмотки, обмежує ослаблення поля (ОП) в тязі величиною 50% і практично виключає можливість застосування рекуперації. Ці обставини послужили підставою для розробки і освоєння виробництва ЕП з рекуперативного-реостатним гальмуванням (РРГ). Ці роботи, після виготовлення кількох дослідних ЕП і трьох модифікацій поїздів серії ЕР22, завершилися освоєнням в 1982 році серійного виробництва ЕП типу ЕР2Р.

На всіх наступних серіях ЕП ПС (ЕР2Т, ЕПЛ2Т) використовується електрообладнання з неprincipовими змінами схеми силових кіл відпрацьованого на ЕР2Р тягового електроприводу (ТЕП) з РРГ.

Очевидними і вагомими перевагами поїздів ЕР2Р і наступних серій ЕП з РРГ перед ЕР2 є:

- зниження вдвічі напруги на колекторах ТМ, що підвищує їх ККД, і надійність, що полегшує вирішення проблеми збільшення потужності і дозволяє без застосування компенсаційної обмотки використовувати глибоке ослаблення поля і, отже, збільшити силу тяги на високих швидкостях руху;
- наявність електричного гальмування, що забезпечує можливість повернення енергії в контактну мережу, що підвищує безпеку руху і полегшує роботу машиністів, а також різко скорочує знос гальмівних колодок і коліс і забруднення баласту шляху;

- відсутність перегрупувань ТМ, що скорочує кількість електрообладнання і спрощує схему силових кіл і, отже, додатково підвищує надійність роботи поїзда.

Разом з тим, відсутність перегрупувань ТМ на ЕП з РРГ значно збільшує пускові реостатні втрати і знижує кількість енергії рекуперації. Вплив цих факторів на енергетичні показники ЕП падає з ростом технічної швидкості руху  $V_T$ , а під час розробки ЕП з РРГ їх енергетичні показники оцінювалися при  $V_T = 72$  км/год, при якій поїзд ЕР2Р з РРГ завдяки кращій динаміці і наявності рекуперації споживає з системи зовнішнього електропостачання на 40% енергії менше, ніж поїзд ЕР2, тобто володіє чудовими енергетичними показниками.

Однак і сьогодні  $V_T < 55$  км/год і потяги типу ЕР2Р споживають в тязі на 1/3 більше енергії, ніж ЕР2 і це збільшення не компенсується навіть при використанні рекуперації. Ця обставина послужила підставою розробки енергозберігаючої системи тягового електроприводу (ЕС ТЕП), в якій по відношенню до серійних ЕП з РРГ може бути досягнуто скорочення споживання енергії із зовнішнього електропостачання завдяки застосуванню схеми сплочування на 1/3 при збереженні реалізованих на поїздах з РРГ переваг. Отримані результати є достатньою підставою для використання ЕС ТЕП як при модернізації експлуатованих, так і при виробництві нових ЕП.

Мета роботи. Метою виконаних досліджень є розробка методики більш точного розрахунку пуско-гальмівних діаграм з урахуванням впливу на процеси зміни струмів якорів ТМ і сил тяги та гальмування ЕП, уповільнення зростання струмів якорів при виключенні ступенів пускового резистора і включенні ступенів ослаблення поля через наявність в їх колі індуктивностей, запізнювання зміни потоку збудження внаслідок дії вихрових струмів в магнітопроводах ТМ і зміни швидкості руху в процесі росту струмів якорів, а також - уточнення методики розрахунку тягових і гальмівних характеристик з обґрунтуванням спрощеного обліку суми магнітних втрат в ТМ і механічних втрат в редукторі і оцінка з використанням розробленої методики енергетичної ефективності перерахованих нижче технічних рішень:

- усунення зниження сил тяги та гальмування в процесі перегрупувань ТМ;
- зменшення часу хронометричного обертання реостатного контролера;
- використання при русі по довгим перегонам при повторних включених тяги тільки послідовного угруповання ТМ.

Крім того, метою роботи є теоретична оцінка можливості спрощення електрообладнання, зокрема, шляхом виключення з кола струмів якорів в режимі рекуперації струмообмежувального реактора.

# 1 ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧА СИСТЕМА ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

## 1.1 Актуальність проблеми

На всіх електропоїздах постійного струму, що випускалися раніше, крім партії поїздів типу ЕР22, аж до 1982 року, коли було припинено випуск електропоїздів (ЕП) серії ЕР2, використовувався тяговий привід з двоступінчастим реостатним пуском, без електричного гальмування, застосування якого на ЕП різко знижує експлуатаційні витрати завдяки зниженню зносу гальмівних колодок і бандажів коліс вагонів і зменшення забруднення баластної призми продуктами їх зносу, а також за рахунок можливого при рекуперації повернення в контактну мережу значної кількості енергії. Одночасно підвищується безпека руху завдяки наявності другого гальма, і внаслідок більшої ефективності електричного гальма по відношенню до механічного.

При реальних параметрах системи електропостачання не гарантована 100% можливість споживання енергії рекуперації іншими ЕП або електровозами, то система електричного гальмування повинна забезпечувати заміщення рекуперації реостатним гальмом. Отже, електричне гальмування повинно бути рекуперативним-реостатним (РРГ).

Для ЕП така система тягового електроприводу (ТЕП) з РРГ була розроблена Трахтманом Л.М. в 1952-1954 рр [1]. У той час не була з достатнім ступенем переконливості вирішена задача забезпечення автоматичного перегрупування тягових машин (ТМ) в режимі рекуперації без скидання гальмівної сили і з прийнятною якістю перехідного процесу. Тому вимушено було прийнято рішення про використання на нових ЕП з РРГ одноступінчастого рекуперативного гальма і, як наслідок, також одноступінчастого пуску.

Відмова від використовувався до цього на всіх ЕП двоступеневого пуску з перегрупуванням ТМ призводить до зростання реостатних втрат при пуску, а також знижує ефективність рекуперативного гальмування. Тому було вжито заходів для ослаблення дії цих недоліків шляхом використання ТМ з низьколежачими характеристиками, що забезпечують зниження швидкостей закінчення реостатного пуску і рекуперативного гальмування, а також - підвищення динамічних показників ЕП за рахунок збільшення потужності ТМ і використання більш глибокого ослаблення поля завдяки зниженню напруги на їх колекторах вдвічі.

У той час передбачалася можливість швидкого і суттєвого збільшення технічної швидкості руху ЕП. З цієї причини енергетична ефективність



розроблюваних систем ТЕП оцінювалася за їхніми показниками за технічною швидкістю близько 70 км/год, при якій різко зростає витрата енергії на тягу, а питоме значення в ньому реостатних втрат через їх постійність падає. Тому при високій ефективності рекуперативного гальмування ЕП з одноступінчастим пуском і РРГ в цьому режимі можуть споживати від тягових підстанцій істотно менше електроенергії в порівнянні з ЕП з двоступінчастим пуском, але без рекуперативного гальма.

Крім того, створювалася система ТЕП з РРГ мала по відношенню до експлуатованих систем з двоступінчастим пуском три істотні переваги:

- вдвічі меншу напругу на колекторах ТМ, що підвищує надійність їх роботи, дозволяє використовувати глибоке ослаблення поля і полегшує вирішення завдання збільшення їх потужності;

- збільшення потужності ТМ і можливість глибокого ослаблення поля разом з використанням електричного гальмування підвищують динамічні показники поїзда і, отже, знижують витрату енергії на тягу;

- схеми силових кіл і кіл управління ТЕП з одноступінчастими пуском і гальмуванням значно простіше і, отже, надійніше схем ТЕП з двоступінчастим пуском.

Розглянуті вище обставини послужили підставою для рішення про створення ЕП з РРГ. Нова система ТЕП з РРГ була спочатку досліджена на дослідному ЕП типу РС (1957 р), потім відпрацьовувалася на поїздах ЕР6 (1959 рік) і ЕР10 (1960), а в 1964-1968 рр. була випущена партія з 66-и обладнаних нею ЕП типу ЕР22.

Масова експлуатація ЕП типу ЕР22 першої модифікації показала, що їх електричне гальмо в режимі рекуперації практично непрацездатне через використання по аналогії з електровозами в якості збудника генератора постійного струму із ступінчастим інерційним регулюванням його струму збудження. В кінцевому підсумку для практичного використання була обрана система, в якій обмотки збудження ТМ отримують живлення від синхронного генератора через повністю керований трифазний мостовий випрямляч з практично безінерційним фазовим керуванням, що забезпечує примусове зменшення струму збудження. Ця система була використана при модернізації експлуатованих поїздів ЕР22, а також в двох побудованих в 1972 р поїздах ЕР22М і в двох випущених в 1975 р поїздах ЕР22В. Останні в 1976 р були рекомендовані МПС для серійного виробництва.

В 1982 році було освоєно серійне виробництво поїздів ЕР2Р на базі механічної частини вагонів поїзда ЕР2 довжиною 19,5 м з використанням комплекту електрообладнання поїзда ЕР22В. При цьому питома потужність поїзда ЕР2Р по відношенню до ЕР2 збільшилася на 13,67%, що разом з більш

глибоким ослабленням поля ТМ забезпечило істотне підвищення його динамічних показників. Завдяки цьому, незважаючи на збільшення маси поїзда майже на 6%, поїзд ЕР2Р при напрузі в контактній мережі 3,3 кВ забезпечує рух по перегону 3 км з технічною швидкістю 70 км/год при довжині шляху розгону менше 1,5 км. У той час як у ЕР2 при технічній швидкості руху 70 км/год шлях розгону перевищує граничні 1,5 км.

Разом з тим, зростання прискорення поїзда забезпечує і зниження витрати енергії на тягу, яке за технічної швидкості руху 70 км/год у ЕР2Р по відношенню до ЕР2 становить близько 15%. Велику додаткову економію енергії дає високоефективне при таких швидкостях руху рекуперативне гальмування. В результаті загальне зниження витрати енергії при заміні поїздів ЕР2 поїздами ЕР2Р в розглянутому режимі руху склало б близько 40%. Отже, при прогнозуванні зростання швидкості руху ЕП, з урахуванням якого і оцінювалися енергетичні показники поїзда ЕР2Р, його використання замість ЕР2 було б високоефективним.

Однак, замість очікуваного зростання, відбулося зниження швидкостей руху ЕП. Сьогодні в якості режиму, найбільшою мірою відповідаючого існуючим умовам експлуатації, використовують режим руху поїзда по перегону довжиною 3 км з технічною швидкістю 55 км/год. Але в цих умовах, навіть в штатному режимі руху (безперервний розгін, вибіг, гальмування) витрата енергії на тягу у ЕР2Р вже вище, ніж у ЕР2, а ефективність рекуперації мала. Отже, енергетична ефективність ЕР2Р різко знижується.

Крім того, умови реальної експлуатації істотно відрізняються від використовуваних в тягово-енергетичних розрахунках. Практично всі ці відмінності знижують енергетичну ефективність поїзда ЕР2Р:

- фактична технічна швидкість руху суттєво менше обчисленої за розкладом і менше 55 км/год;
- довжина перегонів в зонах найбільш інтенсивного руху ЕП менше 3-х км;
- напруга в контактній мережі як в тязі, так і при рекуперації вище використовуваних значень 3,0 і 3,5 кВ;
- умови зчеплення часто не дозволяють реалізувати розрахункову пускову силу тяги - обумовлюють боксування і змушують знижувати уставку струму;
- далеко не завжди реалізується тільки штатний режим руху ЕП: трапляються повторні пуски, «підтягування», виконання попереджень про зниження швидкості, рух по видаленню попереду поїзда, що їде попереду.

Ці обставини, разом з більшою ефективністю механічного гальмування ЕР2 усіма вагонами по відношенню до електричного гальмування ЕР2Р тільки

моторними вагонами, зумовили істотне погіршення енергетичних показників ЕР2Р в реальних умовах експлуатації. Уже в перших експлуатаційних випробуваннях електропоїздів ЕР2Р, було встановлено, що внаслідок одноступінчастого пуску, в тому числі підвищених реостатних втрат при повторних пусках і боксуваннях, у ЕР2Р додатково витрачається 2,84 кВт\*год/км, що становить 22,1% повної витрати електроенергії ЕР2 і середнє значення реалізованого коефіцієнта тяги ЕР2Р на 15% менше зазначеного в Технічному завданні, а середнє значення повернення при рекуперації становить 10% витрати електроенергії в тяговому режимі. Отже, рекуперація не компенсує збільшення витрати енергії в тязі.

Як тільки було виявлено низькі енергетичні показники ЕР2Р в реальній експлуатації і стала очевидною безперспективність значного підвищення технічної швидкості руху ЕП - розробники ТЕП з РРГ почали дослідження можливості поліпшення енергетичних показників цієї системи ТЕП. Очевидним принциповим рішенням цієї проблеми, яка диктувалася великими реостатними втратами під час пуску і високою швидкістю закінчення рекуперації у поїздів ЕР2Р, було створення ТЕП з РРГ, але з двоступінчастими пуском і гальмуванням, тобто з перегрупованням ТМ. При його розробці спочатку розглядалися два альтернативних рішення: з використанням високовольтних (ВВ) ТМ з максимальною напругою на колекторах 2 кВ, що дозволяє здійснити перегруповання в схемі одного вагона, і збереження відпрацьованого комплексу електрообладнання з низьковольтними (НВ) ТМ з напругою на колекторах до 1 кВ із здійсненням перегруповання в схемі сплотки двох моторних вагонів. Кожне з цих рішень має свої переваги й недоліки. Їх аналіз показав, що перевагу слід віддати схемі сплотки, хоча причиною відмови від реалізації на практиці в початковій стадії розробки технічного рішення із застосуванням ВВ ТМ послужила відсутність ТМ з  $U_k = 1,5$  кВ з компенсаційною обмоткою.

Проведені експерименти підтвердили працездатність кожного з трьох розроблених варіантів реалізації ТЕП з РРГ:

- в схемі одного чотиримоторного вагона;
- в сплотку з двох вагонів з можливістю роботи тільки в 8-й моторній схемі;
- в сплотку із забезпеченням індивідуальної роботи кожного з вагонів як одночасно, так і поодиночі, в разі відключення одного з них.

Отримані результати показали переваги використання 8-й моторної схеми сплотки за багатьма показниками, зокрема за кількістю і складністю електрообладнання. У свою чергу, в варіанті сплотки без забезпечення індивідуальної роботи об'єднаних нею вагонів може бути досягнуто подальше

істотне скорочення кількості електрообладнання. Однак, з огляду на вимогу працівників експлуатації про забезпечення індивідуальної роботи вагонів сплотки, для доопрацювання був прийнятий цей її варіант.

Економія енергії досягається за рахунок скорочення її втрат в пускових резисторах і збільшення повернення при рекуперації.

Застосування перегрупування при класичному реостатному пуску скорочує втрати енергії в пускових резисторах теоретично удвічі. Пояснення енергозберігаючого алгоритму управління пуском лежить в теоретичному виключенні реостатних втрат на паралельному угрупованні. Насправді, через інерційність реостатного контролера, ці втрати існують. Однак, реостатні втрати, що становлять у серійних ЕП в середньому експлуатаційному режимі близько 20%, зменшуються в 3,5 рази. Це дає зниження витрати енергії в тязі орієнтовно на 15%.

На серійних ЕП рекуперація закінчується при русі по перегону 3 км з  $V_T=55$  км/год при швидкості близько 52 км/ч, а включається при 55 км/ч. На поїзді з ЕС ТЕП рекуперація закінчується при швидкості 27 км/ч. В результаті в мережу додатково повертається 10-15% від витраченої при розгоні енергії. При цьому теоретично загальне скорочення витрати енергії ЕП (різниці спожитої з контактної мережі на тягу і повернутої в неї при рекуперації) досягає 25-30%.

Можливість досягнення такої енергетичної ефективності шляхом заміни ТЕП серійних ЕП з РРГ на ЕС ТЕП безперечна, так як вона досягається за рахунок загальновідомих і очевидних енергетичних переваг схем з двоступінчастим пуском і рекуперативним гальмуванням перед схемами без перегрупування ТМ. До того ж вона досягається практично без зміни складу електрообладнання серійних ЕП, тобто без ускладнення і подорожчання комплекту електрообладнання (ЕО) і без зниження його надійності.

Оцінки енергетичної ефективності ЕС ТЕП виконувалися за загальноприйнятою спрощеною методикою, без врахування впливу на пуско-гальмівні діаграми уповільнення змін струмів якорів зважаючи на наявність в їх колах індуктивностей і потоків збудження через вплив вихрових струмів в магнітопроводах ТМ, а також зміни швидкості руху ЕП в процесі досягнення струмами якорів нового значення після включення чергової сходинки регулювання сил тяги та гальмування.

Витрати на обладнання потягів ЕС ТЕП окупаються за рахунок зменшення споживання енергії з системи зовнішнього електропостачання. Ці витрати максимальні при модернізації поїздів ЕР2Р. Однак на них досягається найбільше зниження споживання енергії, яка складає не менше 30%. При середньорічному пробігу 135 тис.км і витраті електроенергії 20 кВт\*год/км

таке зниження її споживання одним поїздом дасть при вартості 1,86 грн./кВт\*год (2020 р) економію близько 675 тис.грн. При нинішньому темпі зростання вартості енергії термін окупності модернізації EP2P в 2021 р при KP1 складе близько одного року, а при деповському ремонті не перевищить 1,5 року. Модернізація ЕП з працюючою рекуперацією дає дещо меншу економію енергії, але знизиться і вартість модернізації. Тому термін її окупності також не перевищить одного року.

Виробництво нових поїздів з ЕС ТЕП може бути освоєно протягом декількох місяців. Отже, цілком реальна можливість скорочення споживання енергії як мінімум на 25% поїздами з РРГ протягом менш шести років. Це дасть Придніпровській залізниці навіть за діючої ціною електроенергії скорочення експлуатаційних витрат на 125-150 млн.грн./рік.

## 1.2 Алгоритм роботи схеми силових кіл

Розроблена МЕІ [8] принципова електрична схема силових кіл сплотки вагонів поїзда EP2C показана на рисунку 1.1. На цій схемі не показані всі апарати і додаткові контактори гальмівного перемикача ТП, що деякі беруть участь в комутації схеми силових кіл в процесах тяги і гальмування, включаючи всі апарати захисту.

На рисунку 1.1 показано, що як в режимі гальмування (обов'язково), так і в режимі тяги (бажано), використовується незалежне збудження тягових машин НЗ ТМ. У цьому випадку, крім поліпшення тягових властивостей, зазнає суттєвого спрощення схема силових кіл завдяки виключенню необхідності виключення обмоток збудження ТМ з кіл струму якорів і підключення їх до відводів збудника в режимі електричного гальмування. З'являється додаткова перевага - можливість практично миттєвого переходу від тяги до рекуперативного гальмування простим збільшенням струму в обмотках збудження. Однак реалізувати ці переваги НЗ ТМ сьогодні не вдається через недостатню потужність встановленого на всіх поїздах з РРГ електромашинного перетворювача і відсутності відпрацьованої конструкції статичного перетворювача, необхідного для забезпечення незалежного збудження в тязі. Тому для електропоїзда EP2C розроблений варіант схеми зі збереженням послідовного збудження ТМ в режимі тяги. Але необхідні для цього апарати і додаткові контактори ТП на схемі (рисунок 1.1) не показані (це реверсори і пристрої ослаблення поля при послідовному збудженні), так як принципи роботи схеми зберігаються незмінними як при послідовному, так і при незалежному збудженні ТМ в режимі тяги.

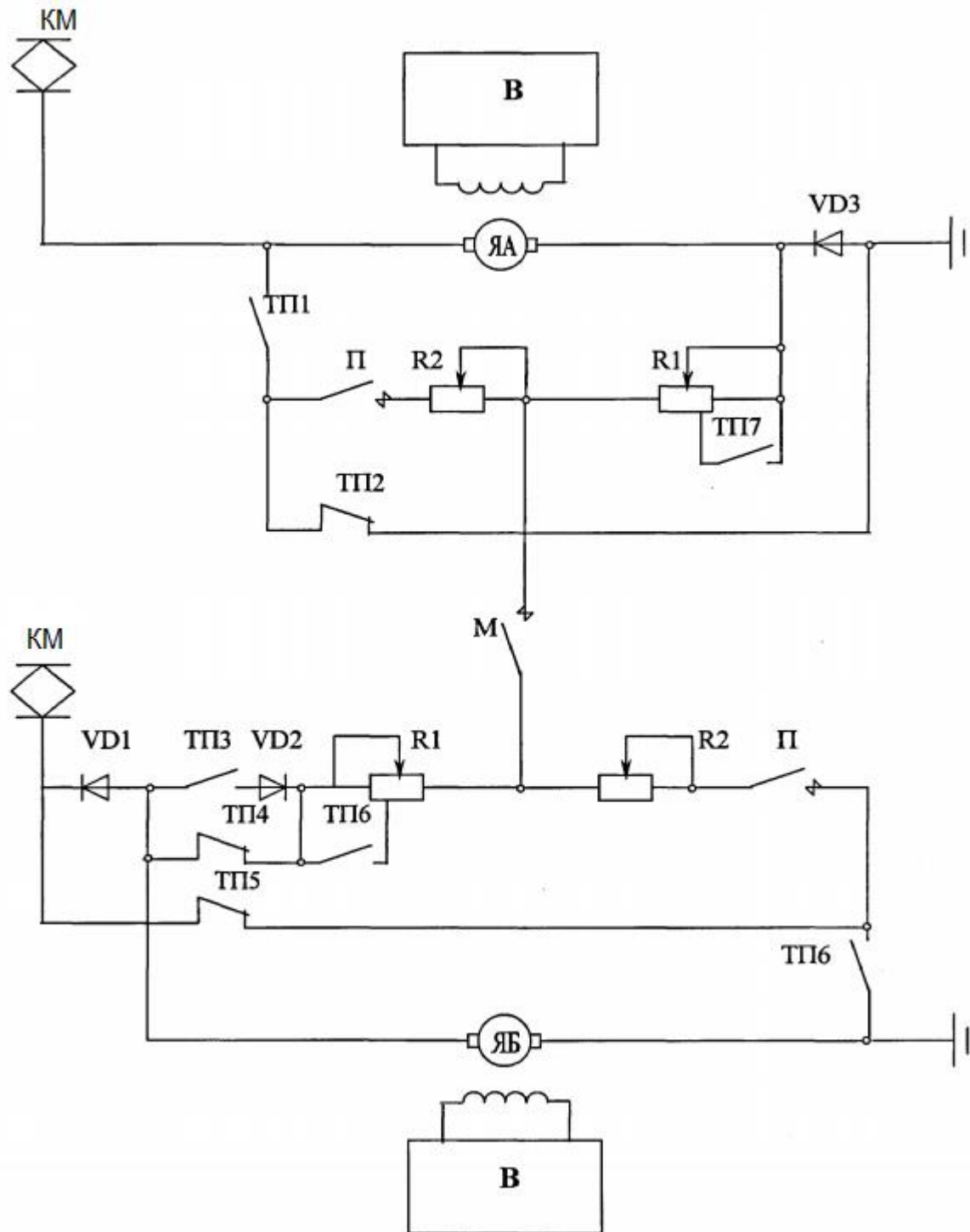


Рисунок 1.1 - Принципова електрична схема силових кіл сплотки вагонів поїзда EP2C

Особливістю даної схеми ЕС ТЕП є поділ пуско-гальмівних резисторів кожного вагона на дві групи, однакові на обох вагонах. Регулювання опорів груп резисторів здійснюється реостатним контролером ступінчато. Контактори гальмівного перемикача зображені в положенні "тяга".

Розроблена схема забезпечує як індивідуальну роботу вагонів А і Б, так і їх спільну роботу в режимі сплотки. В індивідуальному режимі роботи обох вагонів контактор М постійно розімкнутий. При цьому алгоритм роботи

кожного з вагонів не відрізняється від алгоритму роботи вагонів поїзда EP2T або серійних поїздів з прямим входом в рекуперацію: при пуску замкнуті контактори П і струм якорів регулюється зміною опорів обох груп R1 і R2 пуско-гальмівних резисторів ПГР; в режимі рекуперативного гальмування контактори П розімкнуті і струм якорів протікає по діодам VD1 і VD3; реостатне гальмування включається замиканням контакторів П.

У режимі сплотки під час пуску на послідовному угрупованні замкнутий контактор М і струм якорів ЯА і ЯБ вагонів А і Б регулюється зміною опорів тільки резисторів R1 в обох вагонах. При використанні в схемі двох реостатних контролерів РК, вимикання чергових ступенів опору на вагонах А і Б може проводитися по черзі. Цим досягається подвоєння числа ступенів регулювання сили тяги 8-вісної сплотки в порівнянні з режимом індивідуальної роботи вагонів.

Після виходу на автоматичну безреостатну характеристику послідовного угруповання (при повністю виключених опорах резисторів R1) можливі два алгоритму продовження пуску. У першому, як зазвичай, проводиться перегруповання ТМ. Для цього спочатку замикаються контактори П. Цим до контактної мережі через вагон Б послідовно підключаються обидві групи резисторів R2. Середня точка резисторів R2 при закорочених резисторах R1 виявляється з'єднаною контактором М з середньою точкою груп якорів ЯА і ЯБ - утворюється класична мостова схема. Після виключення контактора М кожна група якорів виявляється підключеної до контактної мережі через резистори R2, опір яких вибирається так, що падіння напруги на них при пусковому струмі становить половину напруги в контактній мережі. При цьому перегруповання відбувається без поштовху сили тяги.

У другому алгоритмі, після виходу на автоматичну характеристику послідовного угруповання перегруповання не проводиться, а триває пуск на послідовному угрупованні шляхом ослаблення поля ТМ, причому можливі два алгоритму цього процесу. У першому уставка реле прискорення залишається незмінною і включення чергової сходинки ослаблення поля проводиться при зменшенні струму якорів до тієї ж величини, що і в процесі реостатного пуску. При цьому через зменшення з ростом швидкості руху струму збудження відбувається зниження сили тяги.

У другому алгоритмі в процесі ослаблення поля збільшується уставка струму якоря. У цьому випадку зростання струму якоря може компенсувати зменшення струму збудження і сила тяги залишається постійною. У цьому полягає його перевага. Однак з'являються і два недоліки: ускладнення схеми керування і додаткові труднощі з організацією захисту від перевантажень

через збільшення струму якорів в граничному випадку більш ніж удвічі в порівнянні з уставкою при реостатному пуску. З огляду на ці обставини, на першому етапі створення системи тягового приводу для електропоїзди EP2C було визнано за доцільне використовувати описаний вище безреостатний пуск з постійною уставкою струму якорів, тобто з втратою сили тяги в інтервалі швидкостей руху, відповідному реостатному пуску на паралельному угрупованні ТМ.

При цьому, в разі виникнення необхідності в максимальному прискоренні поїзда під час пуску, можливо використання реостатного пуску і на паралельному угрупованні ТМ. Реостатні втрати при цьому збільшуються орієнтовно вдвічі, але на практиці необхідність в прискореному пуску виникають не часто і тому застосування безреостатного пуску на паралельному угрупованні дасть енергетичний ефект.

У процесі пуску на послідовному угрупованні ТМ з ослабленням поля доцільно, також як і при реостатному пуску, використовувати почергове включення ступенів ослаблення поля груп ТМ вагонів А і Б.

Алгоритм перегруповання ТМ при безреостатному пуску не змінюється (включаються контактори П, а потім вимикається контактор М), але під час перегруповання поле ТМ максимально послаблено, а швидкість руху поїзда орієнтовно в два рази вище, ніж при перегрупованні безпосередньо після закінчення реостатного пуску на послідовному угрупованні. Після перегруповання поле посилюється до повного, в результаті чого струм якорів ТМ через зростання їх е.р.с. зменшується до значення, істотно меншого струму уставки. Після цього починається вимикання ступенів опорів резисторів R2 при хронометричному обертанні реостатних контролерів обох вагонів.

Характер зміни сили тяги в процесі безреостатного пуску з регулюванням на постійність струму якорів і на постійність сили тяги дещо відрізняється. При регулюванні на постійність струму якорів сила тяги в процесі ослаблення поля з ростом швидкості руху знижується практично вдвічі, в процесі перегруповання вона змінюється незначно, а в процесі хронометричного виключення опорів резисторів R2 з ростом швидкості руху збільшується до початкового значення при збільшенні струмів якорів до уставки реле прискорення. Отже, через затримку в виключенні резисторів R2 відбувається додаткова втрата сили тяги, але зате виключається її поштовх.

У разі регулювання на постійність сили тяги в процесі ослаблення поля відбувається практично лінійне зростання струму якорів до близького до подвійного пускового значення, при перегруповання сила тяги знижується практично вдвічі, а при виключенні резисторів R2 процес зміни сили тяги не відрізняється від процесу при регулюванні на сталість струму якорів.



Перемикання схеми в режим електричного гальмування здійснюється за допомогою гальмівного перемикача ТП, контактори якого змінюють положення на протилежне.

При включенні гальмування спочатку збирається схема паралельного угруповання ТМ, яка утворюється при вимкнених контакторах П і М. При збільшенні е.р.с. ТМ вище напруги мережі, струм рекуперації починає протікати через діоди VD1 і VD3 в контактну мережу, тобто реалізується прямий вхід в рекуперацію.

З падінням швидкості руху ростуть струми збудження ТМ, і після досягнення ними заданого допустимого значення, здійснюється перегруповання ТМ на послідовне з'єднання. Для цього досить включити контактор М, в результаті чого діоди VD1 і VD3 закриваються, так як до них прикладається зворотна напруга, а струм рекуперації починає протікати через коло з послідовно включених ЯБ, R1, М, R1, ЯА.

У коло струму рекуперації включається частина резистора R1. Інша його частина використовується тільки в пуску на маневровій позиції. У режимі гальмування ці частини резисторів вимкнені контакторами ТП6 і ТП7.

Значення опорів частини резисторів R1, використовуваних при рекуперації, визначається з умови рівності падіння напруги в них половині напруги в контактній мережі при розрахунковому струмі рекуперації. При цьому перегруповання відбувається без поштовху струму якорів ТМ. При струмі уставки рекуперації 350 А і напрузі в контактній мережі при рекуперації 3750 В, частина резистора R1 повинна мати опір близько 5,36 Ом.

Після перегруповання можливі три алгоритму реалізації рекуперативного гальмування на послідовному угрупованні. У першому - безпосередньо після перегруповання проводиться виключення опору резисторів R1 при хронометричному обертанні РК. В результаті при незмінній уставці струму рекуперації падіння напруги в резисторах R1 зменшуються, що обумовлює необхідність зниження е.р.с. ТМ, яке забезпечується відповідним зменшенням струмів збудження. Після виключення резисторів R1 починається зростання струмів збудження до максимуму в мірі зниження швидкості руху. В кінцевому підсумку на цій ділянці гальмівної діаграми гальмівна сила теоретично спочатку падає до значення, близького до половини від максимального на паралельному угрупованні, а потім знову зростає до цього ж максимального значення.

Перевага цього алгоритму управління режимом рекуперації на послідовному угрупованні ТМ полягає в максимальному поверненню енергії в контактну мережу, а недолік полягає у втраті гальмівної сили і, отже, в погіршенні динаміки поїзда.

У другому алгоритмі виключення чергових ступенів баластних резисторів  $R1$  відбувається при збільшенні струму збудження до заданого максимального значення. При цьому струм якорів залишається незмінним, рівним струму уставки. Обмеження стрибків струму якорів при виключенні ступенів баластних резисторів  $R1$  забезпечується відповідним зниженням струму збудження. В кінцевому підсумку при розглянутому алгоритмі управління відбувається коливання гальмівної сили при збереженні незмінним її середнього значення.

Перевага розглянутого алгоритму управління режимом рекуперативного гальмування на послідовному угрупованні ТМ полягає в максимальній ефективності гальмівного процесу, що забезпечує найкращу динаміку поїзда. Недолік полягає у втраті енергії в баластних резисторах.

У третьому алгоритмі виключення чергових ступенів баластних резисторів  $R1$  відбувається при збільшенні струму якоря до заданого максимального значення, яке залежить від величини опору баластного резистора. Сталість гальмівної сили при виключенні ступенів баластних резисторів  $R1$  забезпечується відповідним зниженням струму збудження.

Перевага розглянутого алгоритму управління режимом рекуперативного гальмування на послідовному угрупованні ТМ полягає в забезпеченні граничної гальмівної сили при найбільшому поверненні енергії в контактну мережу.

Включення реостатного гальмування в кінці процесу рекуперації на послідовному угрупованні ТМ здійснюється за умови рівності нулю опорів резисторів  $R1$  і рівності максимальному заданому значенню струму збудження. Для цього включаються контактори  $\Pi$  і вимикається контактор  $M$ . В результаті якоря ТМ кожного вагона включаються на резистори  $R2$  свого вагона. Опір резистора  $R2$  вибирається з умови виключення поштовху струмів якорів при заміщенні рекуперативного гальмування реостатним. Отже, падіння напруги в  $R2$  кожного вагона має становити половину напруги в контактній мережі при рекуперації. Для струму уставки в режимі рекуперації 350 А при напрузі в контактній мережі 3750 В з умови переходу від рекуперації до реостатне гальмування без зміни струмів якорів знайдемо, що опір  $R2$  має дорівнювати 5,36 Ом.

Як впливає з описаного вище алгоритму роботи схеми в режимі електричного гальмування, при включенні гальма на будь-якій швидкості руху схема послідовно «відпрацьовує» всі види гальмування: рекуперативне на паралельному, а потім на послідовному угрупованні ТМ і реостатне. Якщо рекуперація на паралельному угрупованні при максимальному струмі збудження не починається (через низьку швидкості руху електропоїзда), то

проводиться перемикання на послідовне угруповання. Якщо і на послідовному угрупованні е.р.с. ТМ менше напруги в контактній мережі і рекуперації немає, то здійснюється включення реостатного гальмування.

Розглянута послідовність роботи схеми при включенні електричного гальмування має два недоліки: можливість появи моторного струму на послідовному угрупованні при її включенні на малій швидкості руху і затримка початку гальмівного процесу при включенні гальма при низьких швидкостях руху. Перший недолік схеми усувається включенням в неї діодної групи VD2, а другий не має істотного значення.

Затримка початку гальмівного процесу визначається часом хронометричного обертання реостатних контролерів при послідовному угрупованні ТМ. Отже, максимальна затримка буде при включенні гальмування в діапазоні швидкостей руху, відповідних зоні дії реостатного гальма, тобто при швидкості руху нижче орієнтовно 25 км/год. При почерговому обертанні РК двох вагонів при  $\Delta t$  позиції 0,5 сек максимальний час затримки включення реостатного гальмування складу близько 5 сек. За цей час поїзд при швидкості 25 км/год пройде тільки 35 м. Крім того, на такій малій швидкості ефективно механічне гальмування поїзда.

У разі зриву рекуперації, наприклад при підвищенні напруги в контактної мережі через відсутність споживача електроенергії, схема забезпечує заміщення рекуперації реостатним гальмуванням на всіх швидкостях руху без поштовхів гальмівної сили завдяки стежить зміни опорів груп резисторів R1. На паралельному угрупованні ТМ опір резисторів R1 максимально і становить 5,36 Ом. Тому при використанні реостатного гальмування кожна група ТМ включається на суму опорів резисторів R1 і R2, складову 10,72 Ом через які при напрузі на колекторах ТМ 3750 В протікає струм 350 А, рівний струму уставки при рекуперації. На послідовному угрупованні ТМ опір резисторів R1 змінюється так, що при включенні заміщуючого реостатного гальмування на будь-якій позиції РК сума падінь напруги на R2 і частині R1 при струмі уставки 350 А дорівнює напрузі на колекторах ТМ одного вагона.

При включенні реостатного гальмування на високій швидкості руху, спочатку відбувається гальмування з незмінним опором гальмівного контуру з послідовно включеними резисторами R1 і R2 і потім, після досягнення струмом збудження максимального значення, починається обертання РК і зменшення опору в колі струму якорів. В цьому випадку ступеневе зменшення опору гальмівних резисторів починається зі швидкості близько 50 км/год при уставці гальмівного струму 350 А.

Таким чином, схема (рисунок 1.1) при відносній простоті, з

використанням тільки штатного електроустаткування моторних вагонів електропоїзда ЕР2Т, забезпечує енергозберігаючий пуск з перегрупуваннями ТМ і енергетично ефективне рекуперативного гальмування також з перегрупуванням ТМ.

### 1.3 Вихідні дані і методика розрахунку пуско-гальмових характеристик

У розрахунках використані дані електропоїздів ЕР2Т з тяговими машинами 1ДТ003.5, параметри яких наведені в різних публікаціях РЕЗ, і відомі розрахункові формули і методики побудови пуско-гальмівних діаграм і тягових і гальмівних характеристик [2].

Рух по перегону починається зі зрушення нерухомого поїзда. У цей момент електрорушійні сили (е.р.с.) тягових двигунів дорівнюють нулю і струми їх визначаються відношенням прикладеної напруги до опору силового кола.

Коли якоря тягових двигунів починають обертатися, виникає е.р.с, спрямована назустріч прикладеній напрузі. Тому при постійній напрузі і опорі силового кола струм двигуна зменшується зі збільшенням швидкості. Поступово виводячи пусковий реостат, можна або підтримувати пусковий струм постійним, або регулювати його по заданому закону.

При відомій е.р.с. ТМ в режимах тяги (знак "-") або гальмування (знак "+")

$$E = \frac{U_{\text{КС}}}{n} \mp I \cdot (R_{\text{ТМ}} + R_{\text{б}}) \quad (1.1)$$

)

де:  $n$  - число послідовно включених ТМ;  $U_{\text{КС}}$  - напруга в контактній мережі, В;  $R_{\text{ТМ}}$  - сума опорів обмоток ТМ, Ом;  $R_{\text{б}}$  - опір пускового для режиму тяги і баластного гальмівного для режиму гальмування резисторів розрахованих на одну ТМ.

Швидкість руху обчислюється за формулою

$$V = \frac{a \cdot \pi \cdot D_{\text{ВК}}}{278 \cdot p \cdot N \cdot \mu} \cdot \frac{E}{\Phi} = \frac{E}{C_e \cdot \Phi} \quad (1.2)$$

і сили тяги або гальмування за формулою [3]

$$F = T_{\text{э}} \cdot K_{\eta} = \frac{\mu \cdot N \cdot p}{30.8 \cdot a \cdot D_{\text{вк}}} \cdot K_{\eta} \cdot I_{\text{я}} \cdot \Phi = C_{\text{т}} \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} \cdot K_{\eta}, \quad (1.2)$$

де:  $T_{\text{э}}$  - сили тяги або гальмування, відповідні електромагнітного моменту ТМ, без урахування магнітних втрат в ТМ і механічних втрат в ТМ і елементах передачі крутного моменту до ободу колеса;  $a$  - число пар паралельних гілок обмотки якоря ТМ;  $p$  - число пар полюсів ТМ;  $N$  - число стрижнів обмотки якоря ТМ;  $\Phi$  - потік збудження ТМ, Вб;  $I_{\text{я}}$  - струм якоря ТМ, А;  $C_{\text{т}}$  і  $C_{\text{е}}$  - машинні постійні;  $D_{\text{вк}}$  - діаметр ведучого колеса вагона, мм;  $K_{\eta}$  - коефіцієнт, що враховує магнітні і механічні втрати;  $\mu$  - передавальне число редуктора.

Використовуючи параметри ТМ 1ДТ003.5 і колісної пари з редуктором, наведені в таблиці 1.1, з (1.2) і (1.3) отримаємо наступні розрахункові формули:

$$V = \frac{E}{C_{\text{е}} \cdot \Phi} = \frac{E}{201.27 \cdot \Phi}, \quad (1.4)$$

$$F = C_{\text{т}} \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} \cdot K_{\eta}, \quad (1.5)$$

З опублікованих в [4] електромеханічних характеристик ТМ 1ДТ003, наведених до ободу колеса, слідує, що при струмі якорів 350 А, з яким ТМ працюють в гальмівному режимі і в більшій частині тягового режиму, підсумковий коефіцієнт корисної дії  $\eta$ , враховує всі втрати, включаючи і електричні в обмотках ТМ, становить при повному полі близько 86%, а при ослабленому до 23% полі він збільшується до 90%. Електричні втрати в обмотках ТМ в цих режимах складають відповідно близько 10,5 і 6%. Отже, суму магнітних і механічних втрат можна прийняти рівною 3,5-4%. Ці відомості підтверджують, що у формулі (1.5) можна використовувати величину  $\eta_{\text{мех}} + \eta_{\text{магн}} \approx 0,95$ . При цьому можливі у визначенні сил тяги та гальмування відхилення не перевищать 5%. Однак, при оцінці ефективності можливих додаткових удосконалень ЕС ТЕП необхідні більш точні розрахунки.

Таблиця 1.1 - Дані тягового двигуна 1ДТ.003.5

| Параметр | Величина | Одиниці |
|----------|----------|---------|
|----------|----------|---------|

|   |                           | вимірювання |
|---|---------------------------|-------------|
| Номінальна потужність двигуна             | 235                       | кВт         |
| Номінальна напруга на затискачах двигуна  | 750                       | В           |
| Номінальна частота обертання              | 1250                      | об/хв       |
| Довжина пакету якоря                      | 330 (335)                 | мм          |
| Діаметр якоря                             | 520                       | мм          |
| число пазів                               | 50                        |             |
| всього провідників                        | 700                       |             |
| Висота зубця якоря                        | 44,9                      | мм          |
| Ширина паза якоря                         | 12,8                      | мм          |
| Внутрішній діаметр якоря                  | 135                       | мм          |
| Число пар полюсів машини                  | 2                         |             |
| Число пар паралельних гілок обмотки якоря | 2                         |             |
| Висота сердечника якоря                   | 114,6                     | мм          |
| Ширина зубця на 1/3 його висоти           | 16,1                      | мм          |
| Діаметр вентиляційних каналів             | 22                        | мм          |
| Число рядів вентиляційних каналів         | 3                         |             |
| Діаметр колектора                         | 440                       | мм          |
| довжина колектора                         | 100                       | мм          |
| Число колекторних пластин                 | 350                       | мм          |
| Ширина головного полюса                   | 180                       | мм          |
| Висота головного полюса                   | 7                         | мм          |
| Щітки                                     | 2x10x40x50                | мм          |
| Кількість щіток                           | 8                         | шт          |
| Тиск на щітку                             | $(2,2-2,4) \cdot 10^{-3}$ | тс          |
| Діаметр ведучого колеса                   | 1050                      | мм          |
| Передавальне число редуктора              | 3,41                      |             |
| Опір обмотки якоря                        | 0,0694                    | Ом          |
| Опір головних полюсів                     | 0,0245                    | Ом          |
| Опір додаткових полюсів                   | 0,1337                    | Ом          |

Запозичені з [4] експериментальні навантажувальні характеристики ТМ 1ДТ003.5 наведені на рисунку 1.2, дозволяють при відомій е.р.с.  $E$  обчислити  $V$  безпосередньо за формулою (1.4) і . визначити потік  $\Phi$  як  $\Phi = (C_e \cdot V) / E$ .

Підставивши цей вираз  $\Phi$  в (1.5), отримаємо розрахункову формулу для поїзда EP2T:

$$F = 0.07381 \cdot \frac{C_e \cdot \Phi}{201.27} \cdot I_a \cdot K_\eta \cdot 10^{-7} \quad (1.6)$$

де: в режимі тяги  $K_\eta = \eta_{\text{МЕХ}} + \text{МАГН}$ , а при гальмуванні  $K_\eta = 1/(\eta_{\text{МЕХ}} + \text{МАГН})$ .

Таким чином, розрахунок швидкості руху і сил тяги та електричного гальмування для поїзда ЕР2С на базі поїзда ЕР2Т може проводитися за формулами (1.4) і (1.6).

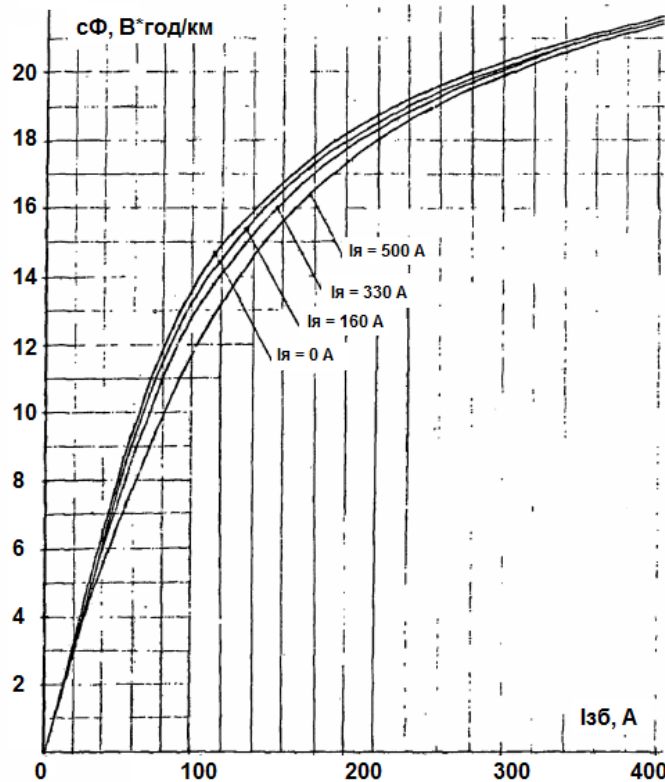


Рисунок 1.2 - Навантажувальні характеристики ТЕД 1ДТ003.5

Як впливає з опису алгоритму роботи схеми силових кіл, в процесі перегрупувань ТМ як в режимі пуску, так і при рекуперативному гальмуванні, можливе використання хронометричного обертання реостатного контролера РК, яке відбувається також в початковій стадії пуску при послідовному з'єднанні всіх ТМ до досягнення струмом якорів ТМ уставки реле прискорення. Цю обставину необхідно враховувати при розрахунку пуско-гальмівних характеристик.

У розрахунках пуско-гальмівних характеристик, виконаних фахівцями РЕЗ, час затримки  $\Delta t_3$  переходу РК з однієї позиції на іншу прийнято рівним 0,5 с. Очевидно, що ця величина, прийнята розробником і виробником електрообладнання поїзда ЕР2Т, є найбільш достовірною. Тому в наведених нижче розрахунках пуско-гальмівних характеристик секцій поїзда використано  $\Delta t_3 = 0,5$  с.

За час затримки РК на позиції поїзд отримує збільшення швидкості

руху, яке обчислюється як:

$$V = 3.6 \cdot \Delta t_3 \cdot a_{\Pi}, \quad (1.7)$$

де:  $a_{\Pi}$  - прискорення або уповільнення поїзда при відповідних значеннях  $F$  і  $V$ .

При відомій величині сили тяги або гальмування  $F$  на відповідній позиції РК, прискорення або уповільнення поїзда може бути обчислено як

$$a_{\Pi} = \frac{F_{\Pi} \mp W_{\Pi}}{1000 \cdot m_{\Pi} \cdot (1 + \gamma)}, \quad (1.8)$$

де:  $F_{\Pi} = n \cdot F$  - сила тяги або гальмування поїзда в Н;  $m_{\Pi}$  - маса поїзда в тонах;  $W_{\Pi} = w_0 \cdot m_{\Pi}$  - повний опір руху поїзда в Н;  $\gamma$  - коефіцієнт інерції обертових частин поїзда.

За даними РЕЗ для поїзда ЕР2Т  $\gamma = 0.07$  і опір руху дванадцятивагонного поїзда при русі під струмом в Ньютонах на тонну ваги поїзда [2]:

$$w'_0 = 10.78 + 0.098 \cdot v + 0.00228 \cdot v^2, \quad (1.9)$$

без струму

$$w''_0 = 12.152 + 0.1764 \cdot v + 0.00228 \cdot v^2, \quad (1.10)$$

Маса дванадцятивагонного поїзда з повним завантаженням в години «пік» ( $K_3 = 2,37$ ) становить 772,88 т, в «непікові» години  $K_3 = 0,17$  і маса поїзда дорівнює 602,14 т, а при середньому завантаженні ( $K_3 = 1,5$ ) маса секції становить 117,36 т. Приймаючи, що маса всіх секцій однакова, отримаємо масу поїзда при середньому завантаженні близько 704 т. У виконаних нижче розрахунках маса поїзда прийнята рівною 700 т.



Для прийнятої маси поїзда 700 т і  $\gamma = 0,07$  формула (1.8) набуде вигляду:

$$a_n = (3204 \cdot F_0 \pm 9.346 \cdot w_0) \cdot 10^{-4}, \quad (1.11)$$

де:  $F_0$  - сила тяги або гальмування однієї осі в тс;  $w_0$  - опір руху поїзда в Н/т.

При обчисленні прискорення в режимі тяги в (1.11) використовується знак «-», а при обчисленні уповільнення в режимі гальмування – «+».

Розраховані по (1.9) і (1.10) залежно основного питомого опору руху від швидкості для 12-і вагонного поїзда EP2T, наведені на рисунку 1.3.

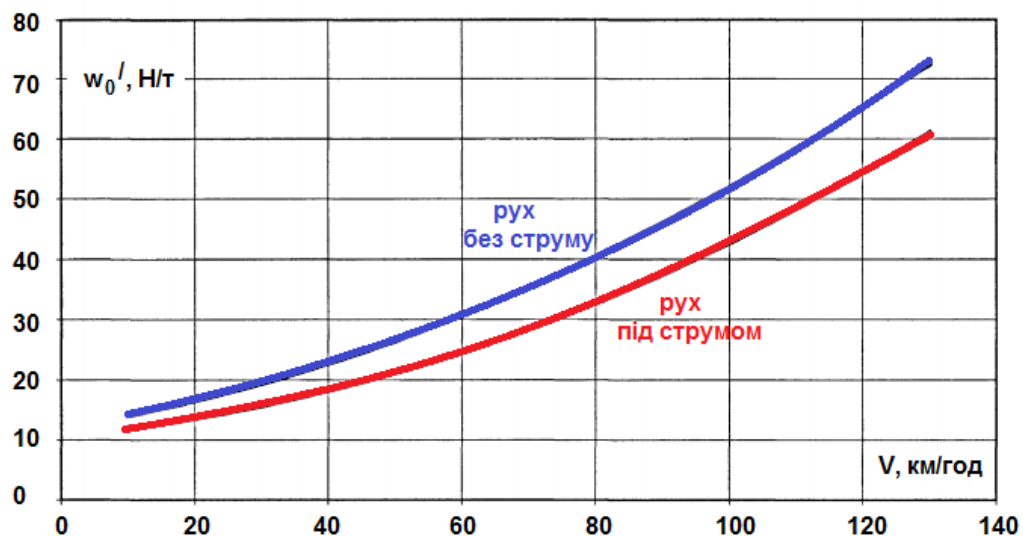


Рисунок 1.3 – Залежності основного питомого опору руху від швидкості руху

Гранична сила тяги при пуску поїзда визначається її обмеженням по умовам зчеплення, тобто залежністю коефіцієнта зчеплення від швидкості руху і навантаженням від колісної пари моторного вагона на рейки По. Масу моторного вагона при прийнятому значенні коефіцієнта завантаження  $K_3 = 1,5$  можна обчислити виходячи з наведених в [5] відомостей про масу тари моторного вагона і його повній масі при  $K_3 = 0,17$  і  $2,37$ . Вона буде відповідно дорівнює 57,2 т, 58,37 т і 73,44 т. З цих даних легко знайти, що маса моторного вагона при  $K_3 = 1,5$  складає близько 67,48 т. Отже  $\Pi_0 = 16,87$  т. При цьому за даними РЕЗ залежність граничної за умовами зчеплення сили тяги однієї осі моторного вагона від швидкості руху  $F_\psi(V)$  для поїзда EP2T обчислюється як:

$$F_\psi = \psi \cdot \Pi_0 = \frac{371.14}{100 + V}, \quad (1.12)$$

$$\psi = \frac{22}{100 + V}.$$

де  $\psi$  - коефіцієнт зчеплення колеса з рейкою

Розрахована за (1.12) залежність  $F\psi(V)$ , наведена на рисунку 1.4.

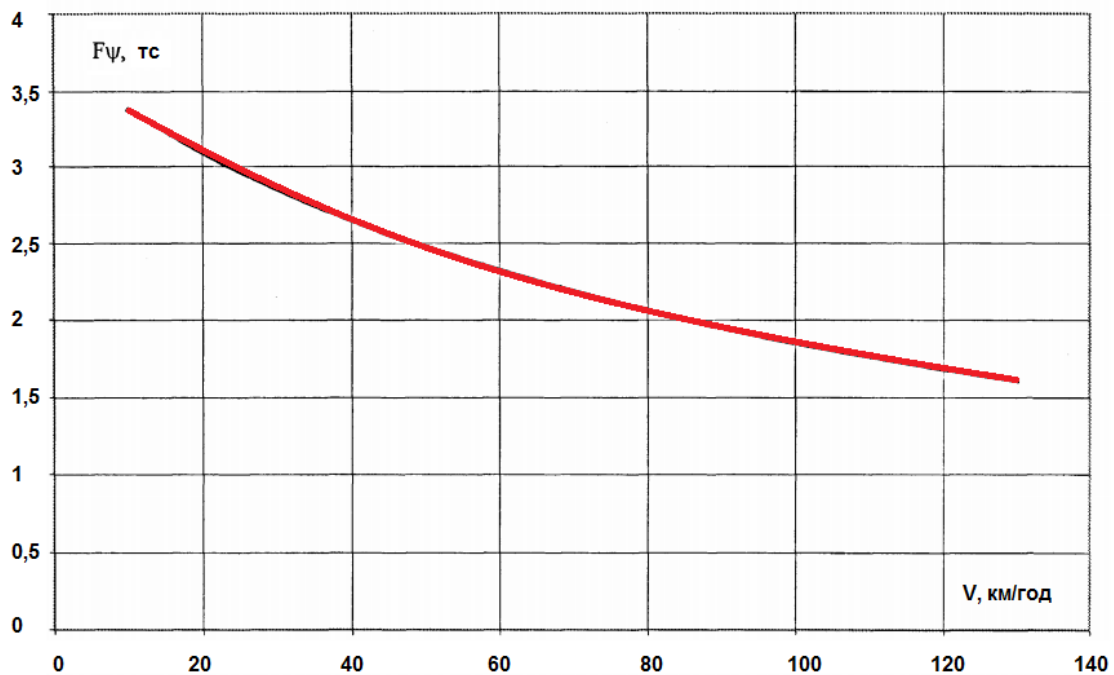


Рисунок 1.4 - Залежність обмеження сили тяги по зчепленню від швидкості руху

У розрахунках е.р.с. ТМ по (1.1) використовуються опори її нагрітих обмоток, які за даними РЕЗ становлять для якоря, головних і додаткових полюсів відповідно  $R_{\text{я}} = 0,0694$  Ом,  $R_{\text{ГП}} = 0,1337$  Ом і  $R_{\text{ДП}} = 0,0245$  Ом. Отже, в режимі тяги в (1.1)  $R_{\text{ТМ}} = 0,2276$  Ом при повному полі і ступенями зменшується в міру ослаблення поля до 0,1186 при  $\beta = 0,185$ . У режимі електричного гальмування використовується тільки незалежне збудження. Отже, обмотки збудження виключаються з кола струму якорів, але включаються в це коло індуктивні шунти. Опір індуктивного шунта в нагрітому стані становить 0,0568 Ом. Отже, на одну ТМ  $R_{\text{ш}} = 0,0142$  Ом. Тоді в режимі електричного гальмування

$$R_{\text{ТМ}} = R_{\text{я}} + R_{\text{ДП}} + R_{\text{ш}} = 0.1081 \text{ Ом.} \quad (1.13)$$

Наведені вище формули і дані поїзда ЕР2Т дозволяють розрахувати пуско-гальмівні характеристики поїзда ЕР2С. Для порівняння з дослідними даними напруга контактної мережі для режиму тяги приймалося рівним номінальному напрузі на струмоприймачі електрорухомого складу (ЕРС) 3000 В в режимі тяги, а для режиму рекуперативного гальмування 3500 в [5].

Розрахунок всіх складових втрат в тяговому приводі дозволяє більш точно визначити ККД, який безпосередньо впливає на тягову характеристику. Так як в процесі пуску або гальмування змінюються струми і швидкість руху рухомого складу, то і складові втрат енергії, що залежать від них, так само будуть постійно змінюватися. Відповідно ККД розрахований з урахуванням цього буде відрізнятися від раніше прийнятого, при цьому в залежності від швидкості руху і струмів ця відмінність може бути суттєвою.

Вплив вихрових струмів і прискорення в процесі пуску видозмінюють пускову діаграму. Реально струм в колі якоря не може змінитися миттєво так як в процесі зміни струму якоря змінюється і швидкість руху (раніше в розрахунках приймалося, що в процесі росту струму якоря швидкість залишається постійною). Якщо збудження ТМ послідовне, то струм збудження змінюється так само як струм якоря. Але через дії вихрових струмів е.р.с. відстає від зміни струму збудження, в результаті кидки струму якоря стають більше, що відбивається на силі тяги і плавності пуску.

#### 1.4 Побудова кривих руху

Побудова кривих руху ведеться з використанням питомої форми основного рівняння руху [6].

Перша форма основного рівняння руху,

$$28.3 \cdot (1 + \gamma) \cdot \frac{dv}{dt} = f_d \quad (1.14)$$

де:  $(1 + \gamma)$  - коефіцієнт інерції обертових частин,  $v$  - швидкість руху, м/с;  $t$  - час, с;  $f_d$  - - питома діюча сила, Н/кН.

$$f_d = \frac{F}{G},$$

де  $F$  - сила тяги або гальмування, яка припадає на одну вісь, Н,  $G$  - вага поїзда, яка припадає на провідну вісь, кН.

У режимі тяги питома діюча сила визначається за формулою

$$f_d = f - w_0' \quad (1.15)$$

де  $f$  - питома сила тяги електропоїзда, Н/кН;  $w_0'$  - питома опору руху по струмом.

У режимі гальмування питома діюча сила визначається за формулою

$$f_d = -b - w_0'' \cdot \frac{H}{\text{кН}}, \quad (1.16)$$

де  $b$  – питома гальмівна сила, Н/кН.

Як було зазначено в розділі 1.1, спочатку відбувається електричне гальмування ЕРС. Потім здійснюється догальмовування механічним гальмом. Для випадку електричного гальмування гальмівна сила, так само як і сила тяги будується за законами побудови пуско-гальмівних діаграм. Для випадку механічного гальмування гальмівна сила обчислюється за формулою [6]:

$$b = 1000 \cdot \frac{\varphi_{кр} \cdot \sum K_p}{G}, \frac{H}{\text{кН}}, \quad (1.17)$$

де  $\sum K_p$  - розрахункова сила натискання колодки на бандаж,  $\varphi_{кр}$  - розрахунковий коефіцієнт тертя між бандажем і колодкою.

Правилами тягових розрахунків рекомендується наступна емпірична залежність коефіцієнта тертя стандартної чавунної колодки об колесо від швидкості руху  $V$ , км/год, і величини натискання колодки  $K$ , кН:

$$\varphi_{кр} = 0.27 \cdot \frac{V + 100}{5 \cdot V + 100}, \quad (1.18)$$

$$K_p = 2.22 \cdot K \cdot \frac{1.63 \cdot K + 100}{8.15 \cdot K + 100}, \text{кН}. \quad (1.19)$$

Для моторних вагонів електропоїзда розрахунковий коефіцієнт натискання  $K_p = 98$  кН, для причіпних і головних  $K_p = 88$  кН [6].

$$f_d = -w_0'' \cdot \frac{H}{\text{кН}}. \quad (1-$$

Друга форма основного рівняння руху [5]

$$7.87 \cdot (1 + \gamma) \cdot v \cdot \frac{dv}{dl} = f_d, \quad (1.21)$$

де -  $l$  шлях пройдений поїздом, м.

Для побудови кривої руху використовуємо наближені методи розрахунку. В основі цих методів лежить принцип заміни нескінченно малих збільшень на кінцеві  $dl = \Delta l$ ,  $dv = \Delta v$ ,  $dt = \Delta t$  і заміни реальної прискорюючої сили в інтервалі  $\Delta v$  деякою середньою силою  $f_{дср}$ , яка в цьому інтервалі визначається по  $v_{ср}$  в цьому інтервалі. Тоді основне рівняння руху набуде вигляду:

перша форма

$$28.3 \cdot (1 + \gamma) \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} = f_d \quad (1.22)$$

друга форма

$$7.87 \cdot (1 + \gamma) \cdot v \cdot \frac{\Delta v}{\Delta l} = f_d \quad (1.23)$$

З цих рівнянь отримаємо формулу для обчислення приросту часу

$$\Delta t = 28.3 \cdot \frac{(1 + \gamma) \cdot \Delta v}{f_{дср}}, \text{ с} \quad (1.24)$$

У свою чергу збільшення шляху дорівнюватиме

$$\Delta l = \frac{v_{ср} \cdot \Delta t}{3.6}, \text{ м} \quad (1.25)$$

Задаючись інтервалами швидкості  $\Delta v$ , визначаємо для кожного з них  $v_{\text{ср}}$  і швидкість в кінці кожного інтервалу. За  $v_{\text{ср}}$  знаходимо  $i_{\text{дср}}$  і за формулами (1.24) і (1.25) знаходимо  $\Delta t$  і  $\Delta l$ .

За цією методикою будуємо криві руху для розрахункового перегону довжиною 3 км з нульовим ухилом і при відсутності кривих для випадку, коли  $\eta_{\text{МЕХ} + \text{МАГН}} = 0,95$  і напруга контактної мережі становить 3000 В в режимі тяги і 3500 В в режимі рекуперативного гальмування. Крива руху наведена на рисунку 1.5.

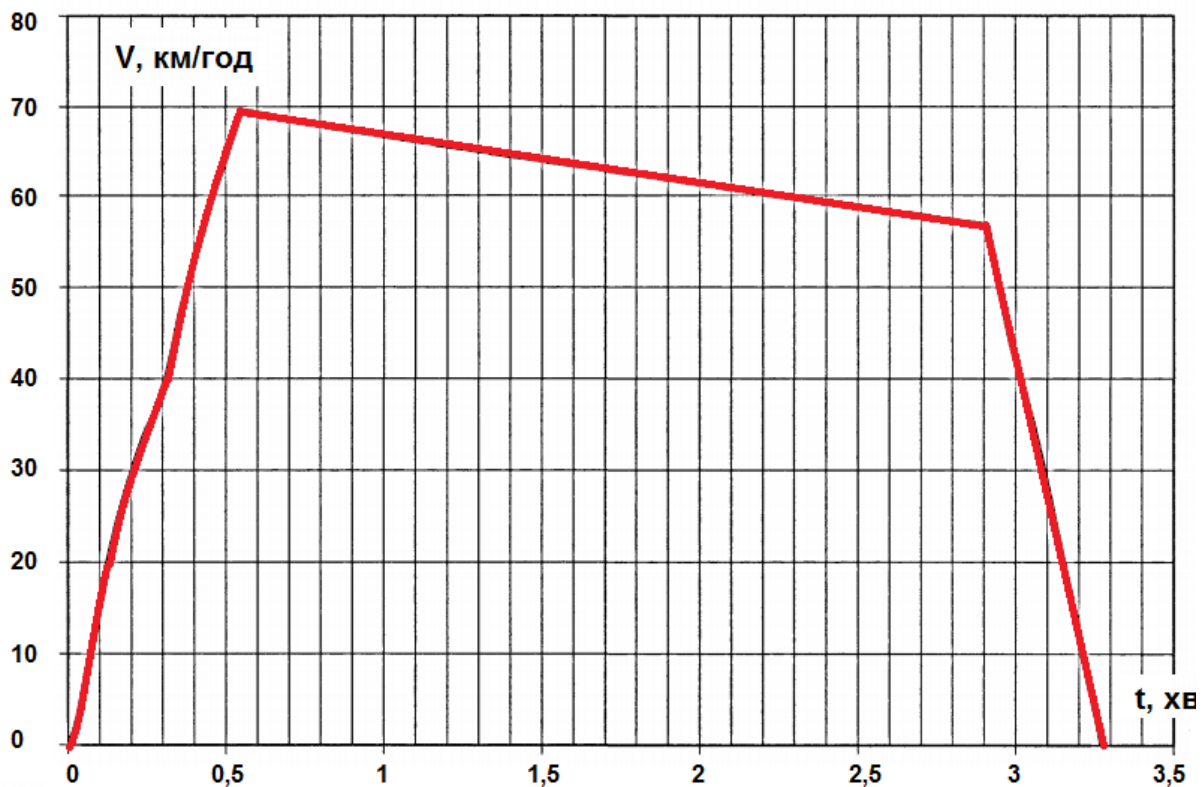


Рисунок 1.5 – Залежність  $V(t)$

### 1.5 Розрахунок витрат енергії

Розрахунок витрати енергії - різниці її споживання на тягу і повернення в мережу при рекуперації виконується з використанням пуско-гальмівних діаграм і кривих руху поїзда.

Споживання енергії в процесі розгону поїзда визначається як:

$$A_{\text{т}} = \frac{U_{\text{КС}}}{3600} \cdot \int_0^{T_{\text{п}}} I(t) \cdot dt, \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

де  $I(t)$  - струм вагона під час пуску, А.

Аналогічним способом визначається кількість енергії, яку повертатимуть в мережу в режимі рекуперації:

$$A_p = \frac{U_{\text{кв}}}{3600} \cdot \int_{T_p}^T I(t) \cdot dt, \text{ Вт} \cdot \text{год} \quad (1.27)$$

де  $I(t)$  - струм вагона під час рекуперації. Замінюючи  $dt = \Delta t$ , отримаємо формулу:

$$A_{\text{т(р)}} = \frac{U_{\text{кв}}}{3600} \cdot \sum I \cdot \Delta t, \text{ Вт} \cdot \text{год} \quad (1.28)$$

Необхідні для оцінки ефективності різних алгоритмів управління реостатні втрати за час пуску розраховуємо за формулою

$$A_{\text{пр}} = \frac{\sum I^2 \cdot R_6 \cdot \Delta t}{3600}, \text{ Вт} \cdot \text{год} \quad (1.29)$$

де  $R_6$  - значення ступенів опору пуско-гальмівного резистора, Ом.

Втрати в обмотках тягових машин:

$$A_{\text{тм}} = \frac{\sum I^2 \cdot R_{\text{тм}} \cdot \Delta t}{3600}, \text{ Вт} \cdot \text{год} \quad (1.30)$$

де  $R_{\text{тм}}$  - опір обмоток двигуна, Ом.

Кількість енергії, витраченої на тягу поїзда, можна також визначити провівши розрахунок за графіком руху поїздів [16].

Рівняння руху поїзда:

$$F = m \cdot a + W_0 + W_i \quad (1.31)$$

1)

де  $F$  - сила тяги поїзда, Н;  $m$  - маса поїзда, кг;  $a$  - прискорення поїзда,  $\text{м/с}^2$ ;  $W_0$  - основний опір руху, Н;  $W_i$  - додатковий опір руху від ухилу, Н.

Раніше було зроблено припущення, що розрахунок проводиться для прямої ділянки шляху, що не містить ухилів і кривих. Тому рівняння (1.30) приведемо до вигляду:

$$F = m \cdot a + W_0, \text{ Н} \quad (1.32)$$

)

Механічна робота, яка витрачається на тягу поїзда на ділянці довжиною  $L$  (ділянка розгону поїзда) з урахуванням формули 1.31:

$$A_M = \int_{L_p} F ds = \int_{L_p} W_0 ds + \int_{L_p} m \cdot a ds \quad (1.33)$$

Перейшовши від нескінченно малих величин  $ds$  у формулі 1.32 до кінцевих величин  $\Delta s$ , то отримаємо:

$$A_M = m \cdot \sum_n a_n \cdot \Delta s_n + \sum_k W_0(V_k) \cdot \Delta s_k \quad (1.34)$$

)

Звідси витрата енергії на тягу і повернення енергії при рекуперації:

$$A_T = \frac{A_M}{\eta} = \frac{m \cdot \sum_n a_n \cdot \Delta s_n + \sum_k W_0(V_k) \cdot \Delta s_k}{\eta}, \quad (1.35)$$

$$A_P = A_M \cdot \eta = (m \cdot \sum_n a_n \cdot \Delta s_n - \sum_k W_0(V_k) \cdot \Delta s_k) \cdot \eta,$$

(1.3

6)



Однак, цей спосіб розрахунку витрати енергії неточний і зручний тільки для грубої попередньої оцінки витрат енергії. Тому в даній роботі він не використовується.

#### 1.6 Розрахунок за допомогою ЕОМ

Всі розрахунки проводилися за допомогою програми Microsoft Excel. Для цього на мові Visual Basic були написані макроси [8].

Однією з найважливіших завдань в процесі розрахунку пуско-тормозних характеристик є апроксимація значень експериментальних навантажувальних характеристик ТМ 1ДТ003.5 наведених на рисунку 1.2. Як вказано в [9] цю задачу можна вирішити шляхом наближеної заміни функції  $f(x)$  більш простою функцією  $\varphi(x)$ , яку неважко обчислити при будь-якому значенні аргументу  $x$  в заданому інтервалі зміни.

Для зручності розрахунків залежність  $c\Phi = f(I_{зб})$  при  $I_a = 0$  представимо у вигляді таблиці (таблиця 1.2). При цьому значеннями аргументу  $x$  в даному випадку є значення  $I_{зб}$  - вузли таблиці, значеннями  $f(x)$  - значення  $c\Phi$ .

Таблиця 1.2 - Кусочно-лінійна апроксимація кривої намагнічування

| Ізб, А | СФ, В*год/км |
|--------|--------------|
| 0.00   | 0.00         |
| 10.00  | 1.39         |
| 20.00  | 3.22         |
| 30.00  | 5.06         |
| 40.00  | 6.67         |
| 50.00  | 8.11         |
| 60.00  | 9.51         |
| 70.00  | 10.90        |
| 80.00  | 11.80        |
| 90.00  | 12.89        |
| 100.00 | 13.67        |
| 110.00 | 14.39        |
| 120.00 | 14.98        |
| 130.00 | 15.44        |
| 140.00 | 16.00        |
| 150.00 | 16.40        |
| 160.00 | 16.80        |
| 170.00 | 17.20        |
| 180.00 | 17.55        |
| 190.00 | 18.00        |
| 200.00 | 18.30        |
| 210.00 | 18.40        |
| 220.00 | 18.75        |
| 230.00 | 19.00        |
| 240.00 | 19.20        |
| 250.00 | 19.45        |
| 260.00 | 19.70        |
| 270.00 | 19.85        |
| 280.00 | 20.00        |
| 290.00 | 20.17        |
| 300.00 | 20.30        |
| 310.00 | 20.50        |
| 320.00 | 20.65        |
| 330.00 | 20.75        |
| 340.00 | 20.85        |
| 350.00 | 20.90        |
| 360.00 | 21.15        |
| 370.00 | 21.25        |

У розрахунках застосовувалася кусочно-лінійна апроксимація кривої намагнічування, тобто на кожному інтервалі значень Ізб крива намагнічування сФ описувалася лінійною функцією  $\varphi(x)$ . В результаті чого поточне значення

$C\Phi_{\text{пот}}$  обчислювалося наступним чином:

$$\begin{cases} a = \frac{C\Phi_2 - C\Phi_1}{I_{362} - I_{361}}, \\ b = C\Phi_2 - a \cdot I_{361}, \\ C\Phi_{\text{пот}} = a \cdot I_{36 \text{ пот}} - b \end{cases} \quad (1.37)$$

Оскільки значення струму якоря в процесах пуску і гальмування не дорівнює нулю, значення  $I_{36 \text{ пот}}$  в систему рівнянь (1.37) підставлялося з урахуванням реакції якоря.

Як зазначалося вище, досліджувана ЕС ТЕП дозволяє використовувати декілька алгоритмів управління режимами тяги і гальмування. Виконані на початковій стадії оцінки енергетичної ефективності ЕС ТЕП для 6-ти алгоритмів розрахунки показали, що при збереженні традиційного способу регулювання сил тяги та гальмування з підтриманням незмінними уставок пускового і гальмівного струмів найкращі енергетичні показники при незначному погіршенні динаміки поїзда досягаються при розгоні поїзда на послідовному угрупованні ТМ за рахунок ослаблення поля до швидкості, відповідної закінченню реостатного пуску на паралельному угрупованні. Надалі досліджувалася енергетична ефективність ЕС ТЕП з цим алгоритмом управління.

В результаті розрахунків були отримані зведені в таблицю 1.3 дані по витраті енергії однією секцією (моторний і причіпний вагони). Витрата енергії 12-ти вагонного поїзда буде в шість рази вище. Для забезпечення можливості безпосереднього порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними ВНІЗТ напруга контактної мережі в режимі тяги приймалася рівною 3000 В, в режимі рекуперативного гальмування 3500 В. [9]

Таблиця 1.3 - Витрати енергії однією секцією

|      | $\Sigma A$ , Вт*год | $A_T$ , Вт*год | $A_P$ , Вт*год | $A_{\text{пр}}$ , Вт*год | $V_{\text{пв}}$ , км/год | $V_{\text{пг}}$ , км/год |
|------|---------------------|----------------|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| EP2C | 5835.9              | 8408.6         | 2572.8         | 577.1                    | 69.8                     | 57.01                    |
| EP2T | 9223.9              | 9723.9         | 500            | 1727.0                   | 69.9                     | 54.05                    |

де  $V_{\text{пв}}$  - швидкість переходу на вибіг,  $V_{\text{пг}}$  - швидкість початку гальмування.

З таблиці 1.3 випливає, що підсумкова витрата енергії електропоїздом з ЕС ТЕП, яку прийнято оцінювати як різницю спожитої на тягу  $A_T$  і відданої в контактну мережу при рекуперації  $A_P$  енергії, в порівнянні з серійними електропоїздами скорочується на 36%. Втрати в пускових реостатах

зменшуються в 3 рази, а кількість енергії рекуперації збільшилася більш ніж в 5 разів.

В результаті контрольних тягово-енергетичних випробувань дослідного електропоїзда EP2C в режимі сплотки, проведених на кільці ВНІЗТ кваліфікованими фахівцями з використанням спеціального вимірювального комплексу [10], отримані найбільш достовірні дані по витраті енергії, які представлені в таблиці 1.4

Таблиця 1.4 - Дані по витраті енергії

|      | $\Sigma A$ , Вт*год | $A_T$ , Вт*год | $A_R$ , Вт*год | $A_{пр}$ , Вт*год | $V_{пв}$ , км/год | $V_{пг}$ , км/год |
|------|---------------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| EP2C | 6100                | 8950           | 2850           | 445               | 71.6              | 56.2              |
| EP2T | 8850                | 9950           | 1150           | 1520              | 71.2              | 55.1              |

Ці дані прийняті за вихідні при оцінці точності отриманих розрахунком показників.

З дослідних даних випливає, що економія енергії електропоїздом з ЕС ТЕП по відношенню до серійного становить 31%, тобто на 5% менше отриманої розрахунком. Така достовірність розрахункових даних цілком достатня для обґрунтування ефективності та доцільності застосування ЕС ТЕП замість ТЕП серійних електропоїздів при безперечній економії порядку 30% енергії.

Порівняння даних таблиць 1.3 і 1.4 показує, що абсолютні результати отриманих показників для поїздів EP2C і EP2T відрізняються незначно, але великі розбіжності, особливо по ефективності рекуперації, в даних для серійного поїзда EP2T. Причиною розбіжності дослідних і розрахункових даних можуть бути відмінності умов випробувань від прийнятих в розрахунках.

Наявність відмінностей розрахункових і дослідних величин опору руху підтверджується тим, що у випробуваннях швидкість розгону поїзда була вище, хоча і незначно. Але навіть мала відміна кривої руху від реальної викликає значну зміну енергетичних показників. Особливо чітко це проявляється в ефективності рекуперації на EP2T через високу швидкість її закінчення. Разом з тим, аналізовані дані вказують на наявність розбіжностей розрахункових і реальних пуско-гальмівних діаграм і тягових і гальмівних характеристик.

Тому актуальною є задача виявлення чинників, що знижують точність розрахункових даних, і вдосконалення методики розрахунку пуско-гальмівних характеристик і енергетичних показників електропоїздів.

Виявлено необхідність виконання досліджень щодо вдосконалення алгоритму управління режимами роботи ТЕП і вдосконалення його

електроустаткування. Такими дослідженнями є: використання режимів руху без виходу на паралельне угруповання ТМ, ліквідація зниження сил тяги та гальмування в процесі перегруповань ТМ і оцінка можливості роботи ТЕП в режимі рекуперації без включення в коло струмів якорів індуктивних шунтів.

## Висновки

1 Тягово-енергетичні розрахунки з використанням побудованих за класичними методиками з допущенням миттєвої зміни струмів при виключенні ступенів пуско-гальмівного резистора дають прийнятні для принципової оцінки енергетичної ефективності та доцільності використання ЕС ТЕП результати.

2 Багаторічний досвід експлуатації поїзда з ЕС ТЕП, що пробіг після устаткування цим приводом понад 750 тис. км, і його неодноразові спеціальні випробування підтвердили техніко-економічні і енергетичні переваги розробленої ЕС ТЕП і одночасно показали доцільність вдосконалення алгоритмів керування режимами роботи ТЕП.

3 Порівняння розрахункових і експериментальних енергетичних показників ЕС ТЕП показує їх деяку відмінність. Серед можливих причин, що обумовлюють відміну розрахункових даних від дослідних - відміна реальних і використаних в розрахунках пуско-гальмівних діаграм. Відмінність розрахункових даних від реальних несуттєво для принципової оцінки ефективності застосування ЕС ТЕП замість ТЕП серійних електропоїздів, але може вплинути на оцінку доцільності використання можливих технічних рішень щодо її вдосконалення.

4 Виявлене у випробуваннях підвищене нагрівання індуктивного шунта, використовуваного в режимі рекуперативного гальмування в якості струмообмежувального реактора в колі якорів ТМ обумовлює необхідність теоретичної оцінки можливості роботи рекуперативного гальма без струмообмежувального реактора.

## **2 ВПЛИВ РЕАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ЗМІНИ СТРУМУ І СПОСОБУ ОБЛІКУ ВТРАТ НА ПУСКО-ГАЛЬМОВІ ДІАГРАМИ**

2.1 Розрахунок пуско-гальмових діаграм з урахуванням прискорення поїзда, індуктивності і вихрових струмів тягових машин

У тягово-енергетичних розрахунках, які виконують з метою з'ясування техніко-економічних показників порівнюваних схем, навіть малі помилки неприпустимі, так як вони можуть призвести до помилкових висновків в оцінці переваг або недоліків порівнюваних схем і, як наслідок, до помилкової оцінки їх перспективності. Допущена в розрахунках помилка, може бути підставою для вибору в якості перспективної реально менш ефективної схеми і її наслідки не можуть бути усунені в експлуатації.

Виконані за відомими методиками попередні розрахунки тягово-енергетичних показників вагонів електропоїзда, представлені в таблиці 1.2, показали, що отримані при спрощеному розрахунку результати значно відрізняються від дослідних даних, наведених у таблиці 1.3, тому виникає необхідність уточненого розрахунку.

Викладені вище обставини роблять необхідним розробку уточненої методики розрахунку тягово-енергетичних показників моторних вагонів електропоїзда.

Найбільш об'єктивні дані про тягово-енергетичні показники існуючого е.р.с. можуть бути отримані в результаті випробувань в реальних експлуатаційних умовах. У даній магістерській роботі розглянуто розрахунки енергетичних показників порівнюваних режимів роботи електропоїзда, щоб потім їх можна було порівняти з реально отриманими даними.

2.1.1 Схема заміщення тягової машини при послідовному збудженні і розрахунок її параметрів

Схема заміщення тягової машини при послідовному збудженні для розрахунку пускової діаграми з урахуванням вихрових струмів і індуктивності тягового кола представлена на рисунку 2.1.

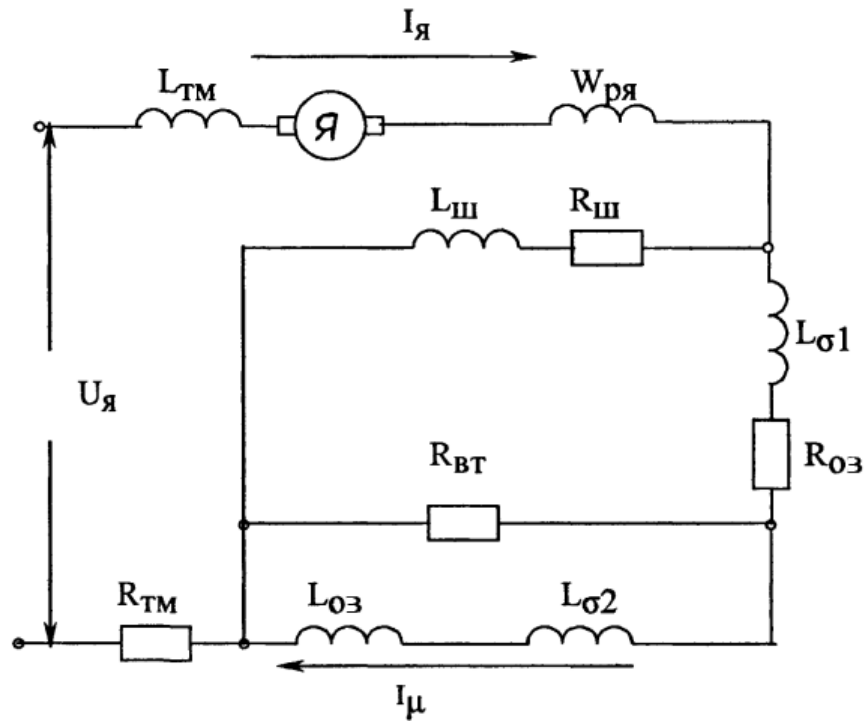


Рисунок 2.1 - Схема заміщення для розрахунку перехідних процесів в тяговому колі в режимі тяги при послідовному збудженні.

Система диференціальних рівнянь, що описують схему заміщення, представлена на рисунку 2.1:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U}{n} = E + L_{тм} \cdot \frac{dI_{я}}{dt} + R_{тм} \cdot I_{я} + L_{иш} \cdot \frac{dI_{ш}}{dt} + R_{ш} \cdot I_{ш}, \\ L_{\sigma 1} \cdot \frac{dI_{з}}{dt} + R_{оз} \cdot I_{з} + R_{зт} \cdot I_{зт} = L_{иш} \cdot \frac{dI_{ш}}{dt} + R_{ш} \cdot I_{ш}, \\ F_{н} = I_{\mu} W_{оз} - I_{я} W_{ря}, \\ \Phi = f(F_{н}), \\ I_{з} = I_{\mu} + I_{зт}, \\ I_{я} = I_{з} + I_{ш}, \\ R_{зт} \cdot I_{зт} = L_{оз} \cdot \frac{dI_{\mu}}{dt}, \end{array} \right. \quad (2.1)$$

де  $L_{тм}$  - індуктивність тягової машини,

$$L_{тм} = L_{я} + L_{дп}, \text{ Гн}, \quad (2.2)$$

де:  $L_{я}$  - індуктивність обмотки якоря,  $L_{дп}$  – індуктивність додаткових полюсів.

Індуктивності обмоток якоря розраховуються наступним чином.

Число послідовно включених витків обмотки якоря

$$w_a = \frac{N}{2 \cdot 2a}. \quad (2.3)$$

Число витків обмотки якоря на полюс

$$w'_a = \frac{N}{8 \cdot a \cdot p}. \quad (2.4)$$

Зубцевий крок по колу якоря

$$t_1 = \pi \cdot \frac{D_a}{Z}, \text{ см}, \quad (2.5)$$

де  $Z_1 = 1,5$  см - ширина зубця по колу якоря. Коефіцієнт повітряного зазору під головним полюсом

$$k_\delta = \frac{10 \cdot \delta + t_1}{10 \cdot \delta + Z_1}, \quad (2.6)$$

де:  $\alpha = 0,65$  - коефіцієнт полюсного перекриття,  $\delta = 0,5$  см - повітряний зазор під головним полюсом.

Індуктивність обмотки якоря від потоку реакції якоря:

$$L'_a = 1.05 \mu_0 \cdot \frac{w_a'^2 \alpha^3 I_a D_a}{k_\delta \delta} k_\mu \quad (2.7)$$

Коефіцієнт насичення  $k_\mu$  залежить від індукції в зубцях  $B_{Z1/3}$ . При струмі збудження  $I_z \approx 150$  А потік  $\Phi = 0,078$  ( $I_a = 350$  А),  $\Phi = 0,08$  ( $I_a = 150$  А),  $\Phi = 0,081$  ( $I_a = 30$  А),  $B_{Z1/3} = 2,6$  Тл. Тоді  $k_\mu = 1$  за графіком, наведеним в [10].

Провідність шляху потоку розсіювання  $\lambda$  визначається наступним чином.



Для частини паза над міддю

$$\lambda_{п1} = \mu_0 k_{\sigma} \frac{h_1}{b_z}, \quad (2.8)$$

де:  $h_1 = 0,77$  - див. рисунок 2.2.

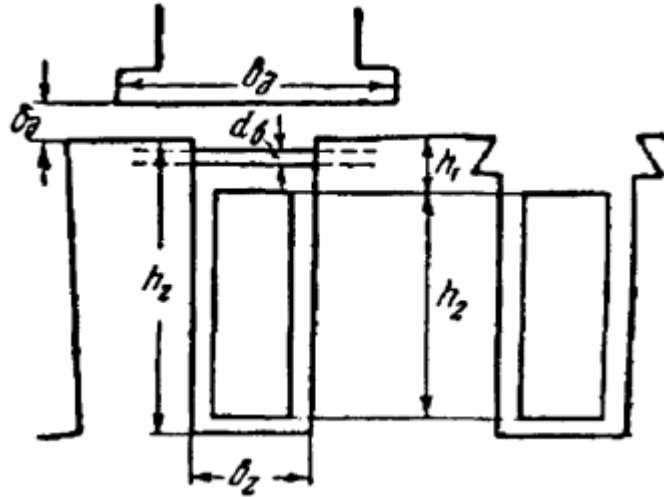


Рисунок 2.2 - До розрахунку шляху потоку розсіювання

$k_{\sigma}$  - коефіцієнт збільшення провідності через магнітних бандажів на сталевому пакеті якоря. При немагнітних бандажах або клинах  $k_{\sigma} = 1$ .

Для частини паза зайнятого міддю

$$\lambda_{п2} = \mu_0 k_i \frac{h_2}{3b_z}, \quad (2.9)$$

де:  $h_2$  - див. рисунок 2.2.

$k_i$  – коефіцієнт, що враховує деяке зменшення потоку розсіювання внаслідок ефекту витіснення струму в верхню частину провідників в процесі комутації,  $k_i = 0,85$  (так висота провідника перевищує 10 мм).

Провідність розсіювання по коронкам зубців в машині з додатковими полюсами

$$\lambda_k = \mu_0 \frac{b_d - b_z}{4k_{\delta_d} \delta_d}, \quad (2.10)$$

де:  $b_d$  - ширина наконечника додаткового полюса

$$b_d = (1.2 \div 1.5)t_1,$$

$\delta_d$ - величина зазору під додатковим полюсом.

Коефіцієнт повітряного зазору під додатковим полюсом

$$k_{\delta_d} = \frac{10 \cdot \delta_d + t_1}{10 \cdot \delta_d + Z_1}.$$

----- (2.11)

Провідність потоку розсіювання по лобовим частинам

$$\lambda_l = 0,37\mu_0 \frac{l_l}{l_a} \lg\left(1 + \frac{\pi\tau}{4h_z}\right),$$

(2.12)

де  $l_l$  - довжина передньої і задньої лобової частин провідника якоря,  $l_l = 23,5$  см,

$\tau$  - полюсне ділення

$$\tau = \pi \cdot \frac{D_a}{2p}, \text{ см},$$

(2.13)

$h_z$  - висота зубця якоря,  $h_z = 4,49$  см.

$$\lambda = \lambda_{п1} + \lambda_{п2} + \lambda_k + \lambda_l.$$

(2.14)

Індуктивність обмотки якоря від місцевих потоків розсіювання пазів

$$L_a'' = \frac{4l_a \lambda w_a^2}{Z}, \text{ Гн.}$$

(2.15)

Індуктивність обмотки якоря

$$L_a = L'_a + L''_a, \text{ Гн.} \quad (2.16)$$

В результаті розрахунку одержуємо  $L_a = 5,51 \text{ мГн.}$

Число колекторних пластин на паз

$$u_k = \frac{K}{Z}. \quad (2.17)$$

Струм в паралельної гілки I

$$i_a = \frac{I}{2a}. \quad (2.18)$$

$w = 1$  - число витків в секції;  $\beta_k = 0,4 \text{ см}$  - колекторне ділення;  $\gamma = 2,5$  - число колекторних пластин, перекритих щіткою.

Скорочення обмотки в колекторних поділках

$$\epsilon_k = \left| \left( \frac{Z}{2p} - y_z \right) \cdot u_k \right|. \quad (2.19)$$

Реактивна е.р.с

$$e_r = \frac{8i_a u_k w^2 \lambda l_a V_k}{\beta_k \left( u_k - \frac{a}{p} + \gamma + \epsilon_k \right)}, \text{ В.} \quad (2.20)$$

Індукція в зазорі під додатковим полюсом  $e_g$

$$B_d = \frac{e_r}{2w l_a V_a}, \text{ Тл.} \quad (2.21)$$

Корисний потік додаткового полюса

$$\Phi_d = B_d l_a (b_d + 3\delta_d), \text{ мкс.}$$

(2.

22)

Індуктивність додаткового полюса

$$L_{дп} = 0.65 \frac{2\rho\sigma_d \Phi_d w_d}{I} \cdot 10^{-8}, \text{ Гн.}$$

(2.

23)

В результаті розрахунку одержуємо  $L_{дп} = 1,74 \text{ мГн.}$

Активний опір тягової машини

$$R_{тм} = R_{я} + R_{дп} + R_{пр}, \text{ Ом,}$$

(2.

24)

де  $R_{я} = 0,0694 \text{ Ом}$  - опір обмотки якоря,  $R_{дп} = 0,0245 \text{ Ом}$  - опір додаткових полюсів,  $R_{пр}$  - опір чергової сходинки пускового реостата, що припадає на одну тягову машину. Для порівняння з дослідними даними, в розрахунках опору пускового реостата приймалися рівними реальним, які використовуються на дослідному потязі ЕР2С;  $R_{ш}$ ,  $L_{ш}$  - активний і індуктивний опір кола ослаблення поля, які припадають на одну тягову машину. Активний опір кола ослаблення поля дорівнює сумі значень активних опорів індуктивного шунта і резистора ослаблення поля, в режимі тяги обчислюється залежно від ступеня ослаблення поля.

$$R_{ш} = R_{оп} + R_{иш} = \frac{\beta \cdot R_{оз}}{(1 - \beta)}, \text{ Ом.}$$

(2.

25)

Індуктивний опір за даними РЕЗ змінюється в межах, зазначених в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Індуктивний опір обмоток

|                                     |    |     |
|-------------------------------------|----|-----|
| Струм якоря, $I_{\text{я}}$ , А     | 50 | 100 |
| Індуктивність, $L_{\text{ш}}$ , мГн | 90 | 40  |

$L_{\sigma 1}$ - індуктивність, що символізує потоки розсіювання, які замикаються по повітрю:

$$L_{\sigma 1} = 2p \cdot \frac{\sigma - 1}{2} \cdot W_{\text{оз}} \cdot \frac{d\Phi}{dI_3}, \text{ мГн.} \quad (2.2 \quad 6)$$

Значення  $d\Phi/dI_3$  визначається по кривій намагнічування. У розрахунках приймається, що 0,1 потоку розсіюється по повітрю і 0,1 по залізу. Тоді індуктивність обмотки збудження складається з основного потоку в обмотці збудження і потоку розсіювання по залізу:

$$L_{\text{оз}} = 2p \cdot (\sigma - 0.1) \cdot W_{\text{оз}} \cdot \frac{d\Phi}{dI_3}, \text{ мГн.} \quad (2.2 \quad 7)$$

$R_{\text{оз}} = 0,1337$  - активний опір обмотки збудження, що припадає на одну тягову машину. Через обмотку збудження протікає струм намагнічування  $I_{\mu}$ .

$R_{\text{вс}}$  - резистор вихрових струмів - це фіктивний резистор, який враховує дію вихрових струмів. При швидкій зміні потоку в металевих частинах машини виникають струми перешкоджають зміні основного потоку. Розрахунок вихрових струмів дуже складне завдання, але в даній роботі використовується спрощений метод обліку вихрових струмів [11].

$$R_{\text{вс}} = \frac{2p}{\frac{1}{R_{\text{п}}} + \frac{1}{2 \cdot R_{\text{я}}}}, \text{ Ом,} \quad (2.2 \quad 8)$$

де  $R_{\text{п}}$ ,  $R_{\text{я}}$  - еквівалентні опори стали головного полюса і станини, Ом.

$$\begin{cases} R_{\Pi} = \frac{\pi^2 \cdot W_{03}}{0.705 \cdot \gamma_{\Pi} \cdot l_{\Pi}} \cdot \left( \frac{a_{\Pi}}{h_{\Pi}} + \frac{h_{\Pi}}{a_{\Pi}} \right), \\ R_{\text{Я}} = \frac{\pi^2 \cdot W_{03}}{0.822 \cdot \gamma_{\text{Я}} \cdot l_{\text{Я}}} \cdot \left( \frac{a_{\text{Я}}}{h_{\text{Я}}} + \frac{h_{\text{Я}}}{a_{\text{Я}}} \right) \end{cases} \quad (2.29)$$

$a, h, l$  - сторони перетину полюса або ярма і довжина магнітної силової лінії в сантиметрах (див. рисунок 2.3).

$\gamma$  - електропровідності матеріалів:

$$\gamma_{\Pi} = 1.79 \cdot 10^4, \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}},$$

$$\gamma_{\text{Я}} = 7.15 \cdot 10^4, \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}.$$

$W_{\text{ря}}$  - фіктивні витки, що імітують вплив реакції ярма на потік в ТЕД. Результируючий потік збудження визначається двома величинами (див. рисунок 2.4): намагнічуювальною силою від струму намагнічування

$$F_{\text{в}} = I_{\mu} \cdot W_{03} \quad (2.30)$$

і силою реакції ярма (розмагнічуючої)

$$F_{\text{ря}} = I_{\text{я}} \cdot W_{\text{ря}}. \quad (2.31)$$

Розмагнічуючу силу реакції ярма допустимо визначати наступним чином [10]:

$$F_{\text{ря}} = k_{\text{р}} \cdot \frac{A \cdot \tau}{2}, \quad (2.32)$$

де:  $A$  - лінійне навантаження

$$A = \frac{2 \cdot i_a \cdot w}{\beta_k}, \frac{A}{\text{см}}. \quad (2.33)$$

Коефіцієнт  $k_p$  залежить від співвідношення намагнічуючої сили якоря і головних полюсів, оскільки цим співвідношенням визначається ступінь спотворення поля. Коефіцієнт  $k_p$  залежить також від рівня насичення зубцевого шару.

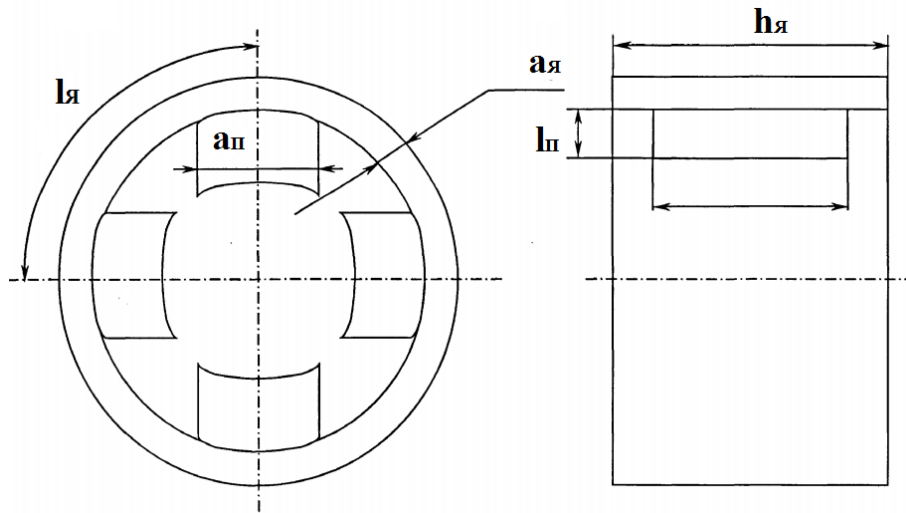


Рисунок 2.3 - До розрахунку опору фіктивного резистора вихрових струмів.

СФ, Вч / км

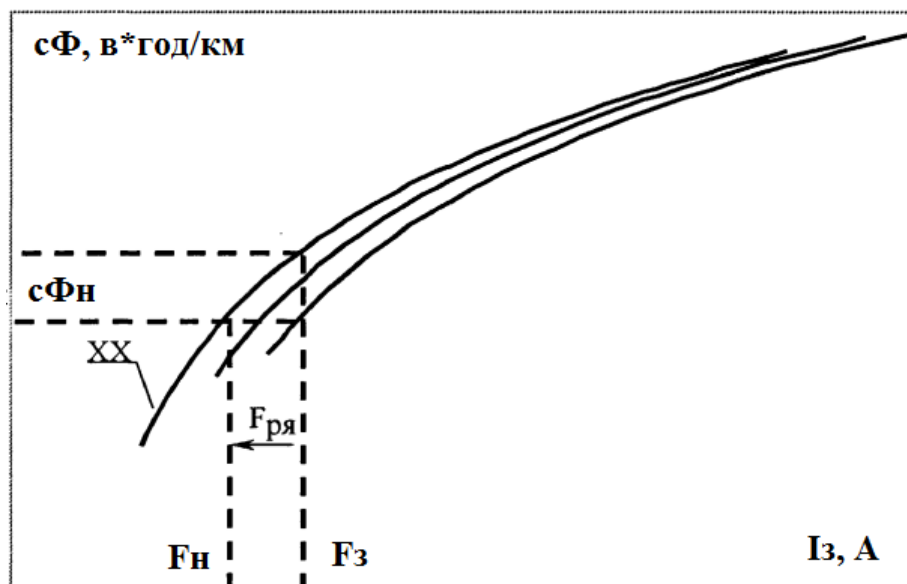
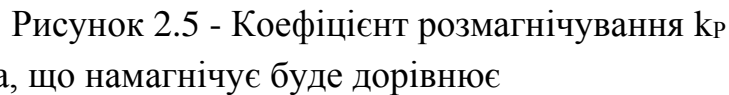


Рисунок 2.4 - До розрахунку реакції якоря

На рисунку 2.5 наведені отримані значення коефіцієнта розмагнічування  $k_p$  в функції від відношення  $F_{ря}/F_з$  для різних значень індукції в зубцях  $B_{Z1/3}$  ( $F_з$  – намагнічувальна сила котушки збудження) [10].



$I_{\text{я}}$ ,  $I_{\text{з}}$ ,  $I_{\text{м}}$ ,  $I_{\text{вс}}$  - відповідно струми якоря, збудження, намагнічування і вихровий струм.

Для вирішення системи диференціальних рівнянь (2.1) за допомогою ЕОМ використовуємо метод Рунге-Кутта четвертого порядку [9].

$$y(x) = y(x_0) + (x - x_0) \cdot y'(x_0) + \frac{(x - x_0)^2}{2} \cdot y''(x_0) + \dots, \quad (2.3)$$

який можна застосувати для наближеного визначення шуканої функції  $y(x)$ . У точці  $x_0 + h$  при малих значеннях  $h$  необхідно враховувати велику кількість членів ряду. Однак при цьому виникає необхідність апроксимації похідних від правих частин звичайних диференціальних рівнянь. Основна ідея методів



Рунге-Кутта полягає в тому, що похідні апроксимуються через значення функції  $f(x, y)$  в точках на інтервалі  $[x_0, x_0 + h]$ , які вибираються з умови найбільшої близькості алгоритму до ряду Тейлора. В залежності від старшого ступеня  $h$ , з якого враховуються члени ряду, побудовані обчислювальні схеми Рунге-Кутта різних порядків точності.

Для побудови обчислювальних схем методів Рунге-Кутта четвертого порядку в тейлоровському розкладанні шуканого рішення  $y(x)$  враховуються члени, що містять ступені кроку  $h$  до четвертого включно. Після апроксимації похідних правої частини звичайних диференціальних рівнянь  $f(x, y)$  отримано сімейство схем Рунге-Кутта четвертого порядку, з яких найбільш використовуваної в обчислювальній практиці є наступна:

$$y(x_0 + h) = y_0 + \frac{(k_1 + 2 \cdot k_2 + 2 \cdot k_3 + k_4)}{6} + O(h^5), \quad (2.36)$$

Де

$$\begin{cases} k_1 = h \cdot f(x_0, y_0), \\ k_2 = h \cdot f\left(x_0 + \frac{h}{2}, y_0 + \frac{k_1}{2}\right), \\ k_3 = h \cdot f\left(x_0 + \frac{h}{2}, y_0 + \frac{k_2}{2}\right), \\ k_4 = h \cdot f(x_0 + h, y_0 + k_3). \end{cases} \quad (2.37)$$

Система (2.37) на кожному кроці  $h$  вимагає обчислення правої частини звичайних диференціальних рівнянь в чотирьох точках. Локальна похибка схеми  $O(h^5)$  має п'ятий порядок, глобальна - четвертий. Схема узагальнюється для систем звичайних диференціальних рівнянь, записаних у формі Коші [11]. Для зручності програмної реалізації, особливо в разі систем звичайних диференціальних рівнянь, систему (2.1) рекомендується перетворити до вигляду:

$$\begin{cases}
 \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = \frac{\frac{U}{n} - E - R_{\text{ТМ}} \cdot I_{\text{я}} - R_{\text{Ш}} \cdot (I_{\text{я}} - I_{\text{з}}) - L_{\text{Ш}} \cdot \frac{dI_{\text{в}}}{dt}}{L_{\text{ТМ}} + L_{\text{Ш}}}, \\
 \frac{dI_{\text{з}}}{dt} = \frac{-R_{\text{ОВ}} \cdot I_{\text{з}} - R_{\text{ВТ}} \cdot I_{\text{ВТ}} + R_{\text{Ш}} \cdot (I_{\text{я}} - I_{\text{з}}) + L_{\text{Ш}} \cdot \frac{dI_{\text{я}}}{dt}}{L_{\text{ОЗ}} + L_{\text{Ш}}}, \\
 \frac{dI_{\mu}}{dt} = \frac{R_{\text{ВТ}} \cdot I_{\text{ВТ}}}{L_{\text{ОЗ}}}, \\
 F_{\text{Н}} = I_{\mu} \cdot W_{\text{ОЗ}} - I_{\text{я}} \cdot W_{\text{РЯ}}, \\
 \Phi = f(F_{\text{Н}}), \\
 I_{\text{ВТ}} = I_{\text{в}} - I_{\mu}, \\
 I_{\text{Ш}} = I_{\text{я}} - I_{\text{в}},
 \end{cases} \quad (2.38)$$

Рішення системи рівнянь повинно відбуватись за допомогою ЕОМ.

Вирішуючи цю систему, отримаємо характеристики, наведені на рисунку 2.6. і 2.7.

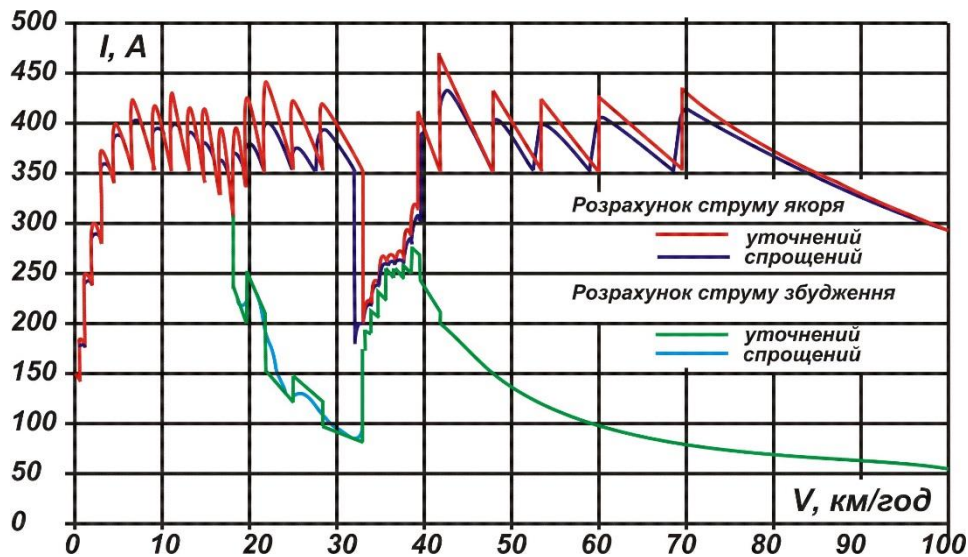


Рисунок 2.6 – Швидкісні характеристики, дослідження впливу прискорення і вихрових струмів

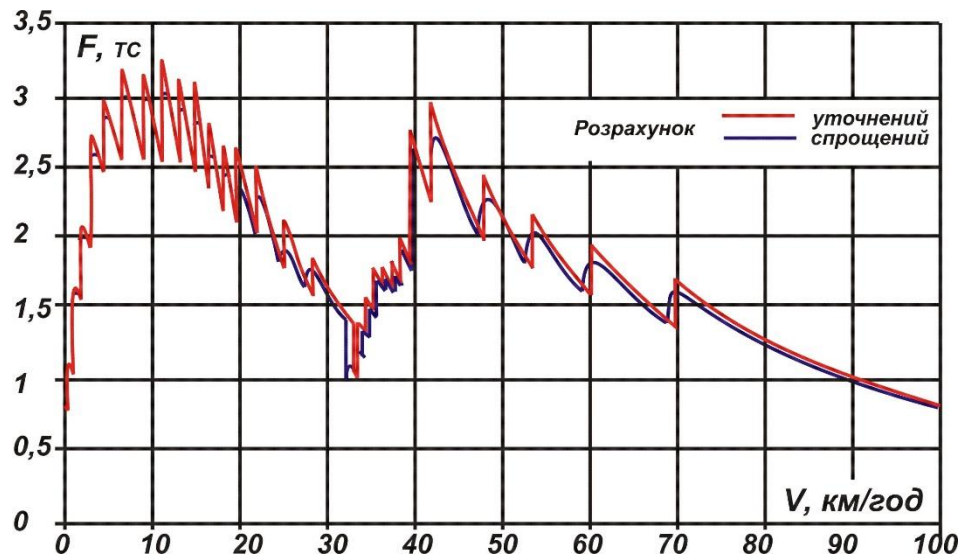


Рисунок 2.7 - Тягові характеристики, дослідження впливу прискорення і вихрових струмів

Далі були побудовані криві руху, і отримані дані по витраті енергії, які зведені в таблицю 2.2. При цьому напруга контактної мережі в режимі тяги приймалася рівною 3000 В, в режимі рекуперативного гальмування 3500 В.

Таблиця 2.2 - Різниця у витраті енергії на тягу і в поверненні енергії в режимі рекуперації

| Розрахунок | $\Sigma A$ , Вт*год | $A_t$ , Вт*год | $A_p$ , Вт*год | $A_{пр}$ , Вт*год | $V_{пв}$ , км/ год | $V_{пг}$ , км/ год |
|------------|---------------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| спрощений  | 6100                | 8950           | 2850           | 445               | 71,6               | 56,2               |
| уточнений  | 5782,2              | 8373,8         | 2591,5         | 577,1             | 71,0               | 56,0               |

Аналізуючи дані таблиці 2.2, отримуємо різницю у витраті енергії на тягу 6,4%, різницю в поверненні енергії в режимі рекуперації 9,1% в порівнянні з розрахунковими даними. Різниця в підсумковій витраті енергії становить 5,2%. Так як в результаті уточненого розрахунку зменшилися кидки струму якоря, зменшилася витрата енергії на тягу в порівнянні з даними, отриманими при спрощеному розрахунку. Внаслідок цього збільшилася різниця в підсумковій витраті енергії.

## 2.2 Вплив способу обліку втрат в тяговим приводом на пуско-гальмівні діаграми

При використанні уточненого розрахунку тягових і гальмівних характеристик, відмінність з дослідними даними склала 5,2%, при цьому коефіцієнт, що враховує магнітні і механічні втрати приймався рівним 0,95. Характер пуско-гальмівних діаграм, розрахованих з урахуванням прискорень і уповільнень поїзда і вихрових струмів ТМ практично збігається з дослідними. Отже, можливою причиною відмінності розрахункових і дослідних

енергетичних показників може бути наближений облік магнітних і механічних втрат коефіцієнтом 0,95. Ця обставина робить необхідним уточнення обліку втрат в тяговому електроприводі при оцінці його енергетичних показників.

Загальні методики розрахунку втрат в тяговому приводі відомі [12]. Основним завданням таких розрахунків є норма витрати енергії е.р.с. на полігоні експлуатації.

### 2.2.1 Розрахунок втрат енергії в тягового приводу.

Деяка частина підведеної до тягової машині енергії неминуче втрачається в самій машині і редукторі. Втрати в електричних машинах поділяють на основні та додаткові. Основні втрати, що підрозділяються на механічні, електричні і магнітні, виникають в результаті відбування в машині основних електромагнітних і механічних процесів. Додаткові втрати обумовлені різними вторинними явищами.

До електричних втрат відносяться втрати в обмотках і перехідному опорі щіткових контактів. При послідовному збудженні тягових машин в режимі тяги ці втрати розраховуються за формулою [12]:

$$\Delta P_{\Sigma} = I_{\text{я}}^2 \cdot (r_{\text{я}} + r_{\text{дп}} + \beta \cdot r_{\text{гп}}) + \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_{\text{я}}, \text{ Вт} \quad (2.39)$$

де  $\Delta U_{\text{щ}}$  - падіння напруги під щітками.

При незалежному збудженні в режимі гальмування:

$$\Delta P_{\Sigma} = I_{\text{я}}^2 \cdot (r_{\text{я}} + r_{\text{дп}}) + \frac{I_{\text{в}}^2 \cdot r_{\text{гп}}}{\eta_{\text{возб}}} + \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_{\text{я}}, \text{ Вт} \quad (2.40)$$

При визначенні ККД ТМ електричні втрати визначають при 100°C для ізоляції класу нагрівостійкості В і 125°C для ізоляції класів нагрівостійкості F і H [12]. Електричні втрати не впливають на величину обертового моменту ТМ, але зменшують її електрорушійну силу, а, отже, її частоту обертання.

Під втратами в стали розуміють втрати в ярмі і зубцях сердечника якоря при холостому ході, сюди ж відносять втрати в сталі полюсних наконечників головних полюсів, обумовлені зубчастим будовою якоря і полюсного наконечника.

Втрати в сталі обчислюють як суму магнітних втрат в окремих частинах машини. Магнітні втрати включають в себе втрати на гістерезис і вихрові струми, викликані перемагнічуванням сердечників. Існує велика кількість формул для їх обчислення, що дають різну ступінь точності визначення втрат. Згідно [26], втрати в сталі можна обчислити за формулою, яка враховує і втрати в наконечниках головних полюсів,

$$\Delta P_{\text{ст}} = (2.4 \div 2.7) \cdot (m_a \cdot p_a + m_z \cdot p_z), \text{ Вт} \quad (2.41)$$

)

де  $m_a$  - маса сталі ярма якоря, кг;  $m_z$  - маса сталі зубців якоря, кг;  $p_a$  і  $p_z$  - питомі втрати в сталі названих елементів, Вт/кг.

Визначають перераховані величини наступним чином:

$$m_a = \frac{\pi}{4} \cdot [(D_a - 2 \cdot h_z)^2 - D_i^2 - m_k \cdot d_k^2] \cdot l_a \cdot k_c \cdot 7.8 \cdot 10^{-3} \quad (2.42)$$

)

$$m_z = \left\{ \frac{\pi}{4} \cdot [D_a^2 - (D_a - 2 \cdot h_z)^2] - Z \cdot b_{\text{п}} \cdot h_z \right\} \cdot l_a \cdot k_c \cdot 7.8 \cdot 10^{-3} \quad (2.43)$$

де 7,8 - щільність сталі, кг/м<sup>3</sup>;  $D_a$  - діаметр якоря, мм,  $h_z$  - глибина паза, мм,  $D_i$  - внутрішній діаметр сердечника якоря, мм,  $m_k$  - число вентиляційних каналів,  $d_k$  - діаметр вентиляційних каналів, мм,  $l_a$  - довжина сердечника якоря, мм,  $k_c$  - коефіцієнт заповнення пакету сталлю,  $Z$  - число пазів,  $b_{\text{п}}$  - ширина паза, мм.

Дані для розрахунку приведено в додатку А.

$$p_a = p_{\text{Г}} + p_{\text{вихр}} = \left[ 0.044 \cdot f + 5.6 \cdot \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right] \cdot (B_a)^2, \quad (2.44)$$

де  $p_{\text{Г}}$  - питомі втрати в ярмі якоря на гістерезис, Вт/кг;  $p_{\text{вихр}}$  - питомі втрати в ярмі якоря на вихрові струми, Вт/кг;  $B_a$  - середнє значення індукції в осерді якоря:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot l_a \cdot k_c \cdot h_a}, \text{ Тл}, \quad (2.45)$$

де  $h_a$  - активна висота ярма якоря, м (див. додаток 2). Аналогічно

$$p_z = \left[ 0.044 \cdot f + 5.6 \cdot \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right] \cdot \left( B_{z1/3} \right)^2, \quad (2.46)$$

де  $B_{z1/3}$  - індукція в зубцях на 1/3 від основи:

$$B_{z1/3} = \frac{2p \cdot \Phi}{l_a \cdot b_{z1/3} \cdot Z \cdot \alpha_\delta \cdot k_c}, \text{ Тл}, \quad (2.47)$$

де  $b_{z1/3}$  - ширина зубця на 1/3 його висоти (див. додаток 2).

Додаткові втрати при навантаженні включають в себе: комутаційні втрати, в міді обмотки якоря від головного пазового поля, а також збільшення втрат в стали від спотворення магнітного поля машини при навантаженні. При визначенні ККД додаткові втрати можна визначити (по ГОСТ 2582-2001) за допомогою коефіцієнта  $k_d$  в частках основних втрат в стали

$$\Delta P_{\text{доб}} = k_d \cdot \Delta P_{\text{ст}}, \quad (2.48)$$

де  $k_d$  - коефіцієнт, що оцінюється за даними рисунку 2.8 в залежності від струму двигуна.

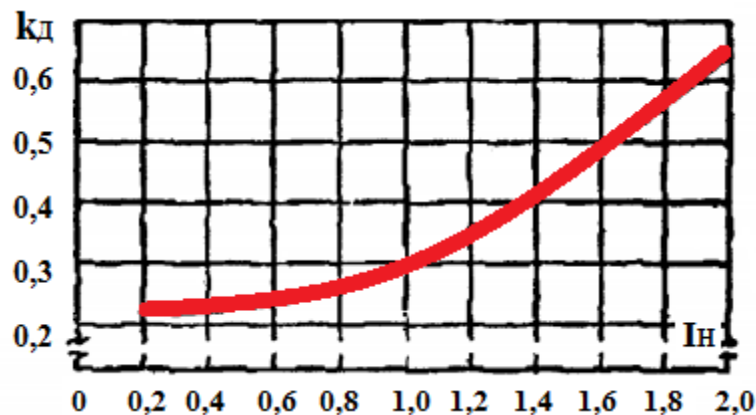


Рисунок 2.8 - Залежність коефіцієнта  $k_d$

Механічні втрати складаються з втрат на тертя щіток об колектор, на тертя в підшипниках якоря, на вентиляцію і втрат в редукторі. Згідно [12] втрати на тертя щіток об колектор

$$\Delta P_{\text{тщ}} = 9.81 \cdot \Sigma S_{\text{щ}} \cdot P_{\text{щ}} \cdot \rho \cdot V_k, \text{ Вт}, \quad (2.49)$$

де:  $\Sigma S_{\text{щ}}$  - загальна площа прилягання щіток до колектора,  $\text{см}^2$ ;  $P_{\text{щ}}$  - тиск на щітку,  $\text{кг/см}^2$ ,  $\rho = 0,15 \dots 0,17$ ,  $V_k$  - окружна швидкість колектора,  $\text{м/с}$ , яка обчислюється таким чином:

$$V_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_{\text{я}}}{60} \quad (2.50)$$

При цьому частота обертання якоря  $n_{\text{я}}$  обчислюється за формулою:

$$n_{\text{я}} = 5.3 \cdot \frac{\mu \cdot V}{D_{\text{вк}}} \cdot 10^3, \frac{\text{об}}{\text{хв}}, \quad (2.51)$$

де  $D_{\text{вк}}$  - діаметр ведучого колеса.

Втрати на тертя в підшипниках складають 0,002 від підведеної потужності при номінальному режимі:

$$\Delta P_{\text{подш}} = 0.002 \cdot U \cdot I_{\text{н}}, \text{Вт}. \quad (2.52)$$

Проведені раніше порівняльні розрахунки [12] показали, що втрати на вентиляцію можна розрахувати за формулою:

$$\Delta P_{\text{вент}} = 0.03 \cdot V_{\text{я}}^3, \text{Вт}, \quad (2.53)$$

де  $V_{\text{я}}$  - окружна швидкість якоря,  $\text{м/с}$ , обчислюється за формулою:

$$V_{\text{я}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{а}} \cdot n_{\text{я}}}{60} \quad \text{-----} \quad (2.54)$$

Втрати в зубчастій передачі допустимо визначати наступним чином

[12]:

$$\Delta P_{3П} = 0.025 \cdot U \cdot I_{я}, \text{ Вт.}$$

(2.55  
)

А також в залежності від втрат в рушійному механізмі:

$$\Delta P_3 = \Delta p_3 \cdot P_1 / 100,$$

(2.56  
)

де:  $\Delta p_3$  - втрати в рушійному механізмі, %

$P_1$  - підведена до двигуна активна потужність, Вт

$$P_1 = U \cdot I,$$

(2,57  
)

де  $U$  - напруга двигуна, В;  $I$  - струм якоря двигуна, А.

Втрати в рушійному механізмі визначаються по ГОСТ 2582-2001 в залежності від співвідношення підведеної до двигуна активної потужності і номінальною активної потужності  $100 \cdot P_1 / P_{1н}$ . Отримані дослідним шляхом дані, що описують цю залежність, представлені в таблиці 2.3. Крива залежності представлена на рисунку 2.9.

Таблиця 2.3 - Втрати в рушійному механізмі в залежності від співвідношення підведеної до двигуна активної потужності

| $100 \cdot P_1 / P_{1н}$ | 200 | 150 | 125  | 100 | 75  | 60   | 50  | 40  | 30  | 25   |
|--------------------------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|
| $\Delta p_3$             | 4,2 | 3,6 | 3,25 | 3,0 | 3,0 | 3,25 | 3,8 | 5,3 | 8,0 | 10,2 |

Таким чином, втрати потужності  $\Delta P$  в тяговому приводі визначається як сума втрат:

$$\Delta P = \Delta P_3 + \Delta P_{ст} + \Delta P_{тщ} + \Delta P_{подш} + \Delta P_{вент} + \Delta P_{3П}, \text{ Вт.}$$

(2.58)



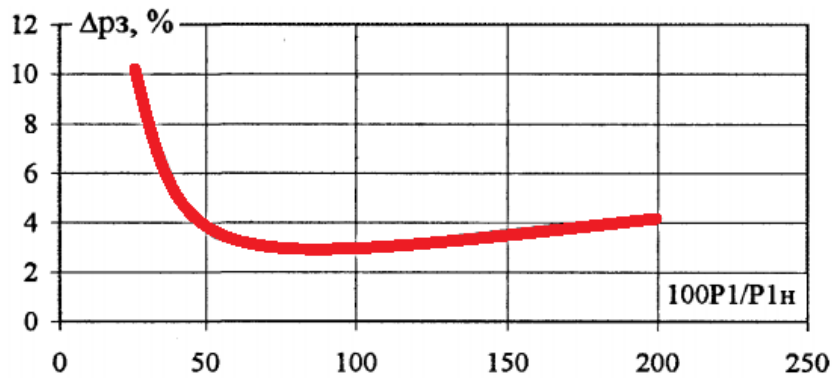


Рисунок 2.9 - До розрахунку втрат в зубчастій передачі  
Тоді ККД тягової машини дорівнюватиме:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{U \cdot I_{\text{я}}}, \quad (2.59)$$

при послідовному збудженні в режимі тяги;

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{U \cdot I_{\text{я}} + \frac{I_{\text{в}}^2 \cdot r_{\text{ов}}}{\eta_{\text{возб}}}}, \quad (2.60)$$

при незалежному збудженні (НЗ) в режимі рекуперативного-реостатного гальмування.

За отриманими даними розраховуємо силу тяги (знак "-") і силу гальмування (знак "+") за формулою:

$$F = 3.6 \cdot C_{\Phi} \cdot I_{\text{я}} \pm \frac{3.6 \cdot (\Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{тщ}} + \Delta P_{\text{подш}} + \Delta P_{\text{вент}} + \Delta P_{\text{зп}})}{V}, \text{ тс.} \quad (2.61)$$

Для порівняння з реальними характеристиками, отриманими при випробуванні поїзда, проводиться розрахунок тягової характеристики з урахуванням всіх складових втрат енергії, вихрових струмів і прискорення. Характеристики, розраховані за формулою 2.61, для двох способів визначення втрат в зубчастій передачі з урахуванням прискорення і вихрових струмів наведені на рисунках 2.10 – 2.13.

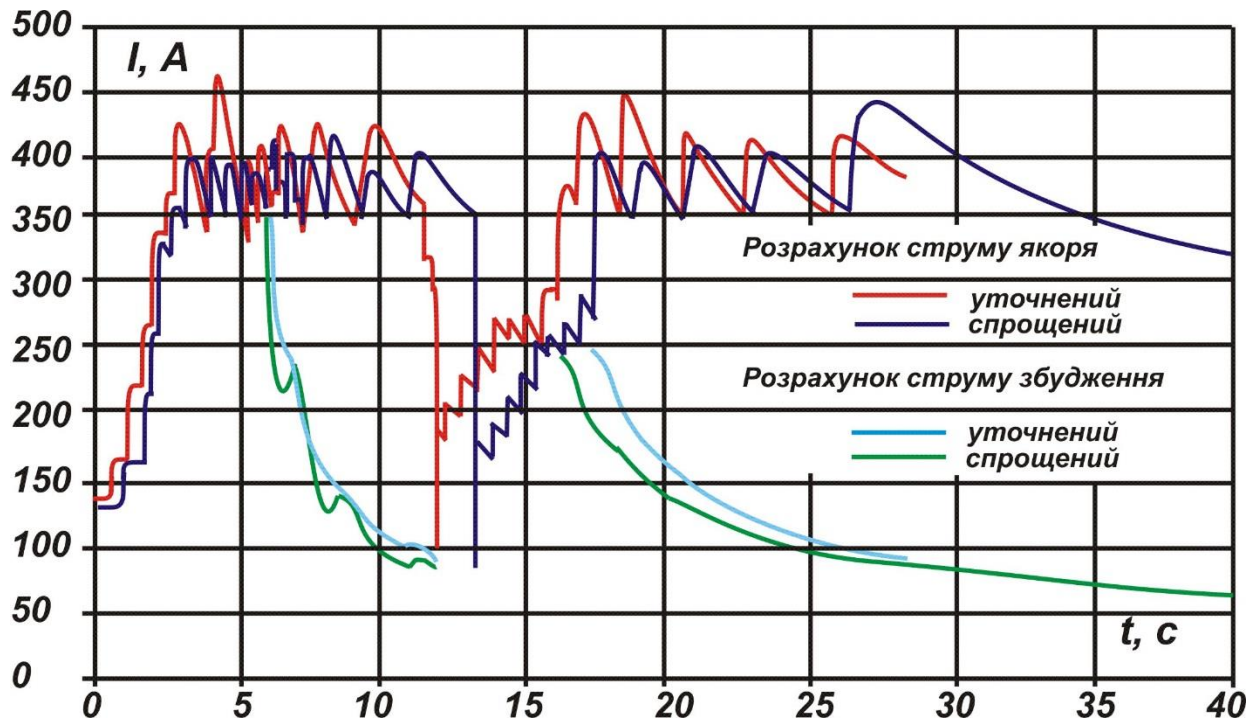


Рисунок 2.10 – Залежність струму якоря від часу в моторному режимі. Втрати в зубчастій передачі складають 2.5% від підведеної потужності

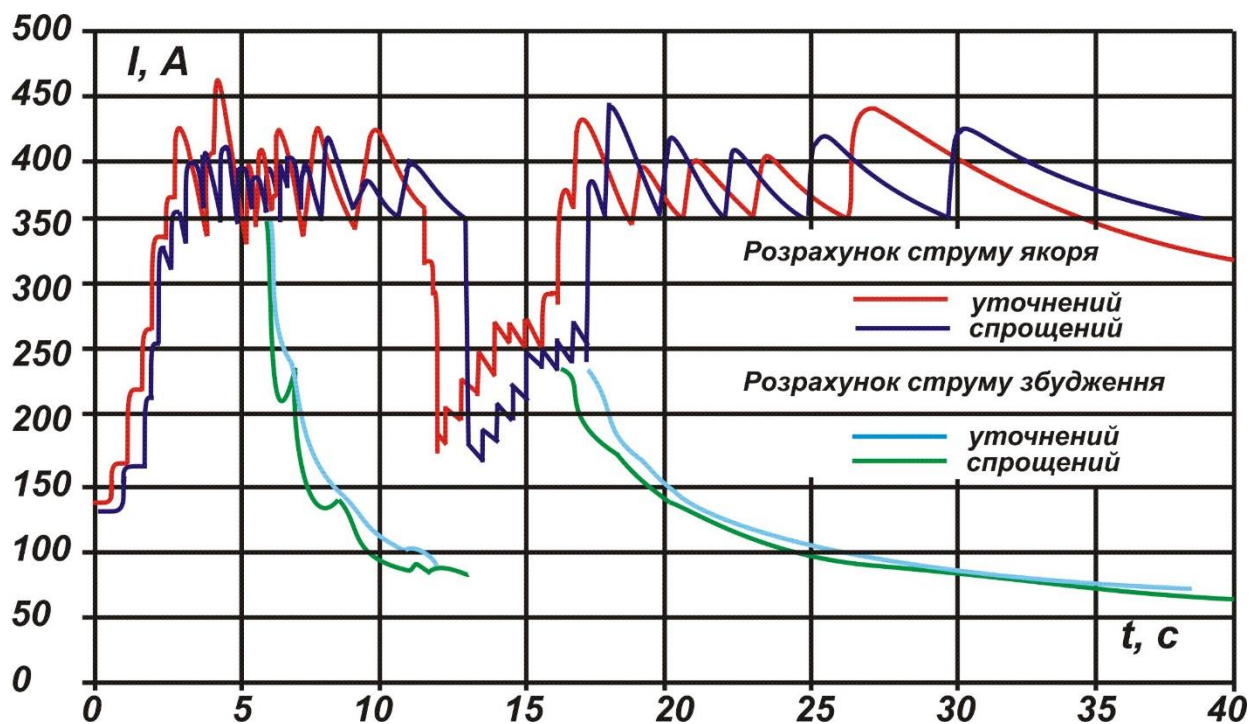


Рисунок 2.11 – Залежність струму якоря від часу в моторному режимі. Втрати в зубчастій передачі визначаються згідно ГОСТ 2582-2001

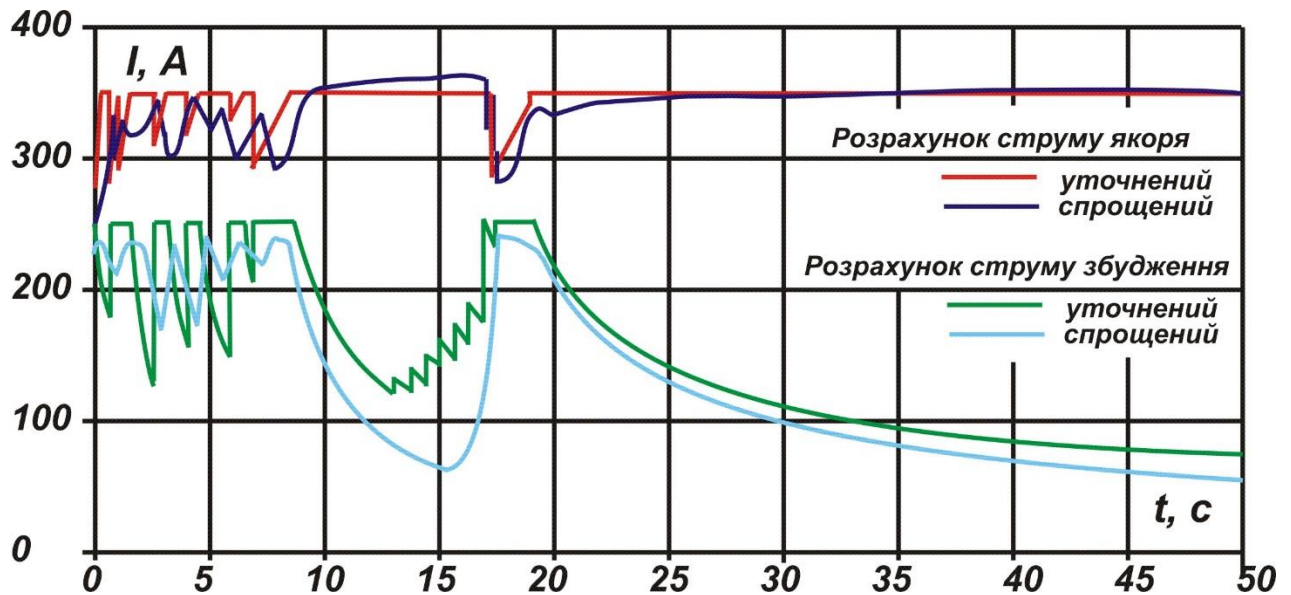


Рисунок 2.12 – Залежність струму якоря від часу в режимі гальмування.  
Втрати в зубчастій передачі складають 2.5% від підведеної потужності

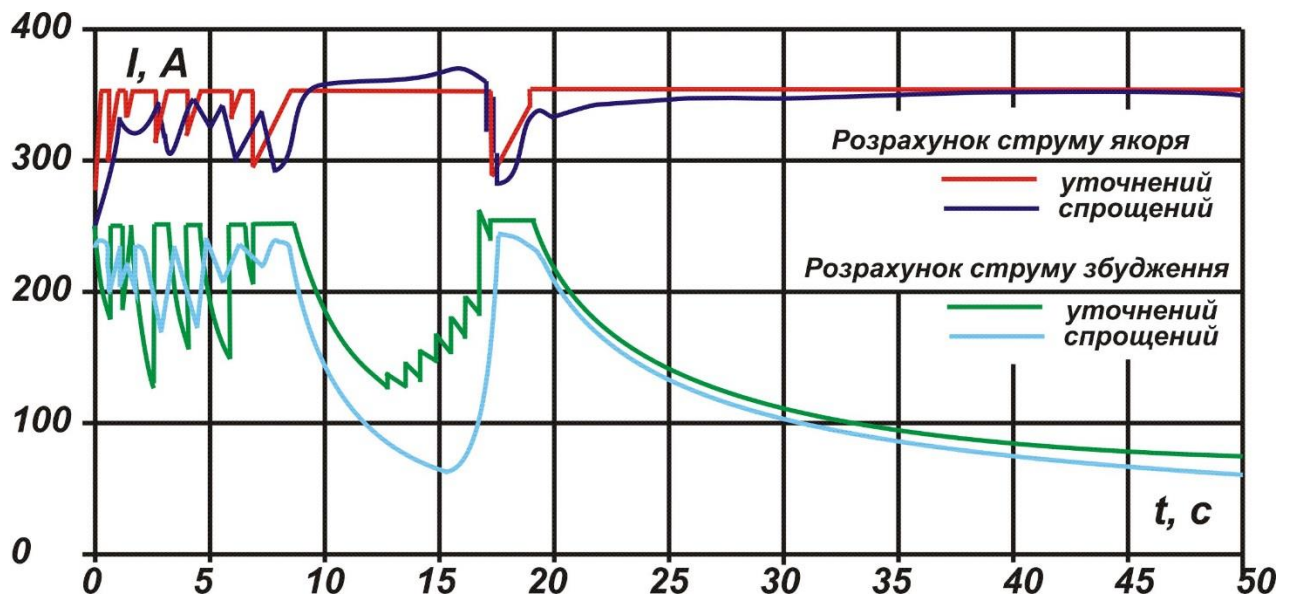


Рисунок 2.12 – Залежність струму якоря від часу в режимі гальмування.  
Втрати в зубчастій передачі визначаються згідно ГОСТ 2582-2001

За цими характеристиками побудовані криві руху і зроблено розрахунок енергії (таблиця 2.4).

При розрахунку тягової характеристики по (1.6) з  $\eta_{\text{МЕХ}} + \text{МАГН}} = 0,95$  і при її розрахунку по (2.61) з урахуванням залежності всіх складових втрат енергії від швидкості руху, крім втрат в зубчастій передачі, різниця в розрахунковій витраті енергії становить 1,2%, якщо прийняти втрати в зубчастій передачі постійними і рівними 2,5% від підведеної до ТМ потужності, і 6,82 %, якщо втрати в зубчастій передачі визначати за рекомендованою ДСТУ кривою.

2.2.2 Порівняння характеристик, які отримані в результаті розрахунку,

з дослідними даними.

При проведенні випробувань електропоїзда з ЕС ТЕП, ВППЗТ були отримані осцилограми струму з кроком по часу 0,02 с [4]. Для більш точного порівняння розрахункових показників з дослідними, був проведений перерахунок характеристик за формулами (2.38) і (2.39-2.61) на нову напругу, яка змінюється залежно від ступеня пускового реостата і ступеня ослаблення поля. Для режимів тяги і гальмування побудовані залежності струму  $I(t)$ , наведені на рисунку 2.10 і 2.11. У розрахунках уставки РПТ за часом і по току приймалися рівними реальним. При розрахунку номінали опорів пускового реостата і ступенів ослаблення поля задавалися виходячи з реальних значень. За отриманими характеристиками були побудовані криві руху та проведений розрахунок витрати енергії.

Як видно з таблиці 2.4, якщо враховувати всі складові втрат в ТЕП, відсоток відмінності загальної витрати енергії становить 5,9% і 7,5% в порівнянні з дослідними даними для різних способів обліку втрат в зубчастій передачі. Якщо прийняти коефіцієнт, що враховує магнітні і механічні втрати постійним і рівним 0,95, то відсоток відмінності також становить 7,5%. Оскільки немає достовірних даних про втрати в зубчастій передачі і в зв'язку зі складністю їх розрахунку, немає необхідності враховувати всі складові втрат енергії в тяговому електроприводі, тобто механічні і магнітні втрати можна враховувати постійним коефіцієнтом. Беручи різні значення коефіцієнта, що враховує магнітні і механічні втрати, знаходимо його оптимальне значення, при якому розрахункова кількість споживаної поїздом енергії значення, при якому розрахункова кількість споживаної поїздом енергії незначно відрізняється від реального. Найбільш витратним виявився варіант, коли коефіцієнт, що враховує магнітні і механічні втрати залишався постійним і рівним 0,975. При цьому до уваги бралось те, що при даному коефіцієнті відсоток втрат припадають на втрати в зубчастій передачі становить близько 1,5%.

Тому подальше зменшення значення коефіцієнта  $\eta_{\text{МЕХ}} + \eta_{\text{МАГН}}$  не виправдано. Отримані при  $\eta_{\text{МЕХ}} + \eta_{\text{МАГН}} = 0,95$  незначні відмінності в витратах енергії, отриманих при випробуваннях і розрахунковим шляхом, можуть спостерігатися внаслідок того, що випробування проводилися на кільці, а в розрахунку не враховувався те, що опір руху в кривій може змінюватися в залежності від стану рейок, через що можуть виникати мікробоксування. Крім того, на опір руху значно впливають погодні умови (вітер, вологість і т.д.). На відмінності у витраті енергії також впливають внутрішні опору ТМ і ПШ, які змінюються в залежності від ступеня нагріву обмоток; розкид навантажувальних характеристик, відмінності діаметрів бандажів коліс.



Таблиця 2.4 – Порівняння складових втрат на загальну витрату енергії

| Значення коефіцієнта, що враховує магнітні і механічні втрати   | Пуск                                |                  |                          |                                       |                                    | гальмування                           |                      |                              |   |                               | Разом  |                            |
|---|-------------------------------------|------------------|--------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|------------------------------|---|-------------------------------|--|----------------------------|
|   | Швидкість переходу на вибіт, км/год | Час розгону, сек | Довжина шляху розгону, м | Витрата енергії в режимі тяги, Вт*год | Різниця витрати енергії на тягу, % | Швидкість початку гальмування, км/год | Час гальмування, сек | Довжина гальмівного шляху, м | Повернення енергії в режимі гальмування, Вт*год | Різниця повернення енергії, % | Підсумкова витрата енергії з урахуванням рекуперації | (+)/(-) витрати енергії, % |
| Дослідні дані   | 71,60                               | 35,60            | 396,0                    | 17900,00                              | -                                  | 56,200                                | 23,700               | 186,00                       | 5700,000  | -                             | 12200,000  | -                          |
| $\eta_{\text{МЕХ-МАГН}} = \text{var}$ (втрати в ЗП визначаються за ДСТУ)                                | 71,16                               | 37,08            | 403,0                    | 18602,80                              | 3,926                              | 56,280                                | 23,940               | 188,00                       | 5485,917  | - 3,756                       | 13116,879  | 7,515                      |
| $\eta_{\text{МЕХ-МАГН}} = \text{var}$ (втрати в ЗП складають 2,5% від підведеної до двигуна потужності) | 71,22                               | 36,84            | 400,0                    | 18457,22                              | 3,113                              | 56,340                                | 24,120               | 190,00                       | 5542,134  | - 2,770                       | 12915,082  | 5,861                      |
| $\eta_{\text{МЕХ-МАГН}} = 0,95$   | 71,23                               | 37,20            | 403,0                    | 18612,32                              | 3,979                              | 56,340                                | 23,820               | 188,00                       | 5493,425  | - 3,624                       | 13118,899  | 7,532                      |
| $\eta_{\text{МЕХ-МАГН}} = 0,965$  | 71,21                               | 36,72            | 397,0                    | 18299,73                              | 2,233                              | 56,310                                | 24,120               | 191,00                       | 5577,294  | - 2,153                       | 12722,435  | 4,282                      |
| $\eta_{\text{МЕХ-МАГН}} = 0,975$  | 71,23                               | 36,36            | 393,0                    | 18109,55                              | 1,171                              | 56,310                                | 24,420               | 193,00                       | 5636,929  | - 1,107                       | 12472,623  | 2,235                      |

1 Розроблена методика розрахунку пускових діаграм забезпечує їх практично повний збіг з експериментальними даними, які істотно відрізняються від розрахованих за традиційними методиками. Тому в тягово-енергетичних розрахунках, які мають на меті точну оцінку енергетичної ефективності нових технічних рішень щодо вдосконалення тягового електроприводу, необхідно використовувати уточнену методику розрахунку пускових діаграм електропоїздів.

2 Порівнюючи отримані в результаті уточненого розрахунку дані з дослідними, можна зробити висновок про значний вплив на тягові характеристики прискорення та вихрових струмів. Крім того, прийняте раніше значення коефіцієнта, що враховує магнітні і механічні втрати  $\eta_{\text{МЕХ}} + \eta_{\text{МАГН}} = 0,95$ , дає істотну відмінність у витраті енергії в порівнянні з дослідними даними.

3 Отримані з використанням уточнених розрахунків пуско-гальмівних діаграм і розрахованих по ДСТУ втрат в передавальному механізмі значення витрати енергії значно відрізняються від дослідних, що може бути наслідком відмінності реальних втрат від розрахованих по ДСТУ. Тому розрахунки з використанням рекомендованої ДСТУ залежності втрат енергії від переданої потужності, дають невірні результати, що свідчить про необхідність уточнення даних про втрати енергії в редукторах тягового приводу.

4 Найбільш задовільні результати отримані при обліку суми магнітних і механічних втрат постійним коефіцієнтом при  $\eta_{\text{МЕХ}} + \eta_{\text{МАГН}} = 0,95$ .



### 3 ВДОСКОНАЛЕННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧА СИСТЕМА ТЯГОВОГО ПРИВОДУ

З шести можливих алгоритмів управління режимами тяги і електричного гальмування на дослідному електропоїзді з ЕС ТЕП для практичної реалізації повинен бути обраний алгоритм, що забезпечує найменшу витрату енергії при технічній швидкості руху 55 км/год без зміни традиційного управління роботою реостатного контролера за допомогою реле прискорення і гальмування (РПГ) з постійною уставкою струму тягових машин. Додатковою перевагою такого рішення є збереження штатної системи захисту електрообладнання від небезпечних режимів.

Реалізовані на електропоїздах ЕР2Т, що експлуатується багато років, тягові і гальмівні характеристики показані на рисунках 3.1 і 3.2.

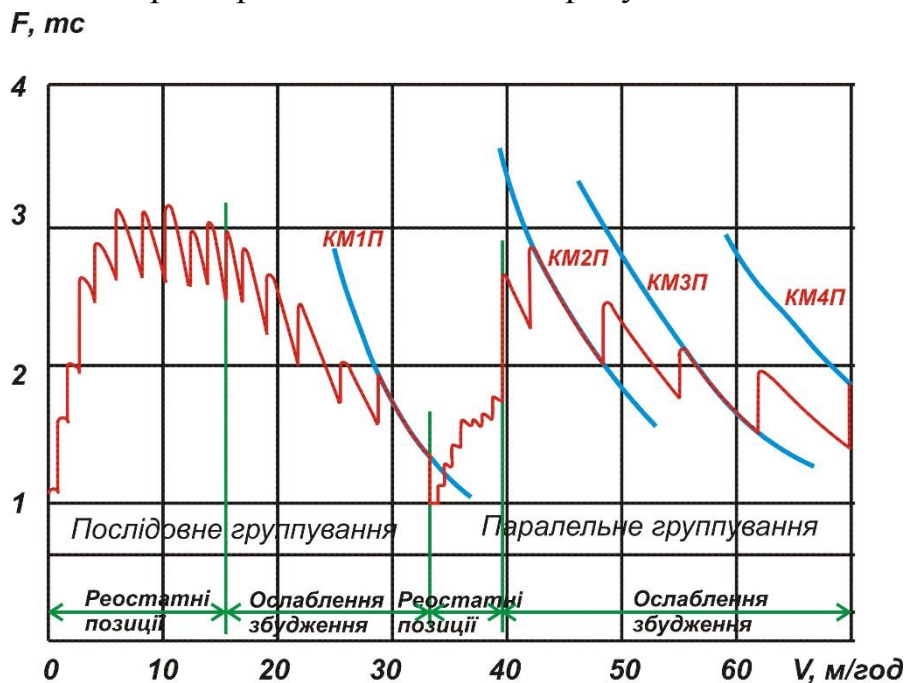


Рисунок 3.1 – Тягові характеристики ЕР2Т

Їх очевидними недоліками є так звані «провали» сил тяги та гальмування в процесах перегрупувань тягових машин, що погіршує динаміку поїзда і повинно призводити до збільшення витрати енергії. Як показав досвід експлуатації поїзда в депо Придніпровської залізниці, такий характер тягових і гальмівних характеристик не викликає ускладнень у машиністів, які мають досвід управління поїздом з ЕС ТЕП.



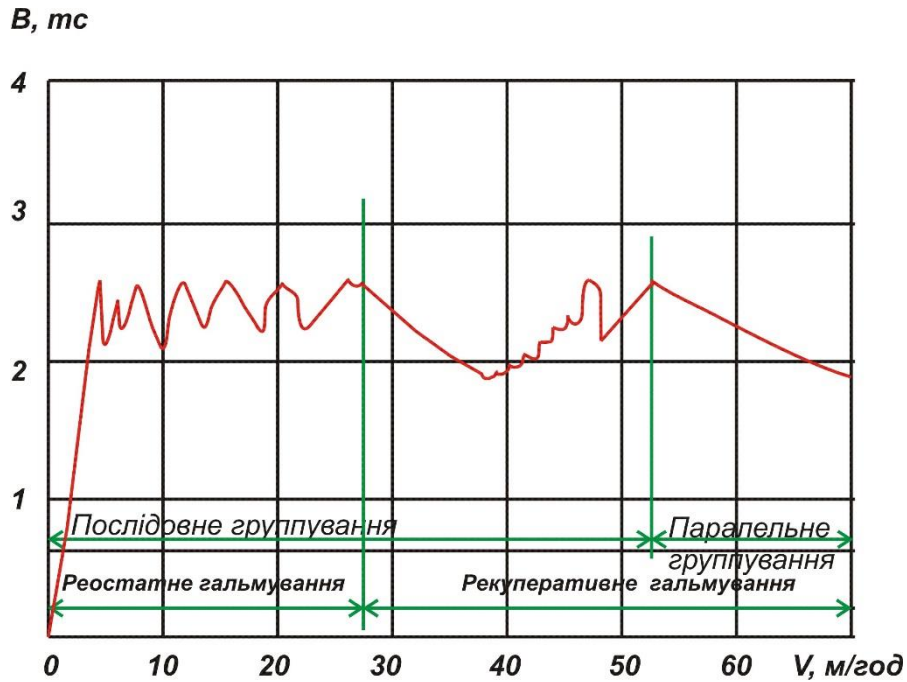


Рисунок 3.2 – Гальмівні характеристики EP2T

Провал сили тяги при розгоні поїзда взагалі не помічається машиністами, а провал гальмівної сили створює психологічний вплив на машиністів, що потрапляють на поїзд вперше, так як деяке зменшення гальмівної сили відбувається при гальмуванні в межах платформи. При наявності досвіду управління поїздом з ЕС ТЕП і ця обставина не сприймається машиністами різко негативно. Погіршення динаміки поїзда через розглянутих провалів сил тяги та гальмування незначно. У контрольних тягово-енергетичних випробуваннях отримано, що при русі по перегону довжиною 3 км з технічною швидкістю 55 км/год час розгону по відношенню до серійних електропоїздів збільшується на 2,8 с, а гальмування - на 1,2 с, що становить лише 2% від часу руху по перегону. При цьому гальмівний шлях збільшується на 15 м. Очевидно, що таке погіршення динаміки не має практичного значення, так як розкид цього показника у серійних поїздів може бути і вище через відхилення параметрів тягових машин і механізмів управління. Проте, принципово розглядаються спроби усунути провали сил тяги та гальмування. Тому в магістерській роботі розглянуті можливі варіанти відповідних технічних рішень і оцінена їх енергетична ефективність з метою оцінки доцільності практичного використання.

Крім того, повільна робота реостатного контролера обумовлена примусовою затримкою часу включення чергової сходинки на 0,5 секунди з метою виключення проскакування позиції, що збільшує втрати енергії в пуско-гальмівних резисторах в процесах перегрупувань тягових машин, що робить актуальним завдання оцінки ефективності та доцільності використання

прискорення роботи реостатного контролера.

Очевидною додатковою перевагою тягових характеристик поїзда з ЕС ТЕП перед серійними поїздами є можливість роботи тягового електроприводу на першому положенні контролера машиніста (КМШ) на безреостатній позиції з ослабленням поля 0,229, що робить можливим раціоналізацію режиму руху по довгих перегонах і реалізацію на них руху з усередненою швидкістю, що, як відомо, може дати зниження витрат енергії. Ця обставина робить актуальними дослідження енергетичної ефективності використання цієї можливості.

### 3.1 Забезпечення сталості сил тяги і гальмування на послідовному угрупованні тягових машин

Зниження сили тяги на послідовному угрупованні при реалізованому алгоритмі управління відбувається через зменшення струму збудження при постійному значенні струму якорів. Величина струму збудження на безреостатній позиції визначається практично тільки швидкістю руху, так як потік збудження повинен змінюватися обернено пропорційно швидкості руху. При цьому мала зміна струму збудження забезпечує велику зміну струму якорів. Тому необхідне для збереження пускової сили тяги на безреостатній позиції збільшення струму якорів при зростанні швидкості руху може бути досягнуто за рахунок незначної зміни залежності струму збудження від швидкості руху. При послідовному збудженні це досягається коригуванням алгоритму керування включенням чергової сходинки ослаблення поля.

Очевидно, що необхідне для підтримання постійного значення сили тяги в режимі ослаблення поля прискорення, включення чергових ступенів ослаблення поля може бути досягнуто або за рахунок використання хронометричного обертання реостатного контролера, або за рахунок коригування уставки струму якорів для кожної наступної ступені ослаблення поля, причому в останньому випадку корекція уставки реле прискорення може бути виконана як виходячи з підтримки постійної і однакової сили тяги обох вагонів, так і виходячи з підтримки постійної сили тяги обох вагонів, тобто середньої сили тяги секції. Очевидно, що в першому випадку ступені ослаблення поля обох вагонів повинні включатися одночасно, що зменшує число ступенів регулювання сили тяги вдвічі. Це небажано через істотне збільшення коливань сили тяги. Крім того, це вимагає і зміни закладеного в САУ алгоритму управління з почерговим включенням ослаблення поля на обох вагонах, хоча при використанні цього алгоритму в режимах включення на вагонах сплотки різних ступенів ослаблення поля їх сили тяги відрізняються внаслідок рівності струмів якорів тягових машин. Тому цей

варіант в роботі не розглядається.

У режимі рекуперативного гальмування усунення падіння гальмівної сили на послідовному угрупованню тягових машин також може бути досягнуто двома способами:

- включенням чергової сходинки баластного резистора після перегруповання тягових машин під контролем реле прискорення і гальмування при збереженні максимального струму збудження;
- при збереженні хронометричного обертання реостатного контролера після перегруповання тягових машин і, отже, зі зменшенням струму збудження, але зі збільшенням уставки струму в міру зниження швидкості руху.

Перший спосіб має два суттєвих недоліка: збільшення втрат енергії в баластних резисторах і, головне, навантаження вже переобтяженого електромашинного перетворювача і інших пристроїв системи живлення обмоток збудження. Тому цей варіант не розглядається, тому що його використання при збереженні штатного електромашинного перетворювача неможливо.

Отримані тягові характеристики для всіх зазначених вище випадків наведені на рисунку 3.3. Для знову отриманих характеристик були побудовані криві руху рисунок 3.4 і по ним зроблено розрахунок витрати енергії.

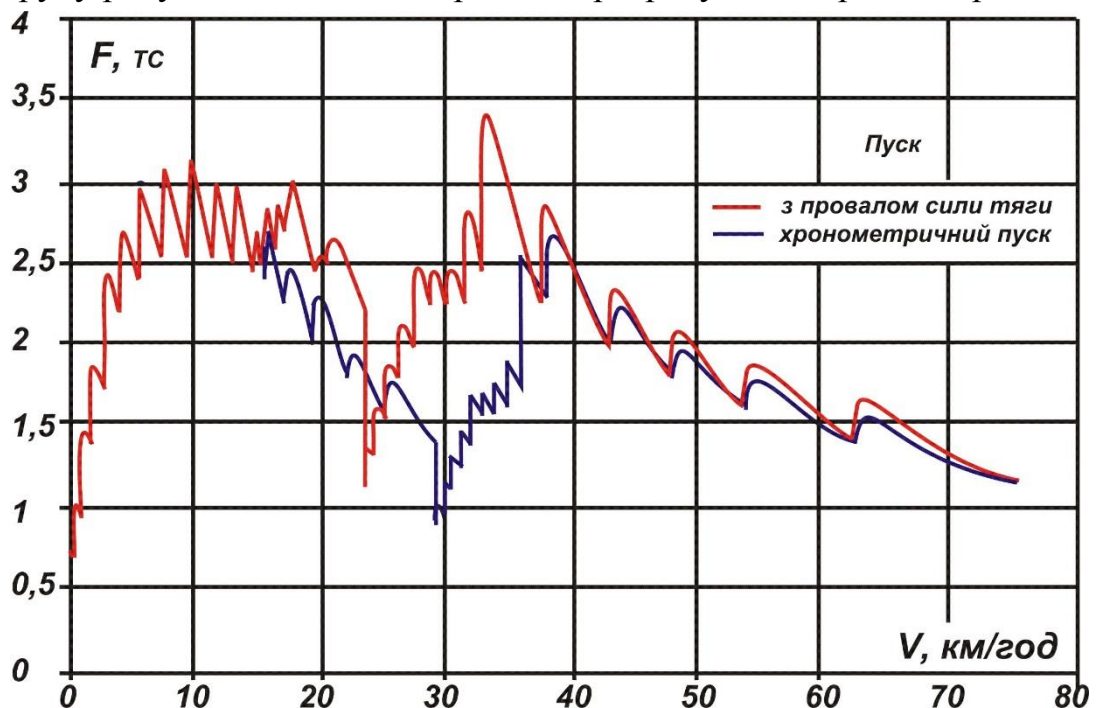


Рисунок 3.3 – Провали сили тяги

Отримані дані зведені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 - Усунення провалів сил тяги та гальмування

|   | Пуск з провалом сили тяги | Розрахунок уставки струму якоря в режимі тяги виходячи з постійності середньої для двох вагонів сили тяги | Застосування хронометричного виведення ступенів ослаблення поля в режимі тяги | Розрахунок уставки струму якоря в режимі тяги виходячи з постійності середньої для двох вагонів сили тяги. |
|---|---------------------------|---|---|--|
| Споживання енергії, Вт*год                            | 16793,053                 | 16185,060   | 16284,462   | 16098,272  |
| Повернення енергія, Вт*год                            | 5366,311                  | 5117,163  | 5079,164  | 4951,454   |
| Реостатні втрати, Вт*год                              | 836,299                   | 938,330   | 1080,584  | 938,330  |
| Втрати в баластному резисторі, Вт*год                 | 2306,007                  | 2306,007  | 2306,007  | 2378,827   |
| Втрати в обмотках двигуна при тязі, Вт*год            | 466,671                   | 464,462   | 317,884   | 462,743  |
| Втрати в обмотках двигуна при гальмуванні, Вт*год     | 113,050                   | 110,361   | 109,950   | 113,105  |
| Швидкість переходу на вибіг, км/год                   | 69,805                    | 69,148  | 69,852  | 68,952   |
| Швидкість початку гальмування, км/год                 | 57,005                    | 56,148  | 55,923  | 55,760   |
| Підсумковий витрата енергії з урахуванням рекуперації | 11426,742                 | 11067,897   | 11205,298   | 11146,818  |
| (+)/(-) витрати енергії, Вт*год                       |                           | -358,845  | -221,444  | -279,924   |
| (+)/(-) витрати енергії, %                            |                           | -3,140  | -1,938  | -2,450   |

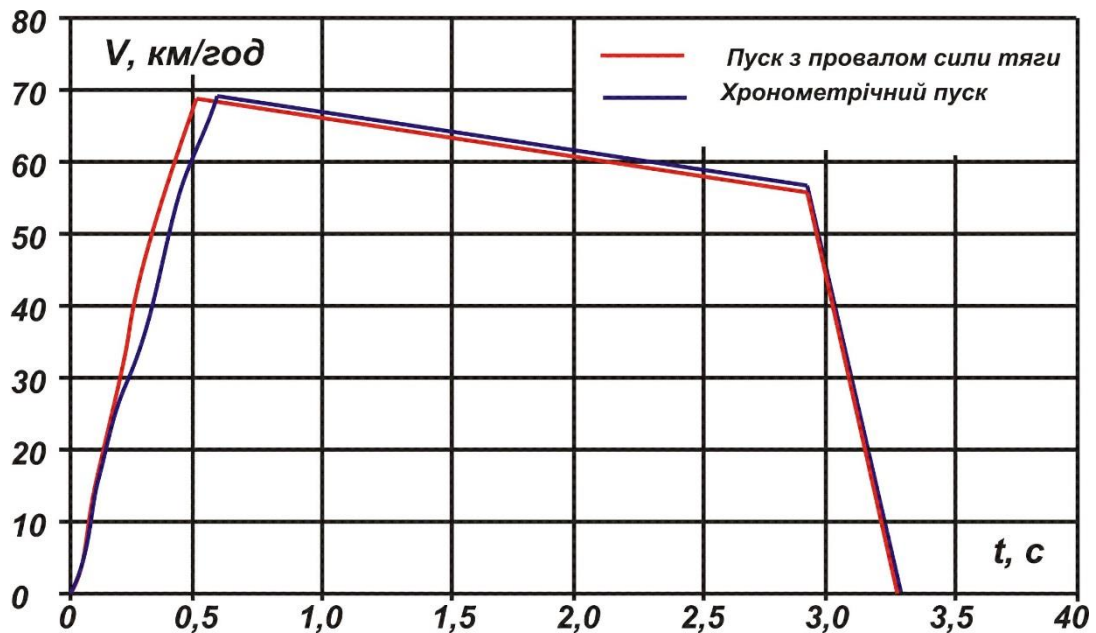


Рисунок 3.4 – Криві руху при пуску з провалом сили тяги

У таблиці 3.1 наведені дані щодо кількості споживаної енергії в режимі тяги і підлягає поверненню енергії в режимі рекуперації, втрат в пуско-гальмівних реостатах і обмотках двигуна на сплотку. Втрати в пуско-гальмівних реостатах в режимі тяги розраховувалися як сума втрат при послідовному і паралельному з'єднанні ТМ і в режимі рекуперативного-реостатного гальмування як сума втрат при послідовному з'єднанні ТМ. Втрати в обмотках двигуна розраховувалися як сума втрат при послідовному і паралельному з'єднанні для режимів тяги і рекуперативного-реостатного гальмування.

Як видно з таблиці 3.1 найбільш вигідним за енергетичними показниками способом підтримки сили тяги постійної є спосіб, коли уставка струму якоря розраховується виходячи з постійності середньої сили тяги сплотки, при цьому економія енергії становить 3,14% у порівнянні з існуючим ЕП, зменшуються втрати в обмотках двигуна в режимах тяги і гальмування, поліпшується динаміка електропоїзда. Тому цей спосіб регулювання сили тяги був обраний в якості оптимального. Швидкісні та тягові характеристики для цього способу наведені на рисунку 3.5 і 3.6 відповідно.

Для оптимального алгоритму управління в режимі тяги і знову отриманого алгоритму управління в режимі гальмування були побудовані криві руху і проведений розрахунок витрати енергії (таблиця 3.1). При використанні даного алгоритму управління ЕП економія енергії становить 2,5%, одночасно поліпшується динаміка поїзда.

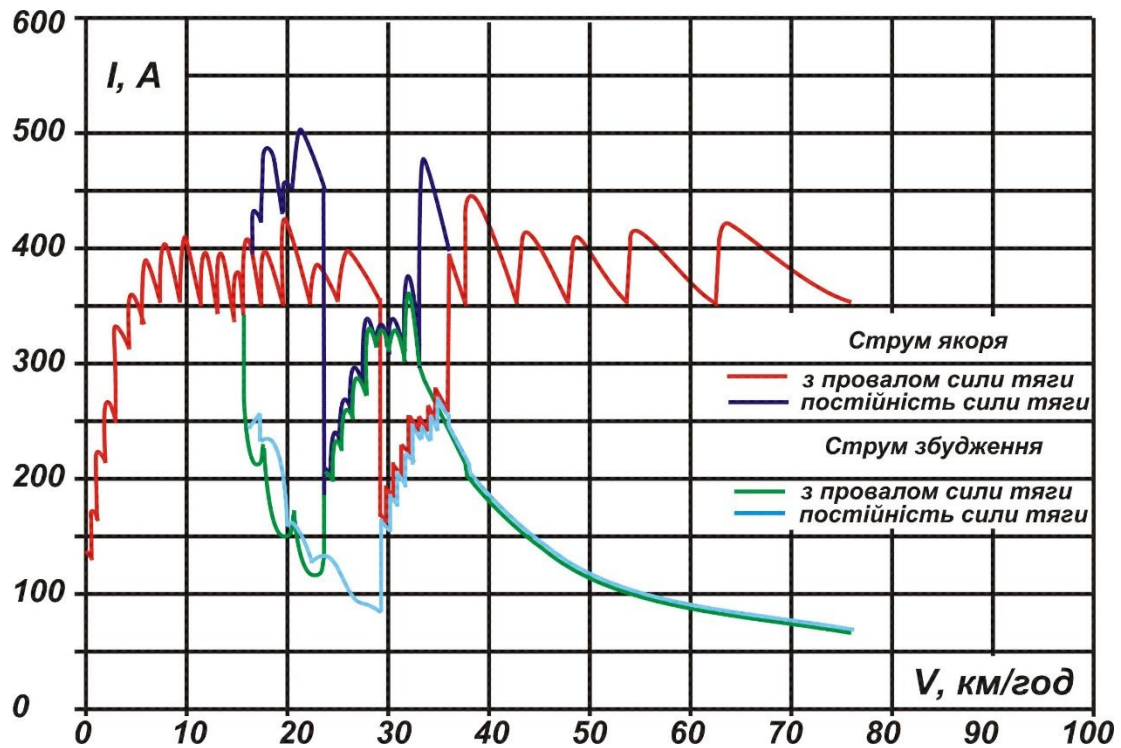


Рисунок3.5 - Усунення провалів сили тяги і гальмування, залежність  $I(V)$

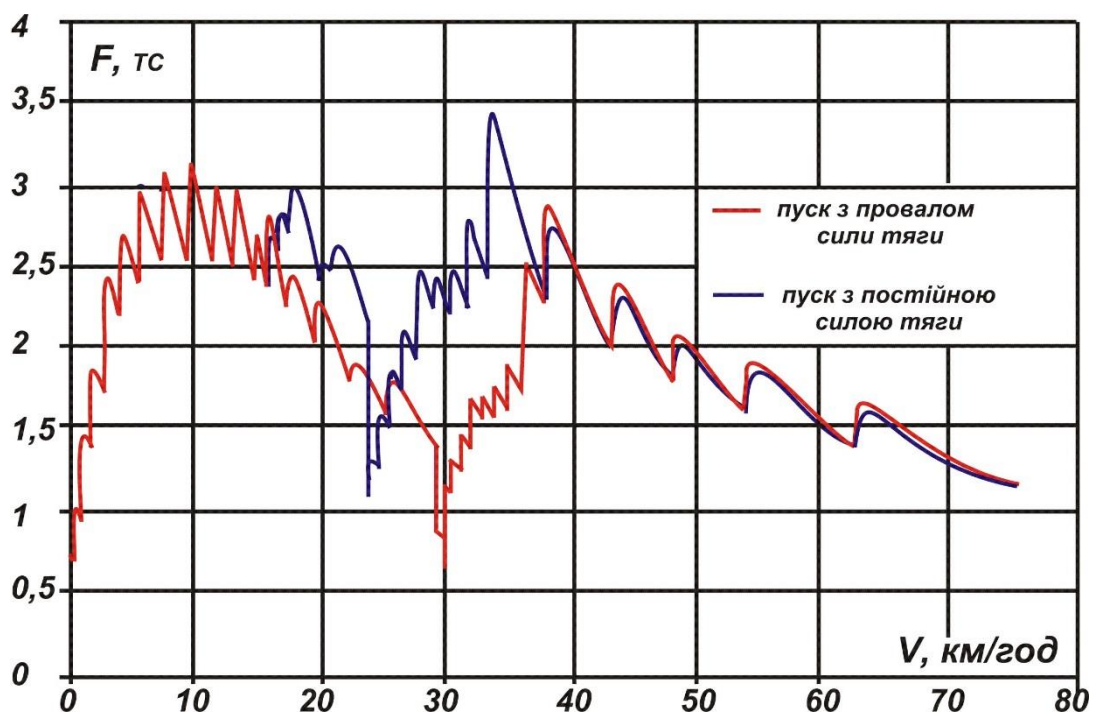


Рисунок3.6 - Усунення провалів сили тяги і гальмування, залежність  $F(V)$

### 3.2 Зменшення часу спрацьовування реостатно контролера

При прийнятому на серійних електропоїздах і на поїзді з ЕС ТЕП обмеження частоти обертання реостатного контролера величиною 0,5 с/позицію значна частина споживаної поїздом енергії витрачатися в пускових реостатах в режимі тяги і в баластній резисторі в режимі гальмування. В роботі оцінена енергетична ефективність скорочення часу перемикання



позицій РК при його хронометричних обертанні.

У магістерській роботі розглядалися випадки, коли в момент перегрупування тягових машин з послідовного на паралельне з'єднання в режимі тяги і з паралельного на послідовне з'єднання в режимі рекуперативного гальмування, а також в режимі реостатного гальмування час виведення реостатного контролера скорочувалася від 0,5 с до 0,1 с. Розрахунки зроблені для збільшення часу включення ступенів реостатного контролера на 0,1 с/позицію. Характеристики наведені на рисунках 3.7 і 3.8.

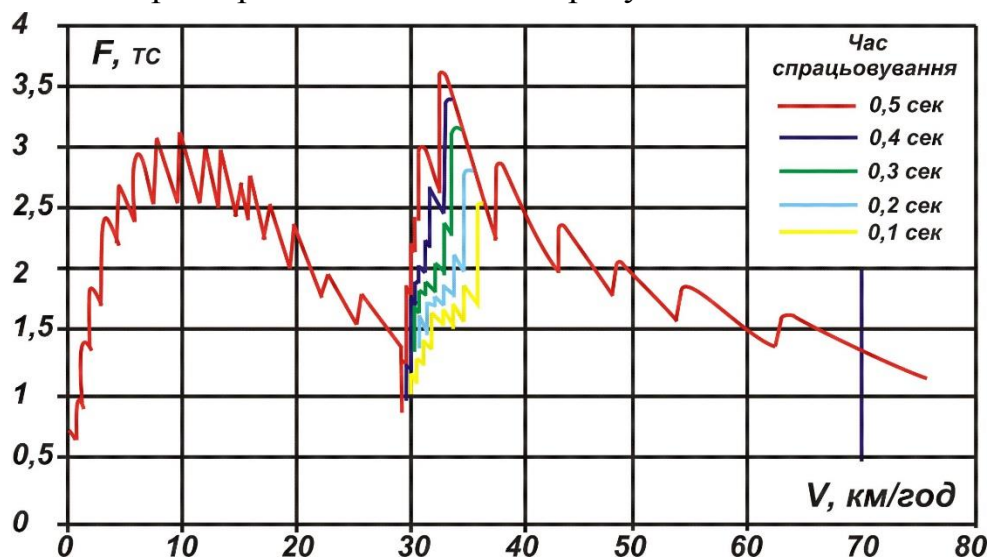


Рисунок 3.7 – Зменшення часу спрацьовування реостатного контролера, тягова характеристика

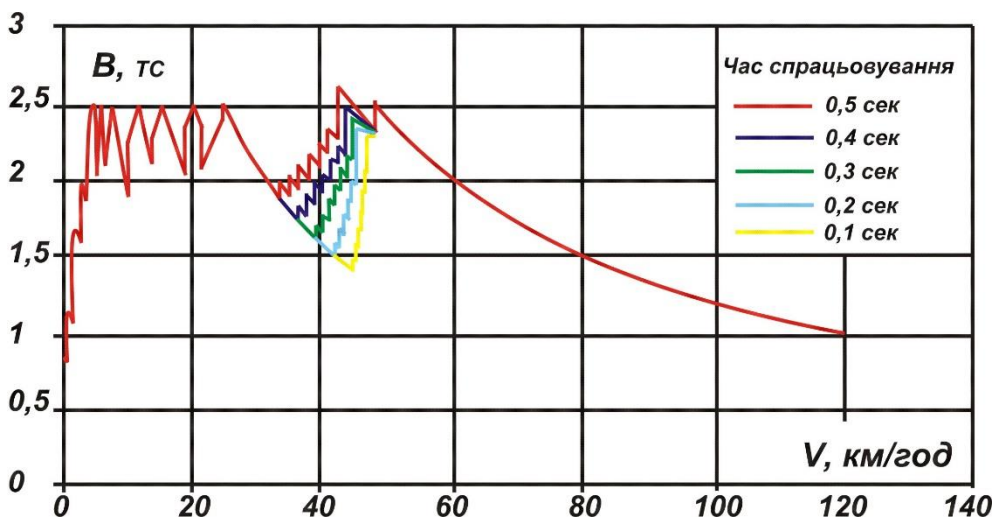


Рисунок 3.8 – Зменшення часу спрацьовування реостатного контролера, гальмівна характеристика

Для всіх випадків зроблено розрахунок кількості енергії (таблиця 3.2). У таблиці 3.2 дані для режимів тяги і рекуперативного-реостатного гальмування наведені з розрахунку на сплотку. Найбільш ефективним за енергетичними показниками виявився випадок, коли час перемикання ступені

реостатного контролера становив 0,1 с, витрата енергії зменшується на 10,8%. Однак в цьому випадку приріст прискорення перевищував допустимі межі і становив 0,75 м/с<sup>2</sup>.

Тому за оптимальний був прийнятий варіант, при якому ступені опору пускового реостата і баластного резистора виводилися через 0,2 с. Тягові і гальмівні характеристики наведені на рисунках 3.9 і 3.10. При цьому зменшуються втрати в пуско-гальмівних реостатах в режимах тяги і гальмування. Також зменшується кількість споживаної енергії і збільшується повернення енергії в мережу, економія енергії в даному випадку склала 8,9%.

Таблиця 3.2 - Зменшення часу спрацьовування реостатного контролера

|  | Час спрацьовування реостатного контролера. |           |           |           |           |            |
|--|--|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
|  | 0,5 сек                                    | 0,4 сек   | 0,3 сек   | 0,2 сек   | 0,1 сек   | 0,2 сек*   |
| Споживання енергії, Вт*год                           | 16793,053                                  | 16255,773 | 16203,137 | 16157,266 | 16103,969 | 15943,391  |
| Повертання енергія, Вт*год                           | 5366,311                                   | 5454,672  | 5592,907  | 5750,216  | 5913,635  | • 5313,390 |
| Реостатні втрати, Вт*год                             | 836,299                                    | 782,199   | 746,800   | 708,783   | 671,116   | 834,509    |
| Втрати в баластному резисторі, Вт*год                | 2306,007                                   | 2143,774  | 1968,276  | 1779,929  | 1580,860  | 1852,633   |
| Втрати в обмотках двигуна при тязі, Вт*год           | 466,671                                    | 456,929   | 460,560   | 465,198   | 466,559   | 468,416    |
| Втрати в обмотках двигуна при гальмуванні, Вт*год    | 113,050                                    | 114,261   | 115,973   | 117,855   | 119,765   | 125,031    |
| Приріст прискорення, м/с*3                           | 0,212                                      | 0,235     | 0,333     | 0,531     | 1,130     | 1,130      |
| Швидкість переходу на вибіг, км/год                  | 69,805                                     | 69,680    | 69,633    | 69,603    | 69,554    | 68,789     |
| Швидкість початку гальмування, км/год                | 57,005                                     | 56,760    | 56,733    | 56,702    | 56,654    | 55,589     |
| Підсумкова витрата енергії з урахуванням рекуперації | 11426,742                                  | 10801,102 | 10610,230 | 10407,051 | 10190,334 | 10630,001  |
| (+)/(-) витрати енергії, Вт*год                      |  | -625,640  | -816,512  | -1019,692 | -1236,408 | -796,741   |
| (+)/(-) витрати енергії, %                           |  | -5,475    | -7,146    | -8,924    | -10,820   | -6,973     |

\* - уставка струму якоря виходячи з постійності сил тяги та гальмування



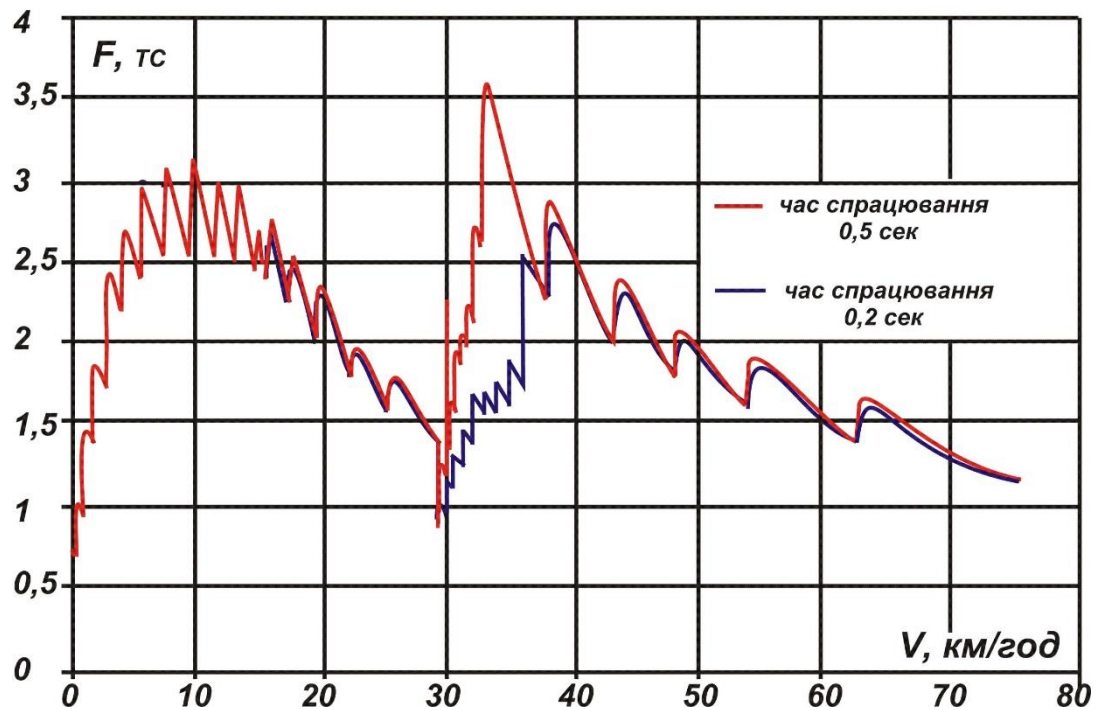


Рисунок 3.9 - Зменшення часу спрацювання реостатного контролера в режимі тяги. Залежність  $F(V)$

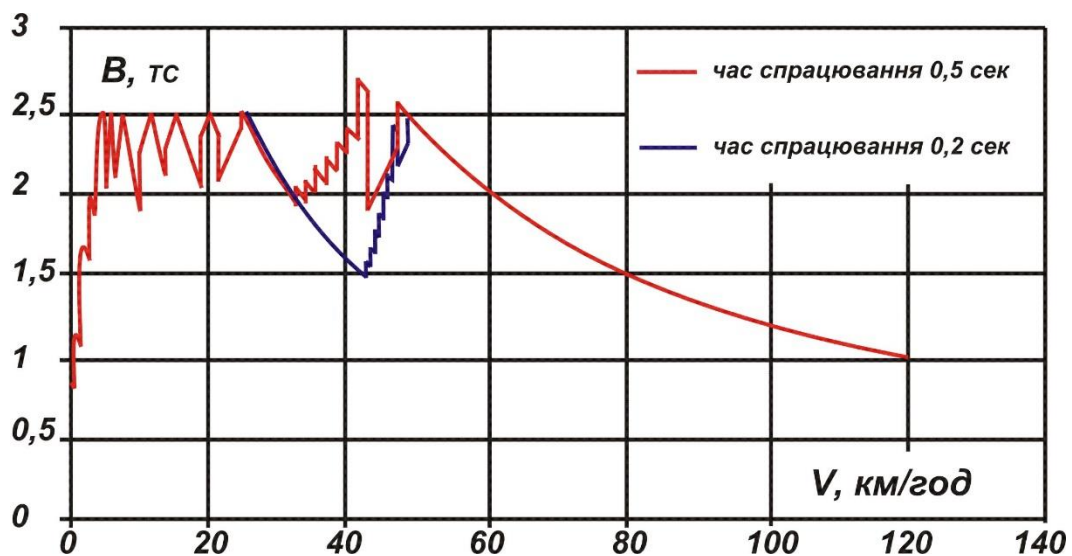


Рисунок 3.10 - Зменшення часу спрацювання реостатного контролера в режимі тяги. Залежність  $B(V)$

Далі була оцінена ефективність удосконалення системи тягового електроприводу за рахунок усунення провалу сили тяги і одночасного зменшення часу спрацювання реостатного контролера. Дані по розрахунку зведені в таблицю 3.2, тягові і гальмівні характеристики для режимів тяги і гальмування наведені на рисунках 3.11 і 3.12. Аналізуючи дані таблиці 3.2 можна зробити висновок, що збільшення уставки струму якоря і одночасне зменшення часу спрацювання реостатного контролера дозволяють не тільки поліпшити динаміку електропоїзди, а і домогтися скорочення витрати енергії на 7%, а також зменшення втрат в баластному резисторі на 19,7%. Втрати в

пусковому реостаті зменшуються незначно через збільшення струму якоря.

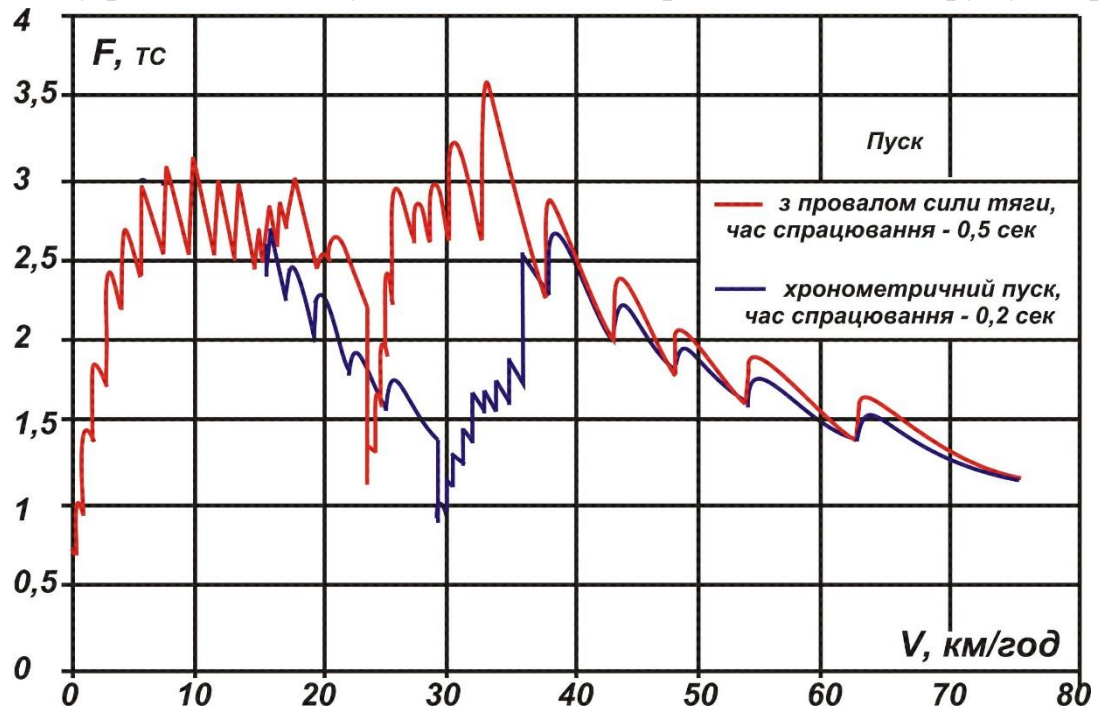


Рисунок 3.11 - Усунення провалів сил тяги та гальмування. Зменшення часу спрацювання реостатного контролера в режимі тяги. Залежність  $F(V)$

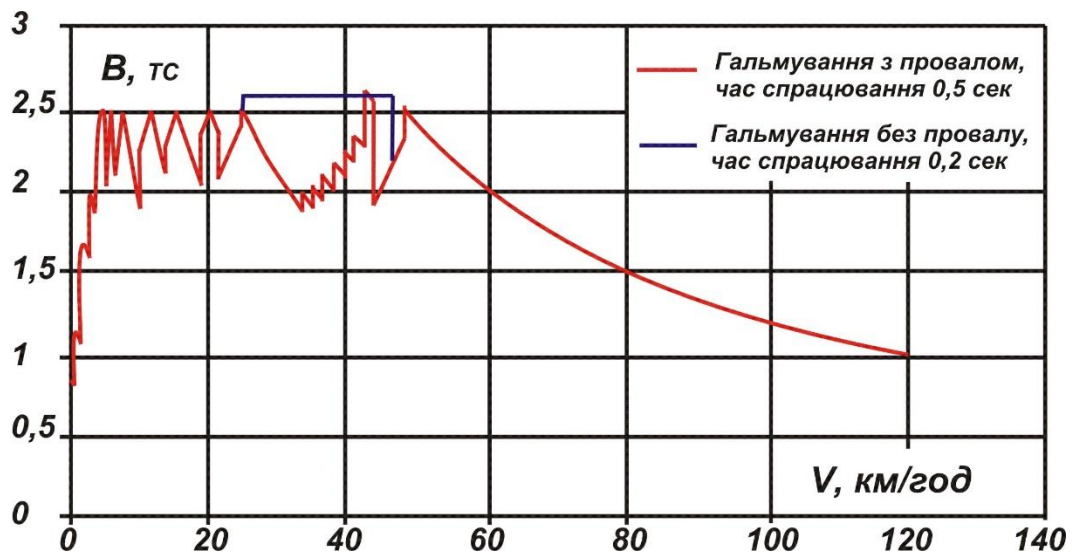


Рисунок 3.12 - Усунення провалів сил тяги та гальмування. Зменшення часу спрацювання реостатного контролера в режимі гальмування. Залежність  $B(V)$

### 3.3 Раціоналізація режимів руху по довгих перегонах

У викладених вище розділах досліджувалася енергетична ефективність використання різних алгоритмів управління тяговим електроприводом в режимі руху: одноразовий розгін до обумовленої графіком руху максимальної

швидкості з граничною силою тяги, вибіг і гальмування з найбільшою ефективністю. Такий режим руху використовується на відносно коротких перегонах. На довгих перегонах в більшості випадків його використання неможливо через необхідність для виконання графіка руху розгону до дуже великих швидкостей. Тому на таких перегонах використовується повторне, часто неодноразове, включення тяги. При цьому замість розгону поїзда до граничної швидкості руху реалізується так званий режим усередненої швидкості. Але електропоїзд з ЕС ТЕП має певну перевагу перед серійним і при реалізації цього алгоритму управління тяговим електроприводом. Ця обставина ілюструється таблицею 3.3 і рисунком 3.1, [2], з яких випливає, що на поїзді з ЕС ТЕП з'являється можливість підтримки рівномірної або близькою до неї швидкості руху при використанні роботи на 1-му положенні контролера машиніста (КМ1П).

Таблиця 3.3 - Режими роботи тягового електроприводу на позиціях контролера машиніста

| Тип електропоїзду | Маневрова позиція КМ  | I позиція КМ                                   | II позиція КМ                  | III позиція КМ                 | IV позиція КМ                   |
|-------------------|---|--|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| EP2C              | Посл. 8ТМ<br>+ R <sub>np</sub><br>(R <sub>np</sub> =21,066) | Посл. 8ТМ<br>+ОП<br>(β = 0,229)                | Посл. 4ТМ<br>+ОП<br>(β = 0,43) | Посл. 4ТМ<br>+ОП<br>(β = 0,28) | Посл. 4ТМ<br>+ОП<br>(β = 0,185) |
| EP2T              | Посл. 4ТМ<br>+ R <sub>np</sub><br>(R <sub>np</sub> = 10,37) | Посл. 4ТМ<br>(R <sub>np</sub> = 0),<br>(β = 1) | Посл. 4ТМ<br>+ОП<br>(β = 0,43) | Посл. 4ТМ<br>+ОП<br>(β = 0,28) | Посл. 4ТМ<br>+ОП<br>(β = 0,185) |

У таблиці 3.3 наведені реалізовані на серійних поїздах EP2T і на поїзді EP2C з ЕС ТЕП режими роботи тягового електроприводу на відповідних позиціях контролера машиніста (КМ). При русі по довгому перегону поїзд розганяється до певної швидкості на четвертій позиції, далі здійснюється перехід в режим вибігу. У певний момент часу відновляється тяга, але на серійному поїзді неминучі більші реостатні втрати і вище прискорення, а на поїзді з ЕС ТЕП на першій позиції контролера машиніста реостатні втрати малі і розгін на серієсному угрупованні тягових двигунів в режимі ослаблення поля відбувається менш інтенсивно, що дозволяє більш ефективно використовувати режим усередненої швидкості.

Для проведення розрахунків був обраний умовний перегін, довжина перегону - 7 км, час руху по перегону - 6 хв. У магістерській роботі розглядалися випадки, коли повторне підтягування включалося кілька разів (рисунок 3.13). Дані за розрахунками зведені в таблицю 3.4.

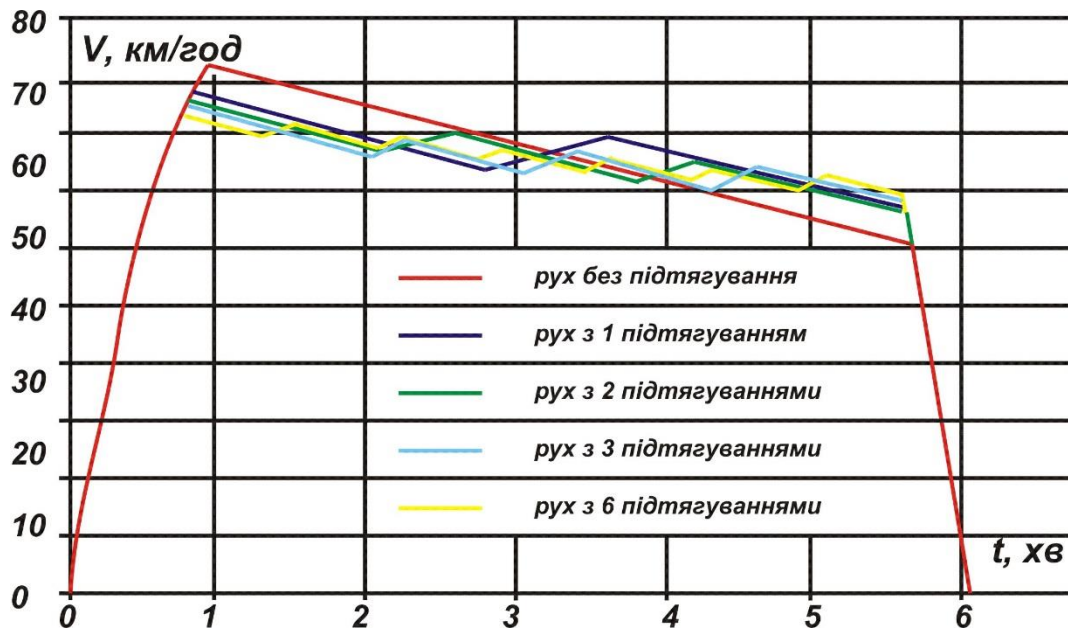


Рисунок 3.13 - Раціоналізація режимів руху по довгих перегонах

Таблиця 3.4 - Застосування повторних включень тяги

| Перегон, довжина перегону - 7 км, час руху по перегону - 6 хв. |                      |                   |                  |                  |                   |
|--|----------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Кількість підтягувань  | рух без підтягування | одне підтягування | два підтягування | три підтягування | шість підтягувань |
| Споживана енергія, Вт*год                                      | 28534,867            | 29829,960         | 29590,314        | 29798,68         | 30314,958         |
| Повернена енергія, Вт*год                                      | 6735,821             | 8334,803          | 8608,81          | 8550,256         | 8933,765          |
| Підсумкова витрата енергії з урахуванням рекуперації, Вт*год   | 21799,046            | 21495,157         | 20981,504        | 21248,424        | 21381.193         |
| (+)/(-) витрати енергії, Вт*год                                | -                    | -303,888          | -817.542         | -550,622         | -417,852          |
| (+)/(-) витрати енергії, (%)                                   | -                    | -1,394            | -3,75            | -2,526           | -1,917            |

З таблиці 3.4 видно, що в залежності від кількості підтягувань витрата енергії може знизитися в основному за рахунок збільшення повернення енергії в мережу. При застосуванні трьох підтягувань кількість енергії рекуперації збільшується на 70%. Тому, задаючись певною кількістю повторних включень тяги, можна домогтися зниження витрати енергії на довгих перегонах.

3.4 Оцінка можливості виключення з кола гальмівного струму індуктивності шунта

ВНДІЗТом встановлено [2], що «для розрахункового режиму руху теплові властивості індуктивних шунтів і трансформаторів збудження не відповідають умовам їх роботи в системі модернізованого тягового приводу». Розрахунковим режимом за класифікацією ВНДІЗТ вважається тривалий рух по ділянці з перегонами 3 км з технічною швидкістю 70 км/год. При реальних сьогоднішніх технічних швидкостях руху не більше 60 км/год ці елементи електрообладнання не перегріваються. Проте, проблема зниження їх теплового навантаження існує.

Підставою для припущення про можливість такого рішення є еволюція схеми силових кіл і, найголовніше, пристроїв регулювання струмів збудження тягових машин в режимі електричного гальмування.

На перших дослідних поїздах з РРТ, а також і на великій партії поїздів серії EP22, за аналогією з електровозами, живлення обмоток збудження тягових машин здійснювалося від генератора постійного струму, напруга якого регулювалося поступово шляхом зміни струму в його обмотці збудження за допомогою магнітного підсилювача при ступінчастому регулюванні струму в його обмотці управління. В результаті надзвичайно повільно діюча система регулювання струму збудження тягових машин практично не реагувала на коливання напруги в контактній мережі, які викликали значні зміни струму рекуперації. Для ослаблення дії цього недоліку були запропоновані і випробувані кілька технічних рішень, в тому числі і включення в коло гальмівного струму індуктивних шунтів, які виконували функції струмообмежуючих реакторів. Однак, всі ці заходи, включаючи і використання стабілізуючих трансформаторів, не забезпечили прийнятної якості регулювання струму рекуперації. Тому були виконані дослідження щодо вдосконалення системи регулювання струмів збудження тягових машин з метою підвищення її швидкодії.

Різке підвищення швидкодії системи регулювання струму збудження тягових машин на серійних електропоїздах з РРТ досягнуто за рахунок живлення обмоток збудження від генератора змінного струму через повністю керований випрямляч, зібраний по схемі Ларіонова. Додатковою перевагою такого збудника є можливість практично безінерційної зміни знаку прикладеної до обмоток збудження напруги, тобто його реверсування, що забезпечує примусове зменшення струму збудження при зменшенні напруги в контактній мережі. Ці дві обставини забезпечили різке поліпшення якості регулювання струму рекуперації як в сталих, так і в перехідних режимах, включаючи і режими стрибкоподібного зміни напруги в контактній мережі.

Різке поліпшення якості регулювання струму збудження тягових машин в режимі електричного гальмування дозволяє припустити можливість

виключення з кола гальмівного струму індуктивних шунтів.

Актуальність даної проблеми для ЕС ТЕП підвищується через збільшення по відношенню до серійних поїздів теплового навантаження індуктивних шунтів. Це обумовлено тим, що в схемах серійних поїздів індуктивні шунти закорочуються при перемиканні схеми в режим реостатного гальмування з самозбудженням, а в схемі ЕС ТЕП вони обтікають гальмівним струмом до кінця гальмування.

На електропоїздах з ЕС ТЕП також можна зменшити теплове навантаження індуктивних шунтів при переході схеми на послідовне з'єднання якорів 2-х вагонів, так як на послідовному угрупованні кидки струмів якорів при коливанні напруги в контактній мережі істотно менше, проте таке рішення дещо ускладнює схему силових кіл. Крім того, виключення з кола гальмівного струму індуктивних шунтів має три додаткових переваги: різко зменшується їх теплове навантаження по відношенню до наявного на серійних електропоїздах, зменшуються втрати енергії рекуперації і спрощується схема силових кіл вагона завдяки виключенню з неї комутуючої апаратури, необхідної для перемикання індуктивного шунта з кола резистора ослаблення поля в режимі тяги в коло гальмівного струму.

Очевидно, що критерієм ефективності використання в якості струмообмежувального реактора індуктивного шунта є досягнення при цьому зменшення приросту струму якорів при стрибкоподібному зменшенні напруги в контактній мережі.

Розрахунки перехідних процесів при скачках напруги в контактній мережі виконані з використанням схеми заміщення тягової машини, наведеної на рисунку 3.14. Додатковим елементом є тільки індуктивності струмообмежувального реактора  $L_{т0}$ , в якості якого використовується індуктивний шунт. За даними технічної документації РЕЗ в розрахунках використовується  $L_{т0} = 40$  мГн, хоча ця індуктивність реально залежить як від величини струму в ній, так і від швидкості його зміни. Індуктивність кожній тяговій машини складається з індуктивності якоря  $L_a$  і індуктивності додаткових полюсів  $L_{дп}$ . Ці величини також приймалися постійними і рівними  $L_a = 5,51$  мГн  $L_{дп} = 1,74$  мГн.

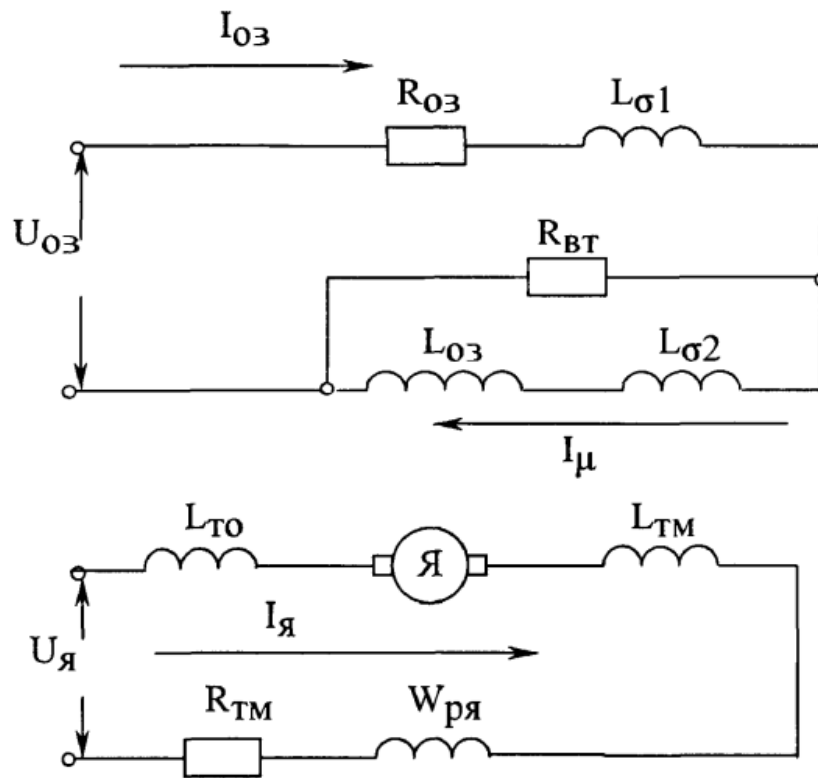


Рисунок 3.14 - Схема заміщення тягової машини для розрахунку перехідних процесів при скачках напруги в контактній мережі при незалежному збудженні тягових машин.

За схемою заміщення складаємо систему диференціальних рівнянь для розрахунку перехідних процесів:

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \frac{U}{n} + L_{TM} \cdot \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + R_{TM} \cdot I_{\text{я}} + L_{TO} \cdot \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + R_{TO} \cdot I_{\text{я}}, \\ U_B = L_{\sigma 1} \cdot \frac{dI_3}{dt} + R_{O3} \cdot I_3 + R_{BT} \cdot I_{BT} \\ F_H = I_{\mu} W_{O3} - I_{\text{я}} W_{\text{ря}}, \\ \Phi = f(F_H), \\ I_3 = I_{\mu} + I_{BT}, \\ I_{\text{я}} = I_3 + I_{\text{ш}}, \\ R_{BT} \cdot I_{BT} = L_{O3} \cdot \frac{dI_{\mu}}{dt}, \end{array} \right.$$

(3.1)

Перетворимо цю систему до виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = \frac{E - \frac{U}{n} - R_{\text{тм}} \cdot I_{\text{я}} - R_{\text{то}} \cdot I_{\text{я}}}{L_{\text{тм}} + L_{\text{то}}}, \\ \frac{dI_{\text{з}}}{dt} = \frac{U_{\text{з}} - R_{\text{оз}} \cdot I_{\text{з}} - R_{\text{вт}} \cdot I_{\text{вт}}}{L_{\text{ол}}}, \\ F_{\text{н}} = I_{\mu} W_{\text{оз}} - I_{\text{я}} W_{\text{рл}}, \\ \Phi = f(F_{\text{н}}), \\ I_{\text{з}} = I_{\mu} + I_{\text{вт}}, \\ I_{\text{я}} = I_{\text{з}} + I_{\text{ш}}, \\ R_{\text{вт}} \cdot I_{\text{вт}} = L_{\text{оз}} \cdot \frac{dI_{\mu}}{dt} \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Розрахунок проводиться для випадків паралельного і послідовного з'єднання груп тягових машин при різних швидкостях руху. У розрахунках використано припущення, що реверс напруги збудника відбувається миттєво під впливом негативного зворотного зв'язку по струму якоря на початку перехідного процесу. Розрахунки виконані для стрибкоподібного зменшення напруги в контактній мережі (рисунок 3.14) на 20%, тобто на 700 В від початкової напруги 3,5 кВ для варіантів з наявністю і відсутністю в колі рекуперативного струму індуктивного шунта в режимах послідовного з'єднання ТМ двох вагонів і їх індивідуальної роботи (паралельне з'єднання) при різних швидкостях руху з використанням реверсу прикладеного до обмоток збудження напруги  $U_{\text{оз}}$  і при його сталості. В режимах з використанням реверсу робилося припущення про миттєву зміну  $U_{\text{оз}}$ .

Очевидно, що найбільш важкі перехідні процеси повинні бути на паралельній угрупованню ТМ, тобто при індивідуальній роботі моторних вагонів сплотки. На рисунку 3.15 наведені результати розрахунку зміни струму рекуперації при стрибку напруги вниз на 700 В на паралельному угрупованні ТМ при швидкості руху 80 км/год в припущенні, що струм збудження в перехідному процесі залишається постійним (реверс напруги збудника не проводиться).

Отримані дані показують, що виключення з кола гальмівного струму індуктивного шунта призводить до збільшення струму якорів в процесі його наростання в межах 30% і до збільшення максимального значення струму на 20%.



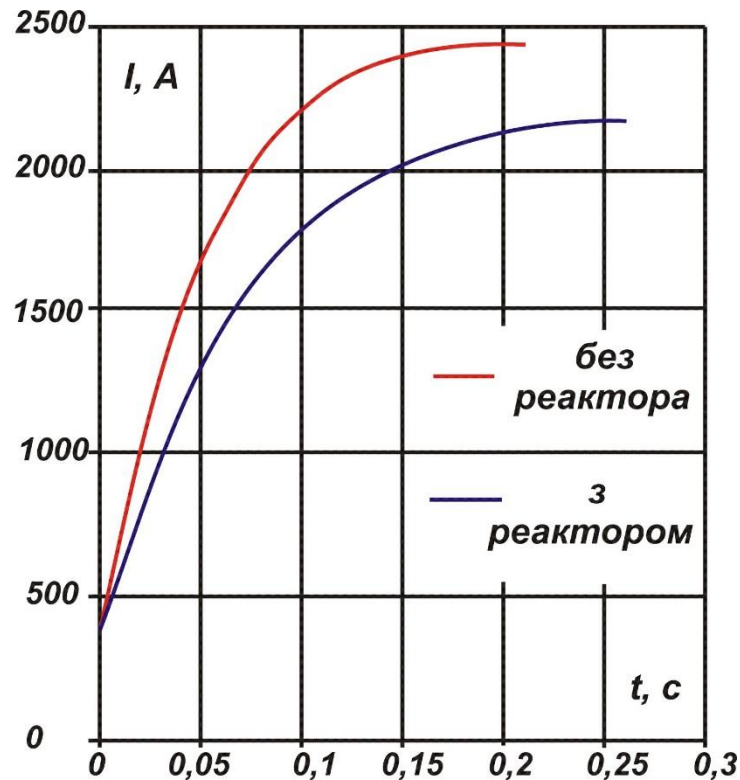


Рисунок 3.15 - Перехідний процес при стрибку напруги в контактній мережі в режимі рекуперації. Паралельне з'єднання груп ТМ,  $V = 80$  км/год. Реверс напруги збуджувача не проводиться.

З наведених на рисунку 3.16 характеристик, розрахованих для тих же умов, що й криві на рисунку 3.15, але в припущенні, що напруга збудника миттєво змінює знак і потім підтримується постійною, слідує, що використання реверсування напруги збудника трохи зменшує похідну зростання струму якорів в початковій стадії перехідного процесу і істотно знижує максимальне значення струму. Тому застосування реверсування напруги збудника безумовно корисно і цей канал системи регулювання струму рекуперації слід удосконалювати. Вплив на похідну гальмівного струму виключення з його кола індуктивного шунта залишається практично незмінним.

Отримані розрахункові результати показують, що як при відсутності, так і при наявності в колі гальмівного струму індуктивного шунта струм якорів при стрибку напруги вниз в режимі рекуперації перевищує уставку контактора КЗ. Відомо, що час його спрацьовування становить близько 15 мс, причому він реагує як на величину, так і на похідну струму. Реально час спрацьовування КЗ буде дещо більшим, але навіть при відсутності індуктивного шунта струм якорів не перевищить «нормативну величину струму», яка складає 1500 А і вважається безпечною для ТМ [2].

Таким чином, за умовами обмеження збільшень струму при скачках напруги в контактній мережі в режимі рекуперації можна вважати допустимим

виключення індуктивного шунта з кола гальмівного струму. Теоретично і експериментально слід перевірити вплив такого заходу на якість регулювання струмів якорів в сталих режимах, тобто на стійкість системи автоматичного управління.

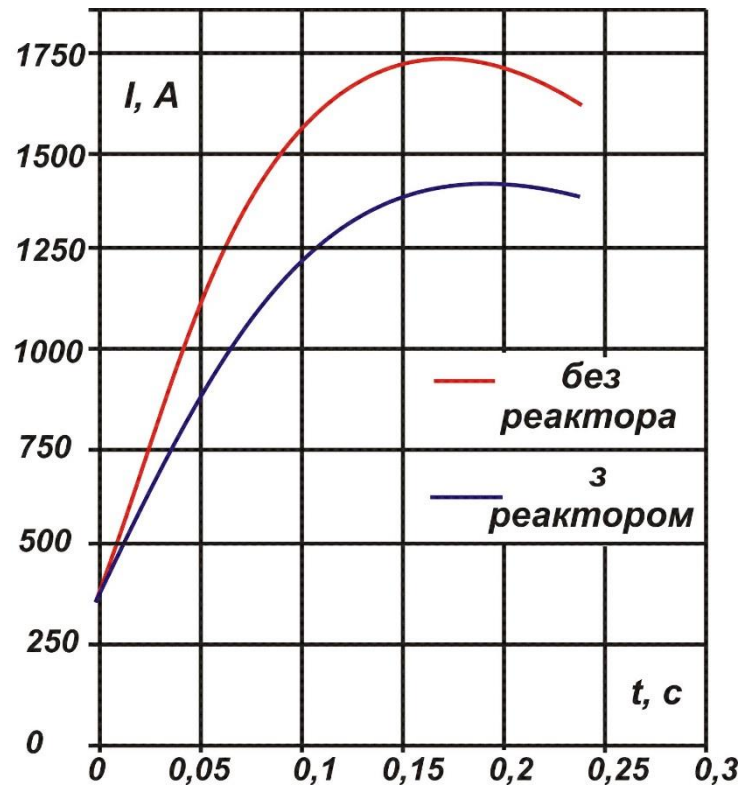


Рисунок 3.17 - Перехідний процес при стрибку напруги контактної мережі в режимі рекуперації. Паралельне з'єднання ТМ,  $V = 80$  км/год. форсування збудження здійснюється.

### Висновки до третього розділу

1 Усунення провалів сил тяги та гальмування технічно досягається за рахунок регулювання уставки струму якорів при послідовному з'єднанні тягових машин сплотки в режимі тяги в процесі ослаблення поля, а в режимі рекуперації - при виключенні баластного резистора. ці заходи покращують динаміку поїзда і знижують витрату енергії орієнтовно на 2.5%

2 Додаткове зниження витрата енергії дає зменшення часу перемикання однієї позиції реостатного контролера при його хронометричних обертанні з 0,5 до 0,2 с. Разом з усуненням провалів сил тяги та гальмування загальна економія витрат енергії становить близько 7%.

3. Використання при повторних включеннях тяги при русі по довгих перегонах роботи тягового приводу на послідовній угрупованню з ослабленням поля дозволяє наблизитися до реалізації руху з усередненою, швидкістю і отримати додаткову економію витрат енергії.

4. При виключенні з кола гальмівного струму індуктивного шунта

збільшення струму при коливаннях напруги контактної мережі в режимі рекуперативного гальмування не перевищують нормативного значення. Це дозволяє припустити, що індуктивний шунт можна не включати в коло якорів в режимі рекуперативного гальмування.

## ВИСНОВКИ

У виконаному дослідженні можливості та ефективності вдосконалення і підвищення енергетичної ефективності енергозберігаючої системи тягового електроприводу електропоїздів постійного струму отримані наступні основні результати.

1 Показано, що традиційні методики розрахунку пуско-гальмівних діаграм дають суттєві відхилення від реальних, що може привести до неточного визначення ефективності запропонованих технічних рішень щодо поліпшення тягово-енергетичних показників електропоїздів. Запропонована методика дозволяє розрахувати витрати енергії поїздом з похибкою близько 2%, що цілком достатньо для практичного використання.

2 Показана можливість істотного, до 7%, зниження витрати енергії електропоїздом з енергозберігаючою системою тягового електроприводу за рахунок усунення зниження сил тяги та гальмування в процесі перегруповань тягових машин і прискорення хронометричного обертання реостатного контролера.

3 Підтверджено можливість деякого додаткового скорочення витрат енергії при русі по довгих перегонах в режимі усередненої швидкості при використанні наявної в енергозберігаючій системі тягового електроприводу можливості застосування повторних включень тяги тільки послідовною угруповання тягових машин.

4 Показана можливість виключення з кола струму рекуперації струмообмежувального реактора, в якості якого використовується індуктивний шунт і, отже, зниження його теплового навантаження і спрощення схеми силових кіл і електрообладнання електропоїздів.

Використання обґрунтованих в магістерській роботі технічних рішень дозволить істотно поліпшувати техніко-економічні показники електропоїздів за рахунок підвищення їх тягово-енергетичних властивостей без ускладнення і навіть при спрощення електрообладнання.