МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Факультет ***"Транспортна інженерія"***

Кафедра "***Локомотиви***"

"ДО ЗАХИСТУ"
Зав.кафедрою _____ Борис БОДНАР
"11" 01 2024 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи ***магістра***

на тему: **"Зменшення витрат енергоресурсів на тягу електропоїздів"**

за освітньою програмою: ***"Локомотиви та локомотивне господарство"***
зі спеціальності ***273 "Залізничний транспорт"***
галузі знань ***27 "Транспорт"***

Виконав: студент групи ***ДГ2221***
_____ Олександр КРАВЦОВ
Керівник _____ Дмитро БОБИРЬ
Нормоконтролер _____ Людмила КОЛОДІЙ

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Дніпро, 2024

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

Faculty "***Transport engineering"***

Department "***Locomotives"***

Explanatory Note
to Master's Thesis

master

on the topic: **"Reducing energy consumption for electric train traction"**

according to educational curriculum: ***"Locomotives and Locomotive Economy"***
in the Speciality ***273 "Railway transport"***
Branch of knowledge ***27 "Transport"***

Done by the student of the group *LG2221*:
Olexander KRAVTSOV
Scientific Supervisor: Dmytro BOBYR
Normative controller: Liudmyla KOLODII

Dnipro, 2024

Український державний університет науки і технологій

Факультет «***Транспортна інженерія»***, кафедра ***«Локомотиви»***

Спеціальність ***273 «Залізничний транспорт»***

за ОП ***«Локомотиви та локомотивне господарство»***

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри «Локомотиви»
_____ Борис БОДНАР
«____» _____ 2024 р.

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу на здобуття ОС ***«магістр»***

студенту групи ***ЛГ2221***

Кравцову Олександру Андрійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: **«Зменшення витрат енергоресурсів на тягу електропоїздів»**

затверджена наказом від «**17» січня 2023 р № 33ст**

2. Термін подання студентом закінченої роботи «**12» січня 2024 р**

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: серія е.р.с. ЕР2Т; повздовжній план ділянки обороту; профіль колії; довжина ділянки Н-З 83 км, Н-К 107 км, ділянкова швидкість у парному напрямку 36 км/год, у непарному – 34 км/год, кількість пар поїздів 5.

4. Перелік креслень (демонстративного матеріалу)

1) Моделі руху поїздів
2) Аналіз впливу режимів ведення на швидкість руху та витрату електроенергії
3) Моделювання характеристик електропоїзда

4) Апаратно-програмний комплекс з визначення раціональних режимів ведення
5) Компонування пристроїв АПК у високовольтній шафі та фрагменти режимної карти
6) Показники роботи депо на заданій ділянці

5. Перелік питань до розробки та термін виконання

Назва розділу кваліфікаційної роботи	Термін виконання	Обсяг розділу, %
Аналіз існуючих робіт та розробок, спрямованих на зменшення витрат енергоресурсів на тягу поїздів	28.11.2023	30
Розробка математичної моделі поїзда у приміському русі	19.12.2023	30
Розрахунок раціональних режимів руху електропоїзда за допомогою апаратно-програмного комплексу. Розрахунок показників роботи депо	09.01.2024	40

Студент _____ Олександр КРАВЦОВ

Керівник роботи _____ Дмитро БОБИРЬ

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота складається з чотирьох розділів на 86 сторінках, налічує 32 ілюстрації, 5 таблиць та 16 літературних джерел.

Об’єктом дослідження у кваліфікаційній роботі є процес переміщення приміського поїзда по тяговим ділянкам, а предметом – режим ведення приміського електропоїзда.

Метою роботи е зниження витрат електроенергії на тягу приміських поїздів за рахунок вибору раціональних режимів їх ведення.

На підставі вимог сформована і адаптована для проведення тягово-оптимізаційних розрахунків математична модель руху поїзда по ділянці, яка враховує рівень напруги в контактній мережі, виконано її дослідження в режимі тяги, холостого ходу, пневматичного і рекуперативного гальмування.

Встановлено, що найбільш компактно інформація про характеристики е.р.с. може бути представлена у формі сімейства залежностей магнітного потоку від струму якоря для всіх ступенів ослаблення збудження, апроксимованих поліномом п’ятого ступеня.

Визначення раціональних режимів ведення приміських поїздів виконано за допомогою апаратно-програмного комплексу. Встановлено, що економія енергоресурсів за поїздку в результаті використання рекомендацій відносно режимів ведення поїзда сформованих апаратно-програмним комплексом може складати від чотирьох до десяти відсотків в залежності від часу хода поїзда та характеристик ділянки.

Результати роботи можуть бути застосовані при експлуатації електропоїздів.

Ключові слова: ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ЛОКОМОТИВІВ, ПРИМІСЬКІЙ РУХ, ЕЛЕКТРОПОЇЗД, ВИТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, РАЦІОНАЛЬНІ РЕЖИМИ ВЕДЕННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП 6
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РОБІТ ТА РОЗРОБОК, СПРЯМОВАНИХ НА ЗМЕНШЕННЯ ВИТРАТ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ НА ТЯГУ ПОЇЗДІВ 8
1.1 Аналіз робіт та стану проблеми оптимальних тягових розрахунків на вітчизняних і зарубіжних залізницях 8
1.2 Постановка завдання вибору раціональних режимів ведення 18
2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПОЇЗДА У ПРИМІСЬКОМУ РУСІ 20
2.1 Вимоги до моделі руху поїзда і її узагальнена характеристика 20
2.2 Особливості режимів ведення поїздів у приміському русі 22
2.3 Математична модель руху поїзда для тягових розрахунків 34
2.4 Математичний опис характеристик електропоїзда 40
3 РОЗРАХУНОК РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РУХУ ЕЛЕКТРОПОЇЗДА ЗА ДОПОМОГОЮ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ 51
3.1 Передумови впровадження раціональних режимів ведення 51
3.2 Узагальнена структура та короткий опис апаратно-програмного комплексу по розрахунку раціональних режимів ведення 51
3.3 Визначення раціональних режимів ведення для заданої ділянки 61
4 РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ДЕПО Н НА ДІЛЯНЦІ З-Н-К 62
4.1 Розташування пунктів технічного обслуговування ТО-2 електропоїздів 62
4.2 Розташування проміжних пунктів зміни локомотивних бригад 63
4.3 Складання розкладу та побудова графіка руху поїздів на ділянці обороту 64
4.4 Складання розрахункових відомостей роботи електропоїздів на ділянках 65
4.5 Розробка графіка обороту та визначення кількості поїзних електропоїздів для заданих розмірів руху 67
ВИСНОВКИ 81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 85

					0032.190086.000.01КР.ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Коцюба			Зменшення витрат енергоресурсів на тягу електропоїздів	Літ.	Аркуш 5 / Аркушів 86
Перевір.		Бобирь					
Реценз.						УДУНТ, гр. ЛГ2221	
Н. Контр.		Колодій					
Затверд.							

ВСТУП

У даний час економічний стан в Україні вимагає підвищення ефективності роботи всіх галузей народного господарства і, в тому числі, залізничного транспорту. В ринкових умовах роботи питання зниження експлуатаційних витрат набувають особливого значення. Виконуючи більше половини загальнотранспортного обсягу перенізної роботи, залізничний транспорт споживає близько 15% енергоресурсів, що використовуються усіма видами транспорту. Значну частину експлуатаційних витрат залізниць складають витрати на електроенергію – близько 5 млрд кВт·год на рік, з них 4,5 млрд кВт·год на рік на електротягу. У приміському русі витрати енергоресурсів на тягу складають від 36 до 51% експлуатаційних витрат [1]. Ці дані кількісно підтверджують, що витрати електроенергії на здійснення транспортних послуг є одним з основних показників ефективності роботи транспорту в цілому.

У зв'язку з постійним зростанням вартості електроенергії, а також введенням диференційованих тарифів оплати електроенергії, АТ «Укрзалізниця» прийняла і затвердила «Програму енергозбереження на залізничному транспорті України». Програма визначила завдання залізницям щодо скорочення споживання паливно-енергетичних ресурсів на тягу поїздів [1]. Також Кабінетом міністрів України прийнято постанову № 769 «Про заходи щодо державної підтримки залізничного транспорту», спрямовані на більш ефективне використання основних фондів залізничного транспорту і, зокрема, зниження на 1% питомих витрат енергоресурсів на тягу поїздів за кожен рік. Надалі це призвело до зниження питомої витрати електроенергії практично на всіх залізницях.

Актуальність даної роботи підтверджується також положеннями «Комплексної державної програми енергозбереження України на 2015–2025 р.р.», Законом України «Про енергозбереження» № 75/94-ВР від 01.07.2018 р., Указом президента України № 603/2000 «Про стан залізничного транспорту України та заходи щодо забезпечення його ефективного функціонування».

Найбільші витрати паливно-енергетичних ресурсів припадають безпосеред-

ньо на тягу поїздів, їх рівень залежить від економічності тягового рухомого складу, раціональності його використання і відповідності обраного режиму ведення поїздів оптимальному.

Аналіз досліджень вітчизняних і зарубіжних учених показав, що зниження споживання електроенергії на тягу поїздів на 5–20% можна отримати за рахунок застосування раціональних режимів ведення поїзда по ділянці, тобто за рахунок вмілого використання їх кінетичної енергії при практичному використанні енергооптімальних режимних карт [2]. Так як режим ведення залежить від множини факторів, індивідуальних для даного поїзда, таких як, маса та составність поїзда, тимчасові обмеження швидкості на момент проходження поїзда, кліматичні умови та інші фактори, потрібен індивідуальний розрахунок режимів ведення безпосередньо перед відправленням поїзда.

У зв'язку з цим завдання розробки методик і програм оперативного розрахунку режимних карт з урахуванням характеристик поїзда та реальних умов руху та поїзної ситуації є важливою і актуальною.

Метою даної роботи є зниження витрат електроенергії на тягу приміських поїздів за рахунок вибору раціональних режимів їх ведення.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

– проаналізувати існуючі математичні методи оптимізації режимів ведення поїзда по ділянці;

– побудувати математичну модель руху поїзда, адаптовану для розв’язання тягово-оптимізаційних задач з урахуванням індивідуальних особливостей поїзда та графіку руху;

– удосконалити комплекс алгоритмів і програмних засобів для розрахунку індивідуальних раціональних режимних карт ведення приміського поїзда;

– обґрунтувати економічну ефективність.

Об'єктом дослідження є процес переміщення приміського поїзда по тяговим ділянкам.

Предметом дослідження є режим ведення приміського електропоїзда.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РОБІТ ТА РОЗРОБОК, СПРЯМОВАНИХ НА ЗМЕНШЕННЯ ВИТРАТ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ НА ТЯГУ ПОЇЗДІВ

1.1 Аиьліз робіт та стцу проблеми оптимальних тягльих розрахункғ иь вітчизняних і зарубіжних залізницях

В основі розрахунку оптимальних траєкторій руху поїздів лежить теорія локомотивної тяги і тягові розрахунки для поїзної роботи [2, 3]. Велику увагу приділено теоретичним основам методів розв'язання диференціального рівняння руху. Наведено опис чисельних методів інтегрування рівняння для рівномірного та нерівномірного руху, запропонованих вперше професором Н. П. Петровим. В принципі вони аналогічні аналітичному, відмінності полягають лише в поданні залежностей питомих прискорюючих і сповільнюючих сил від швидкості руху, і відповідно диференціального рівняння руху при його інтегруванні. Останнє при вирішенні було запропоновано розкладати в ряд Тейлора. Н. П. Петров вперше провів дослідження опору руху рухомого складу і безперервних гальмівних систем.

Класична теорія тяги поїздів оперує найпростішої розрахункової схемою «поїзд – матеріальна точка». Математична модель руху поїзда може бути складена на підставі теореми про зміну кінетичної енергії, наприклад як в [4]. Рівняння руху поїзда має вигляд:

K (1.1)

де – координата;

– час;

– коефіцієнт інерції обертових частин;

– результуюча сила, д – в режимі тяги, г – в режимі гальмування;

д – дотична сила тяги;

д – дотичний опір руху поїзда;

г – гальмівна сила поїзда.

Система (1.1) описує процеси різної фізичної природи, які утворюють нелінійні праві частини. Параметри, що входять в рівняння, залежать від багатьох факторів та не завжди піддаються точній кількісній оцінці. Головне і єдине їх перенага полягає в їх простоті та низькому порядку системи. Вони послужили базою для розробки «Правил тягових розрахунків для поїзної роботи», різних способів отримання раціональних режимних карт водіння поїздів, алгоритмів оптимізації і систем автоматичного регулювання.

Класичні методи не дозволяли врахувати в постановці задачі значні обмеження (наприклад, за умовами безпеки – максимальні значення впливів на колію у вертикальній та горизонтальній плоскостях, максимально допустимі зусилля в автозчепленні, за умовами перегріву тягових електричних машин), що накладаються на процес рух поїзда, а також значну нелінійність математичної моделі системи внаслідок таких припущень:

– механічний рух поїзда описується як рух матеріальної точки з одним ступенем свободи, тобто не враховується поздовжня динаміка, а також ефекти, що виникають від рухливості вантажів (наприклад, наливних поїздів, що було встановлено в натурних експериментах);

– враховуються тільки зовнішні сили, що визначають цілеспрямований рух поїзда і збігаються тільки з його напрямом, а динаміка процесів всередині системи ігнорується;

– не приймається до уваги залежність величини коефіцієнта зчеплення від стану колії, а також зміна напруги на струмоприймачі в разі електричної тяги.

Запропоновані наближені методи розв'язання диференціального рівняння руху поїзда не знайшли практичного застосування через їх складність та недостатню точність.

На початку минулого століття професор Ю. В. Ломоносов почав розробку теорії тяги поїздів, запропонувавши рішення задачі руху при переході поїзда з одного підйому на інший і з майданчика на підйом [5].

У зв'язку з розвитком обчислювальної техніки були опубліковані роботи, теоретичну основу яких складають принципи оптимального управління, до них

слід віднести наступні [6, 7]. Критерієм оптимальності в них прийнято час ходу або наведені витрати. Рішення задачі виконувалося шляхом порівняння результатів, які утворюються під час руху поїзда з використанням різних схем з'єднання тягових електродвигунів, ступенів ослаблення збудження поля, вибігу, гальмування та вибору кращого з них.

У роботах [8, 9] задача оптимального управління тепловозом при заданому розкладом часу руху вирішується варіаційними методами мінімізацією інтеграла

$$T \; T \; 2\,1\,3 \; T \quad 0 \; 0 \; 0 , \qquad (1.2)$$

де – відносна витрата пального;

– к.к.д. передачі від дизеля до рушійних осей;

– поточне значення шляху, пройдене від початку перегону;

– поточне значення швидкості;

– поточне значення прискорення;

, 1 – постійні коефіцієнти в рівнянні опору руху поїзда;

– опір руху поїзда в функції шляху та швидкості;

– постійна лінійної залежності відносної витрати пального від потужності.

В результаті розв’язку задачі при допущенні сталості к.к.д. локомотива і профілю колії отримані рівняння екстремалів з рівняння Ейлера (1) при обмеженнях:

– максимального прискорення (за умовами комутації та зчеплення);

– максимальної швидкості (в основному за станом рейкової колії);

– потужності дизеля (за максимальним значенням).

Однак за допомогою варіаційного обчислення [10] завдання оптимального управління локомотивом можна отримати лише в загальному вигляді при припущеннях – лінійності залежності витрати пального від потужності (див. Функціонал (1.2)), фіксованості координати початку гальмування та сталості к.к.д. в про-

цесі руху. Останнє припущення дає вирожденність функціоналу, тобто його лінійність відносно старшої похідної.

У роботах [10–11] завдання оптимізації тягових розрахунків вирішуються за критерієм мінімізації енергетичних витрат з урахуванням ізопараметричних обмежень за часом руху з урахуванням впливу на оптимальну траєкторію основного опору поступальному руху, напруги в контактній мережі та ваги поїзда у такому вигляді

$$з \frac{L}{0}, \tag{1.3}$$

де з – заданий графіком час руху;

– довжина ділянки;

– координата знаходження поїзда;

– швидкість руху.

В [12] запропоновано застосування для аналізу режимів ведення принцип максимуму як менш трудомісткий у порівнянні з варіаційним обчисленням. Тісно пов'язаний з класичним варіаційним обчисленням принцип максимуму Понтрягіна дає можливість визначити теоретично обґрунтоване управляюче правило. Основним елементом у задачі Понтрягіна виступає обмеження на управляючі впливи. Крім того, Л. С. Понтрягин вказав нову форму необхідних умов екстремуму. За допомогою принципу максимуму Понтрягіна показано, що оптимальна траєкторія руху поїзда за умови безперервного регулювання сил тяги, постійному к.к.д. локомотива, постійному профілі колії, лінійної залежності сил основного опору руху від швидкості повинна складатися з ділянок розгону з максимальним прискоренням, рухом з постійною швидкістю, вибігом і гальмуванням з максимально можливим уповільненням.

У роботах [12–13] поїзд розглядається у вигляді гнучкої нерастяжимой нитки кінценої довжини, а в якості методу оптимізації використовується також принцип максимуму Понтрягіна, який дозволив отримати управління у вигляді функції часу. При цьому управління вводилися як множники при прискорюють силах –

тяги т і гальмування г, і вирішувалося спільно з рівняннями обмежень диференціальне рівняння для центру мас поїзда з урахуванням поздовжніх зусиль в -й координаті:

$$f_{т} b_{г} \quad (1.4)$$

Знайдені управління тягою і гальмуванням, відповідно, f і b на наступному етапі рішення апроксимувались реальними перемиканнями контролера й крана машиніста.

Якісно інший підхід до завдань оптимального управління розроблений Р. Беллманом [10]. Основним моментом у методі динамічного програмування є принцип оптимальності: «оптимальне управління володіє тією властивістю, що яким би не був первісний стан і управління в початковий момент, подальше управління повинно бути оптимальним щодо стану, в яке прийшла система в результаті первинного управління».

Це положення призводить до некласичного диференціального рівняння в часткових похідних, так званого функціонального рівняння Беллмана

$$\min_{u \in U} \left(i, 0 \right), \quad (1.5)$$

де – функція, що визначає оптимальне управління;

i – вектор правих частин рівняння руху;

– оператор градієнта;

0 – підінтегральна функція функціоналу;

– вектор управлінь;

– вектор станів.

Таким чином, до 70–80-х років були закладені основи оптимального управління рухом поїзда, в яких, в якості критерію оптимальності, виступали час або приведені витрати.

Надалі при підвищенні ваги та довжини поїзда найбільш актуальною стала задача забезпечення безпеки руху на складних ділянках профілю, при вирішенні якої необхідно оцінювати поздовжньо-динамічні сили, з метою недопущення перенищення їх нормованих значень, що лімітуються міцністю вузлів рухомого складу та стійкістю його в рейкової колії .

Визначенням зусиль, що діють на вагони, займалися В. А. Лазарян, Ф. В. Флорінський, Е. П. Блохін, Л. А. Манашкін і ін.

Модель В. А. Лазаряна, що представляє поїзд у вигляді пружнов'язкого стрижня, або у вигляді пружного стрижня з гістерезисом, а також з різними недосконалостями, враховує дисипацію енергії і дозволяє обчислити зусилля в стрижні у часі [11]. Рух поїзда як системи дискретних мас (рис. 1.1) представляється наступними диференціальними рівняннями:

$$\begin{cases} \frac{dv_j}{dt} = \frac{1}{m_j}\left[j\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)_{j+1} j\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)_{j} \left(\frac{\partial}{\partial x}\right)_{j} \text{c} \right] \quad j=1,2,\ldots,n+1 \\ \frac{dx_j}{dt} = \frac{dx_j}{dt} = \frac{dx_j}{dt} = 1 \\ \frac{dx_j}{dt} = \frac{dx_j}{dt} = \frac{dx_j}{dt} = j-1 \quad j \end{cases} \tag{1.6}$$

де n – кількість екіпажів в поїзді;

$j \quad j-1 \quad j \quad j-1 \quad j$ – відносне переміщення центрів мас двох сусідніх екіпажів (деформація з'єднання між $j-1$-м і j-м екіпажами);

j, j, j, j – відповідно довжина, координата центру мас, яка відлічується по траєкторії руху, маса і швидкість j-го екіпажу;

j, $j+1$ – поздовжні сили, що діють на екіпаж (ці сили є внутрішніми по відношенні до системи);

j – результуюча зовнішніх сил, прикладених до -го екіпажу.

Рисунок 1.1 – Розрахункова схема поїзда в моделі В. А. Лазаряна

В кінці 80-х – початку 90-х років внаслідок того, що зменшення витрат енергоресурсів і собівартості перенезень відводилася другорядна роль, у порівнянні зі збільшенням маси поїздів і швидкості руху, то потім, зі зменшенням обсягу вантажо- і пасажиропотоку, зросли питомі витрати енергоресурсів на тягу поїздів. Тому в сучасних умовах ринкової економіки та всесвітньої тенденції підвищення вартості енергоносіїв необхідно знаходити нові можливості економії енергоресурсів. В даний час ефективне використання електричної енергії та енергозбереження є основою енергетичної політики залізничного транспорту України, яка спрямована на виконання Указу президента України № 662/99. Згідно з указом всім державним підприємствам, в тому числі залізницям, необхідно забезпечити щорічне зниження електроспоживання на 3–6%. Заходи, прийняті Укрзалізницею дозволили стабілізувати і надалі забезпечити стійку тенденцію до зниження питомих витрат енергоресурсів.

З причини великої актуальності і множини варіантів рішення проблемою оптимізації режимів ведення поїзда займаються різні організації та науковці України та зарубіжжя. Найбільшого результату з економії електроенергії та стабілізації руху можна досягти за рахунок широкого застосування бортових комп'ютерів і систем автоведения поїзда, що забезпечують безперервне порівняння розрахункових і дійсних параметрів руху, а також вибір дії, що управляє на системи

управління локомотивом і поїздом [12] .

Вчені ДІІТу з позицій системного аналізу займаються вирішенням завдання вибору оптимальних режимів ведення поїздів з урахуванням критеріїв безпеки і диференційованих тарифів оплати електроенергії методами векторної оптимізації. Показано, що застосування диференційованих тарифів оплати електроенергії буде сприяти вирівнюванню навантажень тягових підстанцій і підвищенню економічності роботи енергосистем залізничного транспорту. Виділено такі рівні організації залізничних перенезень, що забезпечують ефективне рішення задачі розрахунку раціональних режимів ведення:

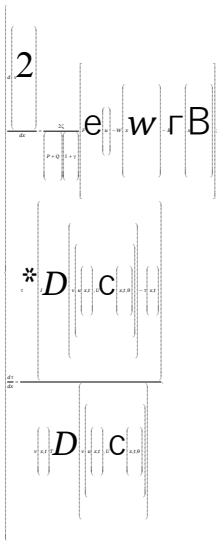
– перший рівень – формування вагонопотоків за напрямками, визначення оптимальних міжпоїзних інтервалів і масс поїздів (в тому числі в різних часових тарифних зонах оплати електроенергії);

– другий рівень – систематизація показників електричної тяги в умовах використання диференційованих тарифів оплати електроенергії;

– третій рівень – вибір оптимальних режимів ведення поїздів по заданим ділянках (в тому числі в різні періоди доби) для конкретних типів електровозів.

Основним завданням на третьому рівні є вибір раціонального режиму ведення поїзда в залежності від координати шляху, періоду доби, маси локомотива і складу, а також графіка руху.

Рух поїзда як гнучкої нитки довжиною n з погонного масою n описується системою диференціальних рівнянь (1.7) з початковими умовами (1.8) [13]



(1.7)

(1.8)

де – координата знаходження поїзда та час;

– управління (номер позиції контролера);

– мас швидкість центру поїзда;

– відповідно маса локомотива та состава;

– температура перегріву тягових електродвигунів (ТЕД);

– теплові характеристики і струм ТЕД;

– напруга контактної мережі;

– сукупність випадкових і ненизначених факторів.

На основі досліджень вчених ДІІТу Департаментом локомотивного господарства АТ «Укрзалізниця» розроблена методика складання режимних карт ведення поїздів, що забезпечують мінімальні витрати дизельного пального або електроенергії на тягу поїздів в пасажирському русі. При використанні енергооптімальних режимних карт ведення пасажирських поїздів, розрахованих за допомогою розробленого програмного комплексу, тільки по локомотивному депо Київ-Пасажирський досягнуто зменшення витрат електроенергії на тягу поїздів в розмірі 2,4 млн кВт, що становить 1,9% від загальних витрат депо [14].

Економія енергії при будь-якому режимі ведення поїзда залежить від наявних резервів часу (рис. 1.2). З метою оптимального розподілу резервів часу засто-

совується метод послідовних розрахунків. В операційному режимі моделюються численні варіанти руху поїзда на даній ділянці, для яких приймаються різні режими ведення поїзда і прогнозується споживання енергії.

За допомогою цього методу для розрахунку оптимального режиму ведення поїзда ICE на лінії Кассель – Фульда протягом ста секунд може бути розраховане 7300 моделей проходження, в той час як традиційним кроковим методом розраховують лише сто [12].

При малих резервах часу відбувається перехід на енергоємний режим ведення поїзда. Економія електроенергії зростає зі збільшенням резервів часу, причому можливості зазначених на рис. 1.2 режимів різні. При неневеликих резервах часу здійснення вибігу перед гальмуванням дає значну економію. Однак при збільшенні резервів часу значну економію дає зниження максимальної швидкості. Найбільша економія буде при оптимальній комбінації різних режимів ведення, перебір яких здійснює комп'ютер в режимі реального часу. У разі використання резервів часу тільки після проходження половини ділянки (криві *2* на рис. 1.3) забезпечується найменша ймовірність запізнень. Отримана при цьому економія енергії становить близько 9%.

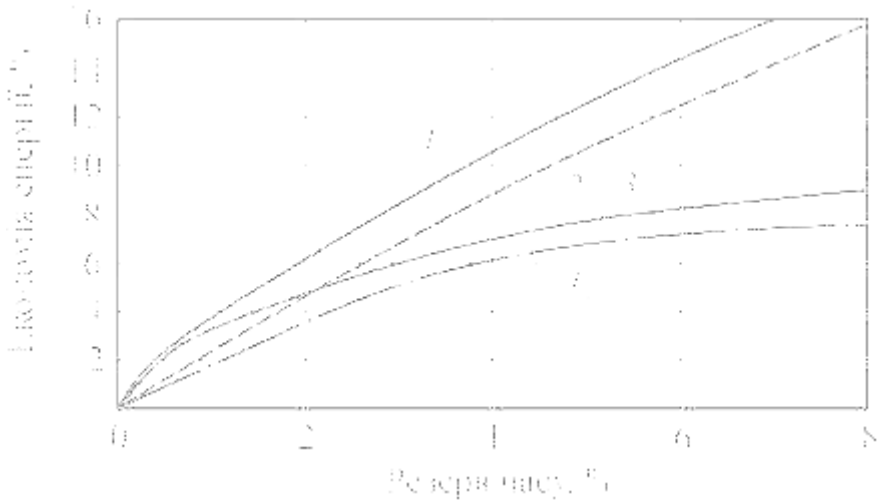


Рисунок 1.2 – Економія енергії в залежності від фактичного резерву часу при різних режимах ведення поїзда:

1 – оптимальний режим ведення; *2* – зниження максимальної швидкості; *3* – застосування вибігу; *4* – зменшення уповільнення поїзда

Рисунок 1.3 – Розподіл резервів часу по ділянці при різних режимах їх використання:

1 – лінійний розподіл; *2* – використання резервів часу після проходження половини ділянки; *3* – застосування вибігу перед гальмуванням

Якщо застосовується тільки вибіг перед гальмуванням (крива *3*), економія в кращому випадку становить 5 %. При лінійному розподілі резервів часу від початку проходження маршруту (*1*) економія енергії буде найбільшою, але цей варіант можливий, наприклад, в дні з малою інтенсивністю руху. Ризик запізнення зводиться до мінімуму оптимальним розподілом резервів часу.

Поєднання методу послідовних розрахунків і високій швидкості обчислень забезпечує коректність і актуальність видаваних машиністу рекомендацій. Крім того, завдяки модульного принципу побудови системи досить просто адаптувати її до різноманітного рухомого складу. Можливість гнучко оперувати резервами часу дозволяє економити енергію на поїздку та забезпечувати при цьому високу точність дотримання графіка руху.

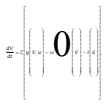
1.2 Постцлька зђдцня вибору раціоњльних режимґ ведення

Рішенням задачі вибору раціонального режиму ведення тягового рухомого складу є знаходження такого набору керуючих параметрів . на всій ділянці прямування поїзда з заданими характеристиками (маса поїзда, його составність, се-

рія) і пов'язаних з швидкість руху і силу тяги к, при якому досягає мінімуму (або максимуму) значення деякого критерію оптимальності.

В якості критерію оптимальності як було показано в п.п. 1.1 можуть виступати різні технічні та економічні показники процесу.

Рівняння руху поїзда в режимі тяги, отримане на підставі другого закону Ньютона, за умови, що маса поїзда зосереджена в центрі його тяжіння, описується диференціальним рівнянням [2–5]:



(1.9)

де – швидкість руху;

 – час;

 – розмірний коефіцієнт, що представляє собою прискорення поїзда, коли на кожну одиницю його маси діє одинична прискорює сила;

 – питома сила тяги (д) або гальмування (г);

д – питома дотична сила тяги;

0 – основне питомий опір руху поїзда;

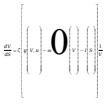
 – опір від плану та профілю колії;

 – координата шляху;

г – питома гальмівна сила;

 – режим роботи (позиція контролера машиніста).

Якщо прийняти , то рівняння набуде вигляду:



(1.10)

Потрібно знайти таке управління рухом поїзда на ділянці з координатами – початкової н і кінценої к, при якому цільова функція прагне до мінімуму:

(1.11)

де в залежності від постановки задачі являє собою деякий функціонал [13], наприклад, якщо

, (1.12)

то функція мети представлятиме час ходу по ділянці, а якщо

се , (1.13)

де с – напруга контактної мережі;

е – споживаний електрорухомим складом струм.

то (1.11) буде представляти витрати електроенергії на ділянці.

При цьому відповідно до умов технічної експлуатації, повинні дотримуватися такі обмеження управління по:

– силі тяги д: д дmax з ч;

– максимально допустимому прискоренню max: max;

– максимальній швидкості max: max;

– гальмівний силі: к з ч 0;

– силі рекуперації (обмеження по відношенню струму двигуна до струму збудження) Rmax: R Rmax;

– максимально допустимому току двигуна дmax: д дmax;

– температурі перегріву тягового двигуна max: max.

Тут – сила натискання гальмівних колодок колісної пари;

к – коефіцієнт тертя гальмівної колодки об колесо;

з ч – коефіцієнт зчеплення колеса з рейкою;

0 – осьова навантаження.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПОЇЗДА У ПРИМІСЬКОМУ РУСІ

2.1 Вимоги до моделі руху їїзда і її узагальнень характеристика

При вирішенні задачі раціонального управління локомотивом структура

математичної моделі руху поїзда по ділянці повинна забезпечувати максимальну швидкодію виконання оптимізації, і разом з цим мінімальну величину похибки між визначеними моделлю управліннями і реальними.

При вирішенні завдання вибору енергооптимальної програми управління тяговим рухомим складом відокремлюються два основних об'єкта математичної моделі руху поїзда по ділянці – поїзд і середовище руху. У процесі рішення рівняння руху поїзда з метою визначення економічно обґрунтованих режимів руху поїзда по ділянці в якості характеристик поїзда розглядаються: маса поїзда; кількість вагонів – фізичних і умовних, їх питомі опори; кількість осей; тип та серію тягового рухомого складу, а в якості характеристик тягового рухомого складу, перераховані з кривих намагнічування тягового двигуна: тягову; струмову; гальмівні.

У якості характеристик середовища руху, що складається з залізничної колії, поїзної ситуації на ділянці і метеорологічних умов, необхідно враховувати інформацію про:

– кілометраж ділянки та обмеження швидкості, задані у вигляді кілометражу початку та закінчення обмеження, величини максимальної швидкості на цій ділянці, а для тимчасових обмежень ще й часом дії обмеження швидкості;

– поздовжній профіль, що визначається довжиною кожного елемента і його ухилом;

– плані ділянки, яка визначається кілометражем початку і закінчення кривої, а також її радіусом;

– розташування роздільних пунктах, у вигляді їх найменування, кілометражу вхідних стрілок, осі станції і обмеження швидкості по головному і бічних коліях;

– рівнях напруги, заданих у вигляді кілометражу початку і закінчення пенного рівня напруги;

– ділянках випробування гальм, заданих у вигляді кілометражу початку і закінчення випробування гальм із зазначенням величини зниження швидкості.

Для побудови моделі руху поїзда необхідно виділити та розглянути особли-

вості режимів ведення поїздів у приміському русі.

2.2 Особливості режимґ ведення йїздґ у приміському русі

2.2.1 Специфіка приміського руху

Приміський рух має ряд специфічних особливостей. Потік приміських пасажирів у великих містах і промислових центрах обчислюється десятками та сотнями тисяч осіб на добу. На ділянках з особливо інтенсивним рухом в обороті щодня перебувають 150–250 пар електропоїздів [3]. Для приміського сполучення характерні ненелика дальність проїзду та різка зміна числа пасажирів за годинами доби та днів тижня. У вихідні та святкові дні пасажиропотоки істотно змінюються.

Через зменшення потоку пасажирів по мірі віддалення від міста рух приміських поїздів організовано за зонним принципом. У ближній від міста зоні число поїздів максимальне, а на більш віддалених зонах воно зменшується. Для великих центрів відстань між пунктами зупинок становить 2–3 км, а в таких містах, як Київ, Харків, Дніпро, в головній зоні воно зменшується до 1–2 км. Часті зупинки при великій густоті руху вимагають від рухомого складу реалізації можливо великих прискорень і уповільнень.

Особливості приміського руху визначають технічні характеристики електропоїздів. Потужність їх тягових двигунів, яка припадає на одиницю маси, вище, ніж у будь-якого локомотива. Для двигунів електропоїздів ЕР1, ЕР2, ЕР9 при середній масі десятивагонного складу 550 т вона становить близько 7,3 кВт/т, а для двигунів пасажирського електровоза ЧС2 з поїздом масою 1000 т – тільки 4,2 кВт/т. Питома сила тяги електропоїздів в період розгону становить близько 70 Н/кН, що забезпечує високі прискорення поїзда 0,6–0,7 м/с^2 [3]. При такому прискоренні через 20 секунд після початку руху поїзд набирає швидкість 43–48 км/год. Високі прискорення дуже важливі при великому числі зупинок. У той же час високі швидкості руху на коротких перегонах викликають необхідність початку гальмування з великій швидкості.

На приміських лініях, електрифікація яких при існуючих обсягах перенезень не виправдовує себе, застосовуються дизель-поїзда. За своїми техніч-

ними даними вони забезпечують досить високу технічну швидкість, що становить приблизно 80% швидкості електропоїзди ЕР2.

Електропоїзди сімейства ЕР2Т обладнані системою рекуперативного-реостатного гальмування, яка відсутня у ЕР2. Ця система дозволяє в інтервалі швидкостей 80-100 км/год повертати частину спожитої електроенергії в контактну мережу в режимі рекуперативного гальмування. Ефективність даної системи залежить від безлічі факторів, до яких можна віднести рівень напруги в контактній мережі, наявність споживачів електроенергії, точність регулювання апаратури електропоїзди та інші.

2.2.2 Режими руху приміських їїздг

Режим руху електропоїзда по конкретному перегону вибирається відповідно до заданого часу ходу та особливостями перегону. Різноманітність режимів руху електропоїзда в експлуатації визначається багатьма факторами. Це профіль колії, довжина перегону, режим розгону поїзда, показання колійних світлофорів, наявність обмежень швидкості та інші. Багато факторів носять змінний характер. Так, на приміських ділянках неоднакові відстані між пунктами зупинок, обмеження швидкості на перегонах і станціях, коефіцієнт зчеплення коліс з рейками, що реалізовується, рівень напруги в контактній мережі, населеність вагонів, кліматичні умови, параметри обладнання електропоїзда, його регулювання, якість роботи і так далі.

У загальному випадку режим руху електропоїзда постійного струму по перегону можна розбити на наступні фази (рис. 2.1):

- пуск (рух на реостатних позиціях);
- розгін на автоматичній характеристиці;
- рух зі сталою швидкістю;
- вибіг;
- гальмування.

Рисунок 2.1 – Фази руху електропоїзда по перегону

У реальних умовах експлуатації фази розгону, усталеного руху і вибігу можуть бути відсутні. Рух електропоїзда з відсутністю фази розгону (крива *1* на рис. 2.2) характерний для дуже коротких перегонів або перегонів із затяжними спусками. Фаза усталеного руху в режимі тяги може спостерігатися на перегонах, що мають затяжний підйом, або на довгих перегонах за умови руху електропоїзда на характеристиках зниженої потужності (крива *2* на рис. 2.3). Відсутність фази вибігу (крива *3* на рис. 2.2) на практиці зустрічається вкрай рідко і характерно для режиму максимального нагону запізнень.

У літературі з електричній тяги зазвичай рекомендується рух електропоїзда перегоном з використанням трьох фаз: розгін з максимально можливою силою тяги, вибіг і гальмування з максимально можливим уповільненням (крива *2* на рис. 2.2).

Рисунок 2.2 – Криві швидкості руху електропоїзда по перегону з різними варіантами фази розгону та вибігу:
1 – з відсутньою фазою розгону; *2* – з фазами розгону та вибігу;
3 – з відсутньою фазою вибігу

Такий спосіб спочатку був розроблений для міського електротранспорту, а з появою перших електропоїздів – рекомендований для приміського руху. Зі збільшенням швидкостей електропоїздів застосування зазначеного способу стало приводити до неніправдано високих витрат електроенергії, внаслідок того, що при великих швидкостях значний вплив аеродинамічного опору руху. Тому, окрім режиму з рис. 2.2 повинен застосовуватися режим, що наведений на рис. 2.3 з чергуванням фаз тяги і вибігу (крива *1*) або з використанням характеристик зниженої потужності (крива *2*).

Таким чином все різноманіття перегонів, на яких експлуатуються електропоїзди можна поділити на дві групи: перегони, на яких можливе виконання заданого часу ходу при одноразовому включенні тягових двигунів (за одне підключення) і перегони, на яких потрібно багаторазове включення тягових двигунів (два і більше підключень).

Рисунок 2.3 – Криві швидкості руху електропоїзда по перегону з чергуванням фаз тяги та вибігу (крива *1*) та по характеристиці зі зниженою потужністю (крива *2*)

Режим руху з чергуванням тяги та вибігу може бути характерний для перегонів, що мають обмеження швидкості як по всій довжині, так і на окремих ділянках. При наявності обмеження швидкості на перегоні в режимі руху можлива поява фази регулювального гальмування перед обмеженням. Наявність або відсутність цієї фази залежить від величини обмеження, місця його розташування на перегоні і часу ходу по перегону.

Експлуатовані електропоїзди більш раннього випуску (серія ЕР2), мають два з'єднання тягових електродвигунів – послідовне і послідовно-паралельне. На цих електропоїздах є всього два режими пуску – з нормальним і зниженим прискоренням. Для електропоїздів серії ЕР2 можливе зниження пускових втрат при переході на паралельне з'єднання тягових електродвигунів за рахунок витримки рукоятки контролера машиніста в положенні 2 (послідовне з'єднання тягових електродвигунів, ослаблене поле) до швидкості 40–50 км/год . В цьому випадку реостатні позиції паралельного з'єднання проходяться з малими значеннями пускового

струму – хронометрично. Деяке збільшення часу ходу компенсується додатковим рухом під струмом на безреостатній позиції. За рахунок скорочення втрат електроенергії в резисторах економиться до 1,5 кВт·год електроенергії на один пуск десятівагонного електропоїзда [55]. Однак такий режим можливий тільки при відносно низьких технічних швидкостях.

Електропоїзди більш пізнішого випуску (серія ЕР2Т і його аналоги) мають тільки одне угруповання тягових електродвигунів. Внаслідок цього у них спостерігаються підвищені втрати електроенергії в пускових резисторах, які складають 50% від енергії, витраченої на пуск, проти 25% у ЕР2. Однак конструкцією тягового приводу цих електропоїздів передбачені сім уставок пускового струму, що дозволяє машиністу змінювати пускові прискорення не тільки в залежності від стану поверхні рейок, але і від населеності поїзда. Проведені розрахунки показують, що найбільш економічними є 4 і 5 уставки блоку електронних реле [8].

2.2.3 Складові витрат електроенергії на тягу поїздів

Як і при електровозній тязі, витрати електроенергії можна представити у вигляді суми наступних складових:

– витрати на подолання основного опору руху $\omega 0$;

– витрати на подолання додаткового опору руху від ухилів і кривих i;

– втрати в гальмах при гальмуванні до повної зупинки $г$;

– втрати в тягових двигунах і перетворювачах η;

– втрати в пусковому реостаті R;

– витрати енергії на власні потреби $в\ п$.

Співвідношення розглянутих складових при електровозній і моторвагонній тязі неоднаково. При електровозній тязі основна частина енергії витрачається на подолання опору руху, тому, і витрати енергії залежать головним чином від швидкості руху та профілю колії. Пускові втрати та втрати в гальмах не відіграють вирішальної ролі, тому що відстань між зупинками обчислюється десятками кілометрів, а часто і більш. При моторвагонній тязі в приміському русі з малими відстанями між зупинками часті пуски та гальмування з високої швидкості підвищу-

ють питому вагу цих складових в загальній витраті. У табл. 2.1 наведено розподіл електроенергії по складовим витрат, отриманих при випробуваннях електрорухомого складу (е.р.с.) постійного струму.

Дані в чисельнику відповідають довжині перегону 2,9 км – середній довжині перегону на приміських електрифікованих ділянках, а в знаменнику – відстані між пунктами зупинок близько 8,9 км, характерному для віддалених від міста зон, а також при русі електропоїздів без зупинок на частині шляху прямування.

Розподіл електроенергії по складовим витрат в основному обумовлено механічною роботою та втратами в тягових двигунах, а ці складові не залежать від роду струму. Виняток становлять лише втрати в пусковому реостате. На е.р.с. змінного струму такий реостат відсутній, але в період пуску та розгону різко знижується коефіцієнт потужності, що викликає додаткові втрати електроенергії. Наближено можна вважати, що ці види втрат компенсують один одного, і користуватися даними табл. 2.1 і для е.р.с. змінного струму.

При електровозній тязі основна частина витрат енергії, а саме 77–82%, припадає на подолання опору руху поїзда, причому ця частина на різних ділянках приблизно однакова. Пускові та гальмівні втрати знаходяться в межах 5–8%. При моторвагонній тязі співвідношення складових витрат значно змінюється в залежності від довжини перегону. При найбільш поширеній довжині його близько 3 км сума пускових і гальмівних втрат становить приблизно 7%, тобто перенажає в загальній витраті енергії. Зі збільшенням відстані між зупинками $l_{пер}$ частка цих втрат знижується, але навіть при $l_{пер}$ = 8,9 км вони залишаються досить великими – близько 32 %. Розподіл складових витрат енергії в залежності від довжини перегону без урахування власних потреб рухомого складу наведено на рис. 2.4. Тут і в табл. 2.1 витрати енергії на подолання основного і додаткового опорів руху об'єднані, оскільки еквівалентний ухил на приміських ділянках, як правило, близький до нуля.

Таблиця 2.1 – Розподіл витрат електроенергії

Складова витрат електроенергії	Значення складової, %, для

	елект-ропоїздів	вантажних електровозів	пасажирських електровозів
На подолання основного опору руху			
На подолання додаткового опору руху від ухилів і кривих			
В гальмах при гальмуванні до повної зупинки			
В тягових двигунах і перетворювачах			
В пусковому реостаті			
На власні потреби (тільки на допоміжні машини без урахування опалення)			
Разом			

Рисунок 2.4 – Розподіл складових витрат енергії у залежності від довжини перегону

Оскільки витрата електроенергії, пов'язаний з пуском і гальмуванням електропоїздів, становить значну і в ряді випадків перенажну частину загальної витрати, необхідно більш детально розглядати процес руху поїзда при розгоні і зупинці.

Розглянемо вплив прискорення поїзда при пуску на витрати енергії. Для порівняння візьмемо один і той же перегін і поставимо умову, щоб час ходу x між двома зупинками двох однакових поїздів був однаковим.

На рис. 2.5 побудовано залежності зміни швидкості руху поїздів від часу за даними [3]. Рух поїзда складається з трьох фаз: їзди під струмом ($0a_1$, $0a_2$), вибігу ($a_1б_1$, $a_2б_2$) і гальмування ($б_1в$, $б_2в$). Крива *1* зображує процес руху поїзда при максимально можливому прискоренні пуску $a_{п1}$ а крива *2* – зі зниженим прискоренням $a_{п2}$. Прискорення визначається струмом тягових двигунів, тому можна сказати, що крива *1* відповідає розгону з максимальним пусковим струмом, а крива *2* з меншим його значенням незалежно від того, яким шляхом цей режим отримано.

Рисунок 2.5 – Залежності зміни швидкості руху поїздів від часу при різних режимах пуску

Площа фігури, утвореної кривою швидкості та віссю часу, зображує в деякому масштабі шлях, пройдений поїздом. Тому на одному і тому ж перегоні такі площі будуть однаковими незалежно від режиму ведення поїзда. Отже, і площі, утворені кривими *1* і *2*, повинні бути рівні.

Оскільки в початковий період руху крива *1* йде вище кривої *2*, то в силу рівності площ крива *2* в заключний період повинна йти вище кривої *1*. Це можливо тільки при більш тривалій їзді під струмом ($t_{т2} > t_{т21}$), що вимагає початку гальмування з більшої швидкості, ніж при режимі *1*, зі збільшенням гальмівних втрат, пропорційних квадрату швидкості початку гальмування. Крім того, зростуть втрати в пусковому реостаті через подовження часу пуску та більш високої швидкості виходу на автоматичну характеристику.

Величина пускового прискорення здійснює помітний вплив на швидкість початку гальмування. Тому для зниження витрат електроенергії доцільно проводити пуск і розгін електропоїздів з найбільш можливим прискоренням.

Вплив уповільнення при гальмуванні на витрату енергії показано на рис. 2.6. Тут, як і в попередньому випадку, потрібно, щоб час ходу по перегону при різних режимах роботи поїздів був однаковим (заштриховані площі повинні бути рівні ода однієї).

Оченидно, що при реалізації більш високого уповільнення відключити струм при однаковій інтенсивності розгону можна раніше. Тривалість їзди на вибігу буде більше, і гальмування можна починати зі швидкості меншій швидкості $V_{т2}$, що менше швидкості $V_{т1}$, необхідної при меншому уповільненні. В цілому підвищення уповільнення при гальмуванні, так само як і прискорення при пуску, сприяє зниженню витрати електроенергії на тягу поїздів. В обох випадках збільшується час їзди на вибігу, що забезпечує більшою мірою використання кінетичної енергії, накопиченої в період розгону, на подолання опору руху поїзда.

Витрата енергії значною мірою залежить від часу ходу. Змінюючи моменти виключення струму при збереженні режиму пуску і однаковому уповільненні при гальмуванні, отримаємо різний час ходу (рис. 2.7) і відповідно різні витрати електроенергії (рис. 2.8).

Рисунок 2.6 – Залежності зміни швидкості руху поїздів від часу при різних режимах гальмування

Рисунок 2.7 – Залежності зміни швидкості руху поїздів від часу при різних моментах виключення струму

Робота електропоїздів зазвичай протікає при часах ходу, відповідних круто падаючої частини характеристики $E(t)$. Різниця часу ходу в кілька секунд відчутно

позначається на витраті енергії. Це пояснюється короткочасністю періоду розгону та їзди під струмом на безреостатній характеристиці. Період розгону на реостатних позиціях до виходу на автоматичну характеристику триває 25–40 с, а вся тривалість їзди під струмом для перегонів довжиною 2–3 км не перенищує зазвичай 1–1,5 хв. Іншими словами, вся енергія, споживана на рух поїзда по перегону, витрачається протягом досить ненеликого часу, тому будь-які його відхилення викликають помітні зміни витрати енергії.

Їзда за часів ходу, відповідних штриховій частині кривої $E(t)$, де вплив часу на витрати електроенергії менше відчутний, неможлива через занадто малу швидкість, неприйнятною за умовами руху поїздів.

Рисунок 2.8 – Залежність витрати електроенергії від часу хода

З тих же міркувань не можна досягти теоретичного мінімуму витрати $E_{\min}$, що відповідає випадку, коли поїзд після розгону зупиняється в призначеному місці без застосування гальм. Слід також зауважити, що будь-яке відхилення фактичного режиму руху поїзда від прийнятого за розрахунком кривої змінює її положення. Відхилення можуть бути викликані затримкою рукоятки контролера машиніста на маненровій або ходових позиціях послідовного з'єднання тягових двигунів, зміною напруги в контактній мережі, різницею в регулюванні реле прискорення та іншими причинами. В силу цього витрати енергії залежно від часу ходу

повинні визначатися з урахуванням якомога більшої кількості факторів або статистичним шляхом.

2.3 Математичнь модель руху ӣїзда для тягльих розрахункғ

Математичну модель руху поїзда, представлену у вигляді гнучкої нитки, що не розтягується, довжиною п, з погонного масою пп, п п, на підставі другого закону Ньютона можна представити у вигляді системи диференціальних рівнянь:

(2.1)

де , , – швидкість, час і координата голови поїзда відповідно;

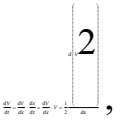
– коефіцієнт приведення одиниць розмірності;

– вага состава;

– коефіцієнт інерції обертових мас;

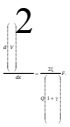
– сумарна сила, що діє на поїзд.

Беручи в якості незалежної змінної координату центру мас поїзда і виконавши наступне перетворення



(2.2)

отримаємо рівняння руху поїзда (2.1) при диференціюванні по шляху у вигляді:



(2.3)

Сумарна сила в загальному випадку визначається наступним виразом

(2.4)

де – сила, що діє на поїзд в режимі тяги $Д(С)$ або гальмування $Т(С)$;

– загальний опір поступальному руху поїзда;

– управління (режим роботи– схема з'єднання тягових електродвигунів (ТЕД) і режим ослаблення поля ТЕД);

– сумарна сила натискання гальмівних колодок.

$$Д\,Д\,Д\left(\frac{С\,М\,З}{\;}\right),\tag{2.5}$$

де $Д$ – кількість ТЕД;

– магнітна характеристика ТЕД в тяговому режимі;

$Д$ – струм якоря ТЕД;

$С$ – магнітні втрати;

$М$ – механічні втрати;

$З$ – втрати в механічної частині передачі.

Магнітні і механічні втрати визначаються за експериментально отриманими кривим втрат холостого ходу двигуна при різних значеннях м.д.с. [55].

Струм двигуна, струми збудження, струм електропоїзда, а також напруга на двигуні визначаються рішенням наступних рівнянь:

$$Д\,\frac{Д}{\;},\tag{2.6}$$

де $Д$ – напруга на двигуні, В;

– опір у колі тягового електродвигуна, Ом.

$$В\,Д\,О\;С\;Л(\;),\tag{2.7}$$

де $осл(\;)$ – коефіцієнт ослаблення поля на -ої позиції.

$$е\ п\ ДД,\qquad (2.8)$$

де – кількість послідовно з'єднаних двигунів;

– номер схеми з'єднання ТЕД.

$$д\ С\ ЭS,\qquad (2.9)$$

де s – еквівалентний опір системи електропостачання в точці розташування поїзда, Ом.

Магнітна характеристика ТЕД 1ДТ.003, використовувана в розрахунках, представлена на рис. 2.9.

Рисунок 2.9 – Магнітна характеристика ТЕД

Опір руху поїзда $W\left(x,V,u\left(x\right)\right)$ являє суму повних опорів локомотива і вагонів, що складаються з основного і додаткових опорів

$$0 \; i \; r \; \text{н т} \; \text{в} \tag{2.10}$$

де 0 – сила основного опору поступальному руху поїзда;

i – сила опору руху від профілю колії;

r – опір від кривих в плані;

н т – додатковий опір руху від низької температури зовнішнього повітря;

в – додатковий опір руху від вітру.

Додаткові опори r, н т, в визначаються згідно з методиками, наведеними в [2–5].

Сила основного опору поступальному руху поїзда залежить від швидкості руху та режиму його роботи: в режимі тяги $0\,0\text{т}$; в режимі холостого ходу і гальмування $0\,0\text{х}$, і визначається за формулами:

$$0\text{т} \; 0\,\text{т}, \quad 0\text{х} \; 0\text{х}, \tag{2.11}$$

де $0\,\text{т}$, 0х – питомі опору руху локомотива, відповідно, в режимі тяги і вибігання; згідно ПТР [5] на ланковій колії.

$$\begin{matrix} 0\text{т} \\ 0\text{х} \end{matrix} \; 2 \tag{2.12}$$

Сила опору руху поїзда від профілю колії i визначається наступним виразом:

$$i \; \begin{matrix} x \\ x-L \end{matrix} \; \text{п п п п} \; nk_n \; n-1k_{n-1} \; n-mk_{n-m}, \tag{2.13}$$

де п – величина ухилу в координаті п;

x – координата голови поїзда;

n, $n-1$, $n-m$ – вага поїзда, що знаходиться, відповідно, на , і ухилі;

– кількість елементів профілю на яких розташовується поїзд.

Аналогічно (2.13) визначається повний опір від кривих в плані r

$$r \; {}_{x-L}^{x} R \qquad (2.14)$$

де R – опір від кривої в плані (фіктивний підйом) координати поїзда .

При довжині поїзда менш або дорівнює довжині кривої

$$R \qquad (2.15)$$

а при довжині поїзда більше довжини кривої

$$R \qquad (2.16)$$

Гальмівна сила , що діє на поїзд, може створюватися електричним – рекуперативним і пневматичним гальмами.

При пневматичному гальмуванні наповнення гальмівного циліндра вагона залежить від його номера в складі поїзда, тому для виконання розрахунків гальмівну силу приймемо у вигляді:

$$_{i}\; i\, i\, i \qquad (2.17)$$

де $_{i}$ – сила, що діє на -й екіпаж при пневматичному гальмуванні;

i – кількість гальмівних колодок -того екіпажу;

i – коефіцієнт тертя гальмівної колодки об колесо;

i – сила натискання на одну гальмівну колодку.

$$i \frac{i}{i}, \qquad (2.18)$$

де A, B, C, D – коефіцієнти, що залежать від типу гальмівних колодок.

Закон зміни сили натискання i, пропорційній тиску повітря в гальмівному циліндрі, залежить від типу розподільника повітря і виду гальмування і відповідає графіку, наведеному на рис. 2.10, [57], де – поточний час руху, п – момент початку включення пневматичних гальм, 0 – момент початку відпустки гальм головного екіпажу поїзда, i – час за яке гальмівна хвиля приходить з головного перетину в -тое, $0i$ – час за який відпускна хвиля приходить з головного перетину в -тое, $1i$ – час за який сила натискання на гальмівну колодку наростає від нуля до максимального значення $\max_i$, $2i$ – час за який триває відпустка гальм.

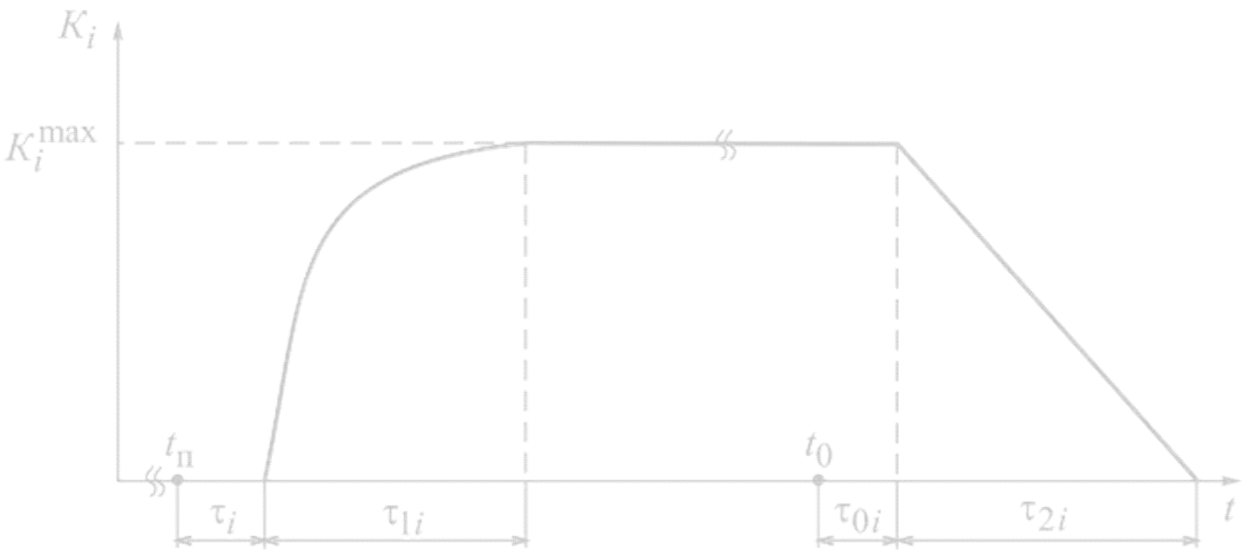


Рисунок 2.10 – Залежність сили натискання гальмівних колодок від часу заповнення гальмівного циліндра

Аналітична залежність i може бути представлена наступним виразом:

$$i \left\{ \begin{array}{l} \text{п}\,i \\ \max_i \; i \;\text{п}\, i\, 1 i \\ \max_i \; i\, 1 i \;\text{п}\, 0\, 0 i \\ \max_i \frac{0\,0 i}{2 i} \; 0 i \; 0\, 0 i\, 2 i \\ 0 i\, 2 i\, 0 \end{array} \right. \qquad (2.19)$$

де [illegible] – параметр, що характеризує швидкість наповнення гальмівного циліндра.

При рекуперативному гальмуванні гальмівна сила визначається виразом [8]:

$$\text{р}\;\text{д}\;\text{д}\left(\frac{\text{с м з}}{}\right). \qquad (2.20)$$

Швидкість руху на режимі рекуперації

$$\frac{\text{с д}}{()}. \qquad (2.21)$$

2.4 Математичний опис характеристик електройїзда

Практично всі розрахунки по раціоналізації управління вимагають значних витрат машинного часу, причому основну частину цього часу займає обчислення значень функцій, що входять в математичну модель об'єкта. До складу математичної моделі руху поїзда по ділянці входять математичні моделі, що являють собою вихідні тягову, швидкісну, магнітну та теплові характеристики.

Інформація про вихідних характеристиках задається не аналітично, а у вигляді кінценої множини вузлових точок, тобто дискретно. У той же час для реалі-

зації обчислювальних алгоритмів раціонального управління потрібно відновити функцію з дискретної множини точок на безперервну область її визначення. Дане завдання апроксимації складних залежностей за емпіричними даними переслідує дві протилежні цілі – точність і швидкодію. У такому вигляді можливі дві постановки: 1) досягнення максимальної швидкодії при заданій величині похибки і 2) забезпечення мінімальної похибки при заданому максимальному часі обчислення. При розробці математичної моделі руху поїзда для використання в алгоритмі раціонального управління необхідне розв'язання першого завдання [9].

Існує два основні способи представлення характеристик тягового рухомого складу. Перший спосіб – у вигляді масиву даних (таблиці), тобто за допомогою кусочно-лінійної апроксимації. Цей спосіб вимагає великого обсягу оперативної пам'яті для зберігання даних. Наприклад, для зберігання однієї кривої з кроком 1 км/год потрібно близько 1 кБ оперативної пам'яті. Другий спосіб – нелінійна апроксимація характеристики поліномом. Ступінь полінома визначається за допомогою методів теорії ймовірності та математичної статистики. Цей спосіб вимагає меншого обсягу пам'яті для зберігання даних і забезпечує досить високу точність розрахунків [9].

Математична постановка даного завдання полягає в побудові деякої функції φ на інтерполяційної сітці заданої у вигляді множини вузлів інтерполяції $0\,1\,2\,n$ зі значеннями функції $0\,0$, $1\,1$, ..., $n\,n$ і виконанням умови:

$$\begin{cases} 0\,0 \\ 1\,1 \\ n\,n \end{cases}$$

де при розрахунках в якості інтерполянтов φ зазвичай використовуються інтерполяційні поліноми Лагранжа або поліноми Чебишена. Однак, використання

інтерполяційних многочленів для заповнення дискретно заданих функцій з конечною ненисокою гладкістю має свої недоліки: по-перше, при великій кількості вузлів інтерполяції спостерігається осциляція многочлена між вузловими точками, а по-друге, велика кількість арифметичних операцій, властиве многочленам високого ступеня, з одного боку збільшує величину похибки машинного розрахунку за рахунок помилок заокруглень, що накопичуються, а з іншого – призводить до пенних витрат часу.

Для того щоб уникнути перерахованих вище недоліків в якості інтерполянтів можна використовувати сплайн-функцію, тобто функцію гладко склеєну з шматків функцій деякого класу, і що проходить через вузли інтерполяції [58]. Наприклад, якщо носієм сплайн-функції є поліном першого ступеня виду $1(\ldots)$,

то сплайн складається з відрізків прямих ліній, що з'єднуються у вузлах інтерполяції рис. 2.11.

Рисунок 2.11 – Геометрична інтерпретація інтерполяції вихідних характеристик сплайн-функціями

Формальне представлення лінійної сплайн-функції має наступний вигляд:

$$(\ldots)\,0\;0\;(\;0\;)\sum_{k=1}^{n-1} k\;(\;k\;)_{+}, \qquad (2.22)$$

$$\begin{pmatrix} k \\ \\ \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k \\ k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k \\ k \end{pmatrix}$$

Для визначення ненідомих коефіцієнтів 0, 1, ..., $n-1$ сплайна складається система рівнянь [9]:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 2 & 1 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ n & 0 & 0 & 2 & 1 & n-1 & n & n-1 & n \end{pmatrix} \tag{2.23}$$

Рішення системи (2.23) досить трудомістким при реалізації чисельного алгоритму на ЕОМ. Тому для збільшення швидкодії підпрограми обчислення функції використовують альтернативну форму подання сплайн-функції, засновану на визначенні сплайна [9]. Тому що на кожному частковому інтервалі інтерполяційної сітки лінійний сплайн є поліномом першого ступеня, то систему рівнянь (2.23) можна представити в наступному вигляді, що забезпечує найкращу швидкодію внаслідок реалізації всього двох арифметичних операцій:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \\ n-1 & n-1 & n-1 \end{pmatrix} \tag{2.28}$$

В роботі пропонується використовувати в якості основної характеристики залежність магнітного потоку тягового електродвигуна в функції струму якоря $\begin{pmatrix} \text{я} \end{pmatrix}$ (див. рис. 2.9), що дозволяє врахувати реакцію якоря в режимі ослабленого збудження. При цьому немає необхідності окремого введення швидкісних і тягових характеристик, тому що величина магнітного потоку входить в рівняння, що описують обидва сімейства характеристик

$$д \tag{2.29}$$

$$д д д р \tag{2.30}$$

де – сила тяги на ободі колеса колісно-моторного блока (КМБ), кН;

д – струм ТЕД, А;

д – напруга ТЕД, В;

д, р – опір котушок ТЕД і пускового реостата, Ом.

Для вибору ступеня полінома, що найбільш точно описує криву намагнічування були проведені розрахунки коефіцієнтів полінома i та середньоквадратичне відхилення полінома від паспортної кривої намагнічування ТЕД 1ДТ.003. Коефіцієнти полінома визначалися за допомогою офісного пакету «MS Excel» методом найменших квадратів. Результати розрахунку зведені в табл. 2.2.

На рис. 2.12 наведені криві намагнічування тягового двигуна 1ДТ.003, побудовані на підставі її апроксимації поліномами різного ступеня. На рис. 2.13 приведена залежність середнього квадратичного відхилення від ступеня полінома, що описує криву намагнічування тягового двигуна. Як видно з наведених даних найменше середньоквадратичне відхилення має поліном п'ятого ступеня.

На рис. 2.14 наведені швидкісні характеристики електропоїзда ЕР2Т для ходових позицій. Суцільними лініями на рисунку показані характеристики, побудовані з використанням виразу (2.30) на підставі кривої намагнічування тягового двигуна 1ДТ.003, апроксимованої поліномом п'ятого ступеня; символами – паспортні криві.

З рисунка видно, що зі збільшенням ступеня ослаблення збудження розбіжність між паспортними і розрахунковими кривими зростає. Причина полягає в тому, що даний метод розрахунку швидкісних характеристик не враховує реакцію якоря, вплив якої зростає зі збільшенням глибини ослаблення збудження.

Для збільшення точності апроксимації характеристик пропонується використовувати сімейство залежностей Для кожного ступеня ослаблення збудження

тягового двигуна розраховується окрема крива з використанням паспортних швидкісних характеристик і виразе (2.30). Перенагою запропонованого способу опису характеристик електрорухомого складу є ще й те, що, як правило, характеристики е.р.с. задані графічним або табличним способом.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку апроксимації магнітної характеристики ТЕД

Ступінь полінома, n	Номер коефіцієнту полінома	Значення коефіцієнту i	Середньоквадратичне відхилення
5	0	3,5737	5,53
	5	$9{,}657\cdot50^{-5}$	
	5	$-5{,}538\cdot50^{-5}$	
3	0	0,8376	0,18
	5	0,5633	
	5	$-1{,}65\cdot50^{-1}$	
	3	$1{,}5\cdot50^{-7}$	
1	0	0,0675	0,55
	5	0,5037	
	5	$-8{,}175\cdot50^{-1}$	
	3	$5{,}677\cdot50^{-6}$	
	1	$-5{,}535\cdot50^{-9}$	
5	0	–0,0697	0,5
	5	0,559	
	5	$-5{,}083\cdot50^{-3}$	
	3	$5{,}986\cdot50^{-6}$	
	1	$-1{,}558\cdot50^{-9}$	
	5	$5{,}155\cdot50^{-55}$	
6	0	0	5,5
	5	0	
	5	$3{,}655\cdot50^{-3}$	
	3	$-3{,}358\cdot50^{-5}$	

1	$5{,}573 \cdot 50^{-7}$
5	$-5{,}599 \cdot 50^{-50}$
6	$5{,}157 \cdot 50^{-53}$

Рисунок 2.12 – Результати апроксимації магнітної характеристики ТЕД поліномами

Рисунок 2.13 – Зміна середньоквадратичного відхилення в залежності від ступеня полінома

Рисунок 2.14 – Швидкісна характеристика електропоїзда ЕР2Т для ходових позицій, апроксимована поліномом п’ятого ступеня

На рис. 2.15 наведено сімейство залежностей магнітного потоку тягового двигуна 1ДТ.003 від струму збудження. Для практичних розрахунків зручніше мати залежності магнітного потоку від струму якоря. На рис. 2.9 наведені залежності $_{я}$ тягового двигуна 1ДТ.003, а на рис. 2.16 – швидкісні характеристики електропоїзди ЕР2Т для ходових позицій, розраховані на підставі зазначених залежностей.

Для зменшення обсягу попередніх обчислень з апроксимації характеристик електрорухомого складу необхідно знати межі, в яких можливі зміни струмів якоря та збудження ТЕД при експлуатації е.р.с. За основу можна взяти залежність струму збудження від струму якоря тягового двигуна, яка має вигляд, наведений на рис. 2.16. На графік наносяться обмеження по максимальному струму якоря $я max$ і максимальної швидкості руху max. Таким чином можливо визначити діапазон зміни струмів, всередині якого точність апроксимації характеристик електрорухомого складу має перенажне значення рис. 2.17, 2.18.

Рисунок 2.15 – Залежності магнітного потоку тягового двигуна 1ДТ.003 від струму збудження

Рисунок 2.16 – Швидкісна характеристика електропоїзда ЕР2Т для ходових позицій, що побудована на основі магнітної характеристики, апроксимованої поліномом п’ятого ступеня

Рисунок 2.17 – Схема для визначення меж зміни струмів якоря та збудження ТЕД при експлуатації е.р.с.

Рисунок 2.18 – Тягова характеристика електропоїзда ЕР2Т

Для перенірки достовірності методу апроксимації характеристик електрорухомого складу на підставі сімейства залежностей $\omega_я$ розрахована тягова характеристика електропоїзда ЕР2Т, яка наведена на рис. 2.18. Рис. 2.16 і 2.18 показують правомірність використання залежності магнітного потоку від струму якоря тягового двигуна як універсальної характеристики для тягових розрахунків на ЕОМ.

3 РОЗРАХУНОК РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РУХУ ЕЛЕКТРОПОЇЗДА ЗА ДОПОМОГОЮ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ

3.1 Передумљи впрљадження раціоњльних режимґ ведення

Оптимізація режимів водіння поїздів – один із найважливіших факторів, що забезпечують значне скорочення енерговитрат на тягу поїздів. Основними принципами такого водіння, які не втратили свого значення із часів парової тяги, є зрушення з місця й розгін поїзда з високим прискоренням, якомога більший за тривалістю рух у режимі вибігу й гальмування із низьких швидкостей руху до зупинки поїзда з максимально можливим уповільненням. Одним із факторів економного водіння є використання кінетичної енергії поїзда [6].

Маршрутом кожного поїзда обов'язково передбачаються пункти, при проходженні яких необхідно знизити швидкість руху або зупинитися (наприклад, у зв'язку з ремонтно-будівельними роботами колії та з низки інших причин). Перед прибуттям на зазначені пункти доцільно перейти з режиму тяги на вибіг за рахунок кінетичної енергії, що витрачається на подолання опору руху. Виконання запропонованого маршруту руху може супроводжуватися як економією енергії тяги, так і скороченням енерговитрат на гальмування.

Інший фактор економії – використання потенційної енергії. На ділянках, де достатні ухили, є доцільним переходити з режиму тяги в режим вибігу задовго до початку ухилу. У цьому випадку рух поїзда на підйомі, що передує ухилу, відбувається за інерцією з поступовим падінням швидкості, що після виходу поїзда з підйому на ухил знову зростає до запланованого графіком значення. Це часто дозволяє уникнути підгальмовування состава наприкінці ухилу. Як наслідок, забезпечується економія енергії і в режимі тяги, і в режимі гальмування.

Оскільки при розглянутих способах руху час перебування состава в русі збільшується, можливість скорочення енерговитрат буде повністю залежати від резервів часу, що виникають у ході реалізації графіка руху.

3.2 Узагальнењ структура та короткий опис апаратно-програмного

комплексу й розрахунку раціоньльних режимґ ведення

Визначення раціональних режимів ведення приміських поїздів пропонується виконати за допомогою апаратно-програмного комплексу з розрахунку раціональних режимів ведення поїзда електровозом і видачі режимних карт [59], попередньо виконав його адаптацію до умов приміського руху.

Відповідно до математичної моделі, наведеної у попередньому розділі, алгоритм вирішення задачі вибору режиму ведення поїзда в апаратно-програмному комплексі заснований на методах нелінійного програмування на основі множників Лагранжа і векторної оптимізації за критерієм мінімуму витрат енергоресурсів при заданому часу ходу.

Розрахунки виконуються по ділянках будь-якої залізничної мережі, попередньо занесеною в базу даних комплексу за напрямками. Система дозволяє виводити на монітор, файл і на друк фізико-механічні (дійсна координата знаходження поїзда, обмеження швидкості, дійсна швидкість руху, режим управління, струми ТЕД і електровоза, напруга на струмоприймачі, витрати часу) і енергетичні параметри (витрата і рекуперація електроенергії) руху поїзда, як по ділянці в цілому, так і вигляді детальної таблиці для кожного пікету ділянки. Подання розрахункових та виміряних значень в вигляді графічних залежностей отриманих величин і у вигляді агрегованих таблиць і режимних карт для локомотивної бригади забезпечують можливість виконання оперативного аналізу зазначених параметрів руху.

Апаратно-програмний комплекс має наступні основні функціональні можливості:

– введення та коригування нормативно-довідкової інформації по ділянках і напрямках залізниці;

– реєстрацію та обробку параметрів руху та ділянки, таких як дійсні швидкість руху, струм поїзда, струм ТЕД, напруга на струмоприймачі, сигналів АЛС (зі збереженням в базі даних);

– розрахунок фізико-механічних і енергетичних показників руху поїзда безпосередньо перед поїздкою і коригування в процесі поїздки, зокрема, розраху-

нок рекомендованого значення швидкості та режимів управління по раціональної траєкторії, часів ходу поїзда, витрат і рекуперації електроенергії (із збереженням результатів в базі даних).

Апаратно-програмний комплекс складається з чотирьох частин (рис. 3.1):

– нормативно-довідкової бази даних;
– модуля введення і коригування нормативно-довідкової інформації;
– модуля розрахунку;
– модуля реєстрації параметрів руху та умов проходження ділянки.

Рисунок 3.1 – Склад апаратно-програмного комплексу

Структура апаратної частини та включення пристроїв комплексу в схему електропоїзда приведена на рис. 3.2.

Рисунок 3.2 – Структура апаратної частини і включення пристроїв комплексу в схему поїзда:

1, 2 – датчики LEM відповідно струму та напруги (модулі вимірювань); 3 – фотоприймач значень струму і напруги (приймально-передавальний модуль); 4 – датчики швидкості, позиції контролера машиніста і показань АЛС (модуль введення дискретних сигналів); 5 – перетворювач інтерфейсів; 6 – обчислювальний пристрій

При виконанні поїздки програмне забезпечення здійснює почергової опитування приладів вимірювання силових струмів і напруг 3, швидкості, положення контролера машиніста і показань АЛС 4, підключених через загальну лінію зв'язку до COM-порту обчислювального пристрою.

Приймально-передавальний модуль МПП-1М призначений для прийому і обробки інформації, що надходить з модулів вимірювання струму і напруги, а також передачі обробленої інформації на верхній рівень вимірювальної системи за допомогою інтерфейсу RS485.

Опитування виконується посилкою в лінію зв'язку коду виклику, в якому міститься адреса викликається пристрою. Всі прилади приймають викличний код і беруть із нього адресу пристрою. Той прилад, чия унікальна внутрішня адреса збігається з викличних, починає передавати дані. Дані передаються з деякою затримкою в часі, необхідної для перемикання програмно-апаратних засобів обчислювального пристрою з режиму передачі в режим прийому. Залежно від значень реального рівня напруги в контактній мережі і показань АЛС попередня оптимальна траєкторія руху перераховується.

Датчики та блок збору інформації не впливають на роботу пристроїв е.р.с. та забезпечують гальванічну розв'язку між ланцюгами локомотиву і АПК, забезпечують надійне зняття інформації в умовах експлуатації на е.р.с.

В якості датчиків швидкості використовується, встановлений на буксі, оптичний перетворювач швидкості обертання колісної пари, а також GPS пристрій. Через модуль введення дискретних сигналів МДС-1М інформація поступає в персональний комп'ютер, де і розраховується фактична швидкість руху.

Для виміру струму та напруги в силовому ланцюзі поїзда використовуються модулі введення аналогових сигналів МИЗ-1М, що підключаються через стандартні шунти струму і напруги.

Прийомо-передавальний модуль МПП-1М призначений для прийому і обробки інформації, що поступає з модулів виміру струму і напруги, а також передачі обробленої інформації на верхній рівень вимірювальної системи за допомогою інтерфейсу RS485.

Модуль введення дискретних сигналів МДС-1М призначений для введення сигналів про положення контролера машиніста, сигналу з дискретного датчика швидкості і передачі за допомогою інтерфейсу RS485 на верхній рівень системи вимірів, також виконує гальванічну розв'язку між вхідними ланцюгами і обчислювальною частиною.

На рис. 3.3 наведено розташування датчиків у високовольтній шафі моторного вагона поїзда, а на рис. 3.4 – схема включення датчиків у високовольтної шафі вагона електропоїзда.

Введення параметрів електропостачання виконується в наступному вікні (рис. 3.5). Для вибраної ділянки електропостачання вводяться наступні дані:

найменування підстанції; напруга холостого ходу і еквівалентний опір підстанції; пікет підключення фідера.

Рисунок 3.3 – Розташування датчиків у високовольтній шафі моторного вагона поїзда

Для оперативного розрахунку режимних карт, реєстрації і відображення параметрів руху програмний комплекс необхідно перенести в режим «Порадника» шляхом активації кнопки «Автомашиніст». При цьому переходимо на головне вікно, представлене на рис. 3.6. У цьому вікні вводяться максимально допустима швидкість на ділянці, середня швидкість, уставка швидкості до обмеження по максимальній.

Рисунок 3.4 – Схема включення датчиків у високовольтної шафі вагона електропоїзда

Рисунок 3.5 – Вікно введення параметрів електропостачання

Рисунок 3.6 – Попередні результати визначення режимів ведення

Раціональна траєкторія руху розраховується натисненням кнопки «Траєкторія». Після цього в головному вікні «Автомашиніста» відображається крива швидкості та струму (рис. 3.7). Для розрахунку оптимальної траєкторії ведення поїзда реалізована методика виконання тягового розрахунку, що дозволяє отримувати сімейство траєкторій руху для двох критеріїв: витрати енергії на тягу і часу ходу. Математична модель руху враховує усі існуючі режими ведення поїзда, можливість аналізу їх довільних комбінацій, забезпечує високу швидкість і достатню точність обчислень, а також заданий час руху поїзда по ділянці, передбачає використання кратної тяги, підштовхування і перенірки перегрівання тягових електричних машин.

Внизу вікна видається інтегральний профіль колії з вказівкою осей розділь-них пунктів.

Рисунок 3.7 – Головне вікно АПК

Інформаційно-вимірювальний комплекс запускається натисненням кнопки «Старт». При цьому під час виконання поїздки (рис. 3.8) вверху вікна відображаються: поточна швидкість руху, координата голови поїзда, схема включення ТЕД, поле послаблення, струми двигуна та е.р.с., напруга контактної мережі. У середній частині вікна у вигляді графіків в залежності від пікетажу відображаються рівень напруги, значення швидкості та струму.

Внизу вікна на інтегральній кривій профілю точкою відображається поточна координата положення голови поїзда з індикацією шляху того, що залишився до обмеження швидкості і світлофора. Координата поїзда розраховується на підставі даних, що поступають від швидкостеміра.

При виконанні поїздки відображається відповідність оптимальної траєкторії, а також небезпечного наближення до обмеження швидкості, у вигляді візуальних і голосових підказок по управлінню е.р.с.

Рисунок 3.8 – Головне вікно в процесі поїздки

АПК окрім побудови раціональних режимних карт і роботи в якості «порадника» машиніста дозволяє вирішувати наступні основні завдання:

– визначити поелементні втрати енергії в системі електричної тяги як в е.р.с. (механічні, електричні, магнітні та ін.), так і в системі електропостачання (підстанціях, тяговій мережі, живлячих лініях);

– розрахувати функціональні характеристики струмів для довільних перерізів контактної мережі (середній струм, середньоквадратичний струм);

– розрахувати функції напруги на струмоприймачі рушійного е.р.с. заданої маси і умов руху. Окремо розраховуються функції втрат напруги від власного струмоспоживання та викликаного впливом супутніх поїздів;

– розрахувати струм живлячої лінії підстанції у вигляді функції (від відстані до е.р.с.) при проходженні повз неї розрахункового поїзда. Може бути використаний для визначення максимальних робочих струмів живлячої лінії;

– досліджувати параметри системи електропостачання при зміні характеру

потоку поїздів від регулярного до експоненціального;

– досліджувати вплив рівня напруги на шинах тягових підстанцій на ефективність функціонування системи електричної тяги. При цьому коректно виконується тяговий розрахунок завдяки використанню магнітної характеристики двигунів на відміну від фіксованих характеристик в ПТР;

– досліджувати вплив швидкісних обмежень при русі, а також маси поїздів для реального профілю розрахункової ділянки;

– досліджувати вплив різних факторів моделі ведення поїзда з метою навчання машиністів принципам оптимального водіння.

3.3 Визначення раціональних режимів ведення для заданої ділянки

АПК в депо можна застосувати за двома технологіями. За першою технологією можливості АПК використовуються у повному обсязі шляхом встановлення апаратної частини на одиницю е.р.с. і навчання раціональним режимам ведення машиністів безпосередньо в процесі виконання поїздок з урахуванням пенних умов проходження ділянки в реальному масштабі часу. За другою технологією в депо використовується тільки програмна частина комплексу, шляхом встановлення її на комп'ютері робочого місця теплотехніка. Перед поїздкою за допомогою АПК формується режимна карта в табличному вигляді з урахуванням існуючих обмежень швидкості на ділянці, параметрів состава та системи енергопостачання, і видається машиністу. Також можливо поєднання цих технологій, що надасть ще більший економічний ефект.

Для визначення ефективності використання АПК за допомогою програмної частини комплексу були розраховані раціональні режими ведення і відповідні витрати електроенергії за поїздку для заданої ділянки обслуговування. Отримані результати порівняно з даними реальних поїздок, які отримувалися з маршруту машиніста. Після їх обробки, встановлено, що економія енергоресурсів за поїздку в результаті використання рекомендацій відносно режимів ведення поїзда сформованих апаратно-програмним комплексом може складати від чотирьох до десяти відсотків в залежності від часу хода поїзда та характеристик ділянки.

4 РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ДЕПО Н НА ДІЛЯНЦІ З-Н-К

Вихідні дані для розрахунків

Характер руху

Довжина ділянок, км, на ділянці:

– Н-З, $l_{н\ з}$

– Н –К, $l_{н\ к}$

Ділянкова швидкість, км/год:

– у парному напрямку, $v_{д\ 1}$

– у непарному напрямку, $v_{д\ 2}$

Серія електропоїзда

Маса електропоїзда, т

Кількість пар електропоїздів

4.1 Розташування пунктів технічного обслуговування ТО-2 електропоїздів

Вибираємо кільцевий спосіб обслуговування електропоїздів. При цьому способі ТО-2 та екіпіровка здійснюється в оборотному депо.

Цей спосіб найбільш ефективний з точки зору використання електропоїзда (менший простій, середньодобовий пробіг та продуктивність електропоїзда на 15% більша при цьому способі, ніж при використанні інших способів обслуговування).

Також перенагою цього способу обслуговування є те, що необхідний менший парк електропоїздів, а коефіцієнт готовності є найвищим.

Час повного обороту електропоїзда на ділянці З-Н-К визначаємо за формулою [15, 16]:

$$T_{п}=t_{д\ в}+t_{о\ с}+t_{о\ б}, \qquad (4.1)$$

де $t_{д\ в}$ – час в дорозі на ділянці в парному та непарному напрямках, год;

$t_{о\ с}$, $t_{о\ б}$ – час простою на станціях основного та оборотного депо.

$$t_{д\ в}=t_{н\ з}+t_{з\ н}+t_{н\ к}+t_{к\ н}, \qquad (4.2)$$

Час руху електропоїзда в напрямках Н-З та Н-К визначаю за формулами:

$$t_{Н\ З}=\frac{l_{Н\ З}}{V_Д}, \quad (4.3)$$

$$t_{Н\ К}=\frac{l_{Н\ К}}{V_Д}. \quad (4.4)$$

Отже, отримаємо:

$$t_{Н\ З}=\frac{\ }{36}=2{,}30=2\ г\ о\ д\ 19\ х\ в;$$

$$t_{З\ Н}=\frac{\ }{\ }=2{,}44=2\ г\ о\ д\ 27\ х\ в;$$

$$t_{Н\ К}=\frac{\ }{34}=3{,}15=3\ г\ о\ д\ 09\ х\ в;$$

$$t_{К\ Н}=\frac{\ }{36}=2{,}97=2\ г\ о\ д\ 58\ х\ в.$$

Час у дорозі на ділянці в парному та непарному напрямку

$$t_{Д\ В}=2{,}30+2{,}44+3{,}15+2{,}97=10{,}22=10\ г\ о\ д\ 13\ х\ в.$$

Повний оборот електропоїзда на ділянці З-Н-К

$$T_П=10{,}22+1+10=20{,}22=21\ г\ о\ д\ 13\ х\ в.$$

Тому що періодичність виконання ТО-2 електропоїздів повинна знаходитися в межах 24...72 годин, то ТО-2 виконується в одному оборотному депо.

4.2 Розташувцня проміжних пунктґ зміни локомотивних бригад

Необхідність організації проміжних пунктів зміни локомотивних бригад на ділянках Н −З та Н−К визначаємо з урахуванням часу проходження електропоїздів по цих ділянках, знаючи час, який допускається для безперервної роботи локомотивної бригади. Схема обслуговування ділянок електропоїздами та локомотивними бригадами наведена на рис. 4.1.

□ – станція основного депо;

○ – пункт обороту електропоїзда;

——— – оборот електропоїзда на ділянці обертання;

— — – захід електропоїзда в основне депо на ремонт;

- - - - – оборот локомотивних бригад

Рисунок 4.1 – Схема обслуговування ділянок електропоїздами та локомотивними бригадами

Довжину ділянок, які обслуговуються локомотивними бригадами, обираємо такою, щоб час безперервної роботи бригади (в один бік) не перебільшував (з урахуванням приймання та здаванням локомотива) 2…3 годин, а безпосередньо в дорозі бригада знаходилась, як правило, не більше 6 годин.

4.3 Складцня розкладу та йбудља графіка руху йїздґ нь ділянці обороту

Розклад руху поїздів складаємо для ділянок З-Н, Н-К з урахуванням раніше розрахованого часу руху по ділянкам. Час стоянки на станції основного депо Н приймаємо 30 хв.

Розклад руху електропоїздів зводимо в таблицю 4.1.

На основі розкладу руху електропоїздів побудований скорочений графік руху електропоїздів, наведений на рис. 4.2.

Графік руху електропоїздів визначає послідовність та час займання електропоїздами перегонів, час прибуття, відправлення та стоянки по кожному роздільному пункті. Робота електропоїздів організовується на основі їх графіка руху.

4.4 Складання розрахункових відомостей роботи електропоїздів на ділянках

На підставі аналізу графіка руху електропоїздів, обліку простою електропоїздів в оборотних та основних депо, часу роботи локомотивних бригад складаються розрахункові відомості роботи електропоїздів на ділянках обертання Н-З та Н-К по формі ЦДЛ №1.

Складаючи відомості необхідно передбачити найбільш раціональне використання електропоїздів при виконанні заданих розмірів руху, з тим щоб простій електропоїзда в пунктах обороту З і К був по можливості найменшим.

Норма простою електропоїздів повинна врахувати виконання ТО-2, час для проходження по станційним коліям по прибуттю та перед відправленням.

Екіпіровку рекомендується поєднувати з ТО-2.

В кінці відомостей підраховується сумарний час в дорозі та простої на станціях основного та оборотного депо.

Відомості обороту електропоїздів наведені в таблицях 4.2 та 4.3.

4.5 Розробка графіка обороту та визначення кількості робочих електропоїздів для заданих розмірів руху

На підставі розрахункових відомостей роботи електропоїздів розроблений типовий графік обороту електропоїздів депо Н на ділянці обертання (рис. 4.3).

Отримана кількість горизонтальних рядків графіка відповідає необхідній кількості електропоїздів експлуатаційного парку e, необхідних для обслуговування всіх графікових електропоїздів протягом однієї доби.

Рисунок 4.2 – Скорочений графік руху поїздів

Необхідна кількість електропоїздів, які експлуатуються, визначена також аналітичним способом.

На підставі відомостей обороту електропоїздів на ділянках Н-З та Н-К підраховується час в годинах, який тратиться електропоїздом на обслуговування, передбачених графіком на дільниці обороту [15]:

$$\sum T = \Sigma t_1 + \Sigma t_2 + \Sigma t_{38}, \quad (4.5)$$

де $_1$ − сумарний простій електропоїздів на станції основного депо Н (при прямуванні поїздів до станції З);

t_2 − сумарний час в дорозі від станції основного депо Н до станції обороту З;

$_3$ − сумарний простій електропоїздів по станції обороту З;

$_4$ − сумарний час знаходженні електропоїздів в дорозі від станції обороту до станції основного депо Н;

$_5$ − сумарний простій електропоїздів на станції основного депо Н (при прямуванні поїздів до станції К);

$_6$ − сумарний час в дорозі від станції основного депо Н до станції обороту К;

$_7$ − сумарний простій електропоїздів на станції обороту К;

$_8$ − сумарний час знаходженні електропоїздів в дорозі від станції обороту К до станції основного депо Н.

$$\sum T = 2{:}30 + 11{:}35 + 44{:}510 = 14 \text{ год.}$$

Кількість електропоїздів парку експлуатації отримаємо за формулою:

$$M_e = \frac{\sum T}{24} = \frac{}{24} = 6 \text{ лок.} \quad (4.6)$$

Потрібна кількість електропоїздів визначена по графіку обороту співпадає з кількістю електропоїздів, вирахуваних аналітичним способом.

4.2.6 Розрахунок явочного та списочного штату бригад

До явочного контингенту відносяться локомотивні бригади, які зайняті на роботі, беруть участь в процесі приймання-здачі, технічного обслуговування локомотивів, та які знаходяться на відпочинку після роботи [15].

Потрібна кількість локомотивних бригад $Ч^{я\ в}_{б\ р}$ для заданих розмірів руху на дільниці обертання при змінному обслуговуванні електропоїздів визначається за формулою:

$$Ч^{я\ в}_{б\ р}=\frac{30{,}4\cdot\sum T_{б\ р\ г}}{168{,}9}, \tag{4.7}$$

де $б\ р\ г$ – добова сумарна кількість бригадо-годин;

30,4 – середньорічна кількість діб в місяці;

168,9 – середній місячний фонд робочого часу однієї бригади, год.

$$\sum T_{б\ р\ г}=\Sigma t_2+\Sigma t_4+\Sigma t_6+\Sigma t_8+\sum t_{д\ о\ д}, \tag{4.8}$$

де $t_{д\ о\ д}$ – додатковий час роботи бригад на приймання та здачу електропоїздів на станціях Н, З, К.

На приймання та здачу електропоїзда встановлюється час на більше 30 хвилин на станції основного депо та в пунктах обороту електропоїздів.

Для даної схеми обслуговування ділянок локомотивними бригадами

$$\sum t_{д\ о\ д}=0{,}5\cdot 2\cdot 4N, \tag{4.9}$$

де . – розміри руху, пар поїздів в добу.

$$\sum t_{д\ о\ д}=(0{,}5\cdot 2\cdot 4)\cdot 5=20 \text{ год};$$

$$\sum T_{б\ р\ г}=11{:}35+12{:}15+15{:}45+14{:}50+20=73{,}45 \text{ год};$$

$$Ч^{яв}_{бр}=\frac{30{,}4\cdot 73{,}40}{168{,}9}=13{,}21 \text{ бр.}$$

Приймаємо $Ч_{я\ в}_{б\ р}$ = 14 бригади.

4.2.7 Основні показники роботи електропоїздів

Для оцінки експлуатаційної діяльності локомотивного господарства введені кількісні (об'ємні) та якісні показники [16].

Річний пробіг електропоїздів, які обслуговують задану ділянку обертання визначається за формулою:

$$\sum MS_{р\ і\ ч} = 365 \cdot 2 \cdot N \cdot \left(l_{н\ з} + l_{н\ к} \right) \cdot \left(1 + \beta_д \right), \qquad (4.10)$$

де $\beta_д$ − коефіцієнт, який враховує допоміжний пробіг електропоїзда ; приймаємо $_д$ =0,08 [15].

$$\sum MS_{р\ і\ ч} = 365 \cdot 2 \cdot 5 \cdot (83 + 107) \cdot (1 + 0{,}08) = 748980 \text{ км}.$$

Річна робота електропоїзда в локомотиво-годинах

$$T_р = \sum T \cdot 365 \cdot \left(1 + \beta_д \right); \qquad (4.11)$$

$$T_р = 144 \cdot 365 \cdot (1 + 0{,}08) = 56764 \text{ лок·год}.$$

Середньодобовий пробіг електропоїзда на ділянці обороту

$$S_{д\ о\ б} = \frac{2 \cdot \left(l_{н\ з} + l_{н\ к} \right) \cdot N}{M_е}; \qquad (4.12)$$

$$S_{д\ о\ б} = \frac{2 \cdot (83 + 107) \cdot 5}{} = 316 \text{ км/добу}.$$

Середньодобова продуктивність електропоїзда

$$W = S_{д\ о\ б} \cdot Q_{б\ р} = 316 \cdot 468 = 147888 \text{ т·км бр/добу.} \quad (4.13)$$

Час повного обороту електропоїзда в годинах на ділянці обороту

$$T_{п} = \frac{\sum T}{N} = \frac{145}{5} = 29 \text{ год.} \quad (4.14)$$

Коефіцієнт потреби електропоїзда

$$K_{п} = \frac{T_{п}}{24} = \frac{29}{24} = 1{,}20. \quad (4.15)$$

Ділянкова швидкість

$$V_{д} = \frac{V_{д\ 1} + V_{д\ 2}}{2} = \frac{34+36}{2} = 35 \text{ км/год.}$$

Час корисної роботи електропоїзда в годинах за добу визначається за формулою:

$$t_{к\ о\ р} = \frac{S_{д\ о\ б}}{V_{д}} = \frac{315}{35} = 9 \text{ год.} \quad (4.16)$$

Час роботи електропоїзда в чистому русі (за добу) в годинах:

$$t_{ч.\ р.} = \frac{S_{д\ о\ б}}{V_{т}}; \quad (4.17)$$

де $V_{т}$ – технічна швидкість, км/год.

$$V_{т} = 1{,}2 \cdot V_{д} = 1{,}2 \cdot 35 = 42 \text{ км/год.} \quad (4.18)$$

$$t_{ч.\ р.} = \frac{315}{42} = 7{,}52 = 7{:}31 \text{ год.}$$

Добовий бюджет часу електропоїзда є показником, який дозволяє встановити час руху та простоїв електропоїзда за добу. Цей показник розраховується в годинах.

$$t_{ч.\ р.} + t_{з\ м} + t_{п\ р.\ с\ т} + t_{о\ с} + t_{о\ б} = 24, \quad (4.19)$$

де $t_{ч.р.}$ – час роботи електропоїзда в чистому русі за добу, год;

$t_{з\ м}$ – час перебування електропоїзда на проміжних пунктах зміни локомотивних бригад за добу, год;

$t_{п.р.с.т}$ – простій електропоїзда на проміжних станціях за добу, год;

$t_{о\ с}$ – простій електропоїзда за добу на станції основного депо, год;

$t_{о\ б}$ – простій електропоїзда за добу в пунктах обороту З та К, год.

$$t_{з\ м}=\frac{N\cdot\sum t'_{з\ м}}{M_e}=\frac{N\cdot t'_{з\ м}\cdot\rho}{M_e}\ , \qquad (4.20)$$

де $t'_{з\ м}$ – час перебування електропоїзда в одному проміжному пункті зміни бригад, год;

ρ – кількість змін локомотивних бригад у проміжних пунктах за повний оборот електропоїзда.

Тому що $t'_{з\ м}=0$, час перебування електропоїзда в пункті зміні бригад за добу $t_{з\ м}=0$.

Час знаходження електропоїзда на станції основного депо $t_{о\ с}$ та в пунктах обороту $t_{о\ б}$ за добу в годинах розраховується за формулами:

$$t_{о\ с}=\frac{\sum t_1+\sum t_5}{M_e};\qquad (4.21)$$

$$t_{о\ б}=\frac{\sum t_3+\sum t_7}{M_e};\qquad (4.22)$$

$$t_{о\ с}=\frac{2{,}3+2{,}3}{}=0{,}76=14\ \text{хв};$$

$$t_{о\ б}=\frac{44{:}51+39{:}44}{}=13{,}99=13{:}01\ \text{год}.$$

Простій електропоїзда на проміжних станціях за добу

$$t_{п.р.с.т.}=t_{к.о.р}-t_{ч.р.}-t_{з\ м};\qquad (4.23)$$

$$t_{п.р.с.т.}=9-7{:}31-0=2{,}09\ \text{год};$$

7:31+0+2:09+14+13:01=22,55 год.

2.2.8 Ремонт електроїздг

У процесі експлуатації транспортних засобів їх стан погіршується в результаті зносу, поломок деталей та виходу з ладу вузлів та агрегатів. Для усунення цих недоліків передбачена планово-попереджувальна система технічного обслуговування (ТО), поточних ремонтів (ПР), та капітальних ремонтів (КР). Ця система передбачає постановку електропоїздів на ремонт залежно пробігу в кілометрах на пенний вид ремонту або ТО.

Річну програму ремонтів та технічного обслуговування електропоїздів визначається за наступними формулами:

– капітальний ремонт КР-2

$$M_{КР-2}=\frac{\sum MS_{річн}}{L_{КР-2}}, \quad (4.24)$$

– капітальний ремонт КР-1

$$M_{КР-1}=\frac{\sum MS_{річн}}{L_{КР-1}}-M_{КР-2}, \quad (4.25)$$

– поточний ремонт ПР-3

$$M_{ПР-3}=\frac{\sum MS_{річн}}{L_{ПР-3}}-\left(M_{КР-2}+M_{КР-1}\right), \quad (4.26)$$

– поточний ремонт ПР-2

$$M_{ПР-2}=\frac{\sum MS_{річн}}{L_{ПР-2}}-\left(M_{КР-2}+M_{КР-1}+M_{ПР-3}\right), \quad (4.27)$$

– поточний ремонт ПР-1

$$M_{ПР-1}=\frac{e_{заг}}{L_{ПР-1}}-\left(M_{КР-1}+M_{ПР-3}+M_{ПР-2}\right), \quad (4.28)$$

– технічне обслуговування ТО-3

$$M_{ТО-3}=\frac{\sum M_{річ}}{L_{ТО-3}}-\left(M_{КР-1}+M_{ПР-3}+M_{ПР-2}+M_{ПР-1}\right), \quad (4.29)$$

де $\sum M_{річ}$ – річний пробіг електропоїздів, тис км;

$L_{ТО-3}$ – норми пробігу між відповідними видами ремонту та технічними обслуговуваннями, тис км; приймаємо за рекомендаціями [16].

$$M_{КР-2}=\frac{74980}{180000}=0{,}41.$$

Приймаємо $M_{КР-2}=1$ електропоїзд =4 секції.

$$M_{КР-1}=\frac{748980}{600000}=0,.$$

Приймаємо $M_{КР-1}=1$ електропоїзд4 секції.

$$M_{ПР-3}=\frac{748980}{200000}-(1+1)=0{,}49.$$

Приймаємо $M_{ПР-3}=$ 1 електропоїзд =секції.

$$M_{ПР-2}=\frac{748980}{150000}-(1+1+1)=1{,}99.$$

Приймаємо $M_{ПР-2}=2$ електропоїзда= секцій.

$$M_{ПР-1}=\frac{1360}{60}-(4+4+8+4)=24{,}5 \text{ секцій}$$

Приймаємо $M_{ПР-1}=\frac{25}{7}=7$ електропоїздів.

$$M_{ТО-3}=\frac{6\cdot 35}{7}-\left(4+4+4+4+25\right)=37 \text{ секцій}.$$

Приймаємо $M_{ТО-3}=\frac{197}{7}=100$ електропоїздів.

Фронтом ремонту називається кількість електропоїздів, які одночасно знаходяться в даному *i*-му виді ремонту протягом доби

$$f_i=\frac{M_i\cdot t_i}{D_р}, \quad (4.30)$$

де i – річна програма даного i – го виду ремонту, одиниць;

i – простій локомотива у ремонті даного виду;

р – розрахункова кількість робочих днів у році (до 5 днів простою приймаємо такі величини 260,4 дні – за тривалістю зміни 8 годин, а більше 5 днів простій – 365 днів [15]).

$$f_{К Р-2}=\frac{1\cdot 25}{365}=0,8;$$

$$f_{К Р-1}=\frac{1\cdot 12}{365}=0,2;$$

$$f_{П Р-3}=\frac{8\cdot 1}{260,4}=0,030;$$

$$f_{П Р-2}=\frac{2\cdot 8}{260,4}=0,61;$$

$$f_{П Р-1}=\frac{0,\cdot 7}{26,4}=0,03;$$

$$f_{Т О-3}=\frac{0,1\cdot 10}{35}=0,06.$$

Фронт ремонту для ТО-4 та позапланових ремонтів приймаємо як $0,5\cdot f_{П Р-1}$, тоді:

$$f_{Т О-4,П.Р.}=0,5\cdot f_{П Р-1}=0,5\cdot 0,13=0,0.$$

Інвентарний парк електропоїздів $M_{і н в}$ складається з електропоїздів експлуатаційного парку, електропоїздів, які знаходяться в ремонті $M_{р е м}$, електропоїздів, які знаходяться в резерві управління залізниці $M_{р е з}$ та в запасі Укрзалізниці $M_{з а п}$, тобто

$$M_{і н в}=M_{е}+M_{р е м}+M_{р е з}+M_{з а п}; \qquad (4.31)$$

$$M_{р е м}=\sum f_i,$$

де i – фронт відповідного ремонту, технічного обслуговування та позапланового

ремонту.

Кількість електропоїздів, що знаходяться в резерві управління залізниці, приймаємо 10% від M_e, а число електропоїздів запасу Укрзалізниці – 5% від M_e [16].

$$M_{рем}=0{,}068+0{,}032+0{,}030{,}046+0{,}006=0{,}26.$$

Приймаємо $M_{рем}=1$ електропоїзд= 4 секції.

$$M_{рез}=0{,}1\cdot 6\approx 1 \approx \text{секції};$$

$$M_{зап}=0{,}05\cdot 6\approx 1 \approx \text{секції};$$

$$M_{інв}=6+1+1+1=9 .= \text{секцій}.$$

Відсоток несправних електропоїздів, що знаходяться в деповському ремонті:

$$\alpha_{деп}=\frac{f_{ПР-3}+f_{ПР-2}+f_{ПР-1}+f_{ТО-3}+f_{ТО-4}+f_{П.Р.}}{M_e+M_{рем}+M_{рез}}\cdot 100; \qquad (4.32)$$

$$f_{п.р}\approx 0{,}5\cdot f_{ПР-1};$$

$$\alpha_{деп}\frac{0{,}030+0{,}061+0{,}013+0{,}046+0{,}006+0{,}006}{1+6+1}\cdot 100=2{,}31\%.$$

Відсоток несправних електропоїздів, що знаходяться в заводському ремонті:

$$\alpha_{зав}=\frac{f_{КР-2}+f_{КР-1}}{M_e+M_{рем}+M_{рез}}\cdot 100=\frac{0{,}068+0{,}032}{6+1+1}\cdot 100=1{,}25\%. \qquad (2.33)$$

Загальний відсоток несправних електропоїздів:

$$\alpha_{заг}=\alpha_{зав}\alpha_{деп}=_{1{,}25+2{,}31=3{,}56}\%. \qquad (2.34)$$

Графік постановки на ремонт (рис. 4.4) складаний на весь інвентарний парк електропоїздів із врахуванням місячної програми ремонту, технічного обслуговування, рівномірного завантаження робочих та устаткування протягом мі-

сяця та кожної доби. Для рівномірного завантаження ремонтних бригад начальнику депо дозволяється при визначенні місячної програми та складанні графіка ремонту змінювати пробіги або строки між ремонтами в межах 10% від встановлених норм [16].

Рисунок 4.4 – Графік постановки електропоїздів

ВИСНОВКИ

Аналіз інформаційних джерел, опублікованих у нашій країні і за кордоном, показав, що резерви економії енергоресурсів на тягу поїздів ще не вичерпані, а використання оптимальних режимів ведення поїздів є основним фактором зниження їх витрати. Причому додаткову економію можна отримати шляхом індивідуальної оптимізації режимів ведення окремого поїзда для реальних умов експлуатації з урахуванням впливу напруги в контактній дроті на основні техніко-економічні та теплові характеристики. Сучасний рівень розвитку засобів обчислювальної техніки дозволяє широко використовувати інформаційно-обчислювальні комплекси на базі ПЕОМ для розрахунку енергооптімальних режимів. Аналіз робіт в області оптимального управління показує, що для вирішення завдання пошуку оптимальної програми ведення поїзда по ділянці найбільш перспективними є багатокрокові схеми і алгоритми оптимізації, засновані на динамічному програмуванні і його модифікацій. Порівняння різних моделей поїзда показує, що найбільшу похибка в розрахунку швидкості і функціоналу ефективності управління допускає модель у вигляді матеріальної точки, а найкраще збіг дають дискретні моделі у вигляді гнучкої нерастяжимой нитки зі змінною погонной масою і схема «поїзд - ланцюжок твердих тіл», проте ефективна реалізація останньої викликає пенні обчислювальні труднощі.

Розглянуті вимоги до моделі руху поїзда та виконана її узагальнена характеристика. Для побудови моделі руху поїзда розглянути специфіка приміського руху та особливості режимів ведення приміських поїздів. Особливості приміського руху визначають технічні характеристики електропоїздів. Потужність їх тягових двигунів, яка припадає на одиницю маси, вище, ніж у будь-якого локомотива. Режим руху електропоїзда по конкретному перегону вибирається відповідно до заданого часу ходу та особливостями перегону. Різноманітність режимів руху електропоїзда в експлуатації визначається багатьма факторами. Все різноманіття перегонів, на яких експлуатуються електропоїзди можна поділити на дві групи: перегони, на яких можливе виконання заданого часу ходу при одноразовому включенні тягових двигунів (за одне підключення) і перегони, на яких потрібно

багаторазове включення тягових двигунів (два і більше підключень). Режим руху з чергуванням тяги та вибігу може бути характерний для перегонів, що мають обмеження швидкості як по всій довжині, так і на окремих ділянках. При наявності обмеження швидкості на перегоні в режимі руху можлива поява фази регулювального гальмування перед обмеженням. Наявність або відсутність цієї фази залежить від величини обмеження, місця його розташування на перегоні і часу ходу по перегону.

Проаналізовано вплив режиму ведення поїзда на складові витрат електроенергії. Встановлено, що співвідношення складових витрат значно змінюється в залежності від довжини перегону. При найбільш поширеній довжині близько 3 км сума пускових і гальмівних втрат становить приблизно 7%, тобто перенажає в загальній витраті енергії. Зі збільшенням відстані між зупинками частка цих втрат знижується, але навіть при довжині перегону 8,9 км вони залишаються досить великими – близько 32 %.

Спосіб тягових розрахунків, що використовується при виборі режимів руху електропоїзда повинен забезпечувати достатню точність розрахунків, максимальну швидкодію і компактне представлення інформації в пам'яті ЕОМ. Для сучасних ЕОМ, що володіють високою швидкодією найбільш актуальна компактність подання інформації в пам'яті.

Виконано аналіз двох основних складових об'єкта математичної моделі руху поїзда по ділянці – поїзд і середовище руху; сформульовані основні вимоги до математичної моделі руху. На підставі вимог сформована і адаптована для проведення тягово-оптимізаційних розрахунків математична модель руху поїзда по ділянці, яка враховує рівень напруги в контактній мережі, виконано її дослідження в режимі тяги, холостого ходу, пненматичного і рекуперативного гальмування.

Встановлено, що найбільш компактно інформація про характеристики е.р.с. може бути представлена у формі сімейства залежностей магнітного потоку від струму якоря для всіх ступенів ослаблення збудження, апроксимованих поліномом п’ятого ступеня.

Визначення раціональних режимів ведення приміських поїздів виконано за

допомогою апаратно-програмного комплексу з розрахунку раціональних режимів ведення поїзда електровозом і видачі режимних карт, попередньо виконав його адаптацію до умов приміського руху.

Відповідно до математичної моделі, наведеної у попередньому розділі, алгоритм вирішення задачі вибору режиму ведення поїзда в апаратно-програмному комплексі заснований на методах нелінійного програмування на основі множників Лагранжа і векторної оптимізації за критерієм мінімуму витрат енергоресурсів при заданому часу ходу.

Розроблена схема включення датчиків апаратно-програмного комплексу в електричне коло електропоїзда та виконано їх компонування у високовольтній шафі вагона електропоїзда.

Для визначення ефективності використання АПК за допомогою програмної частини комплексу були розраховані раціональні режими ведення і відповідні витрати електроенергії за поїздку для заданої ділянки обслуговування. Отримані результати порівняно з даними реальних поїздок, які отримувалися з маршруту машиніста. Після їх обробки, встановлено, що економія енергоресурсів за поїздку в результаті використання рекомендацій відносно режимів ведення поїзда сформованих апаратно-програмним комплексом може складати від чотирьох до десяти відсотків в залежності від часу хода поїзда та характеристик ділянки.

З метою поліпшення показників роботи депо проведені експлуатаційні розрахунки. Визначено розташування пунктів технічного обслуговування, розташування проміжних пунктів зміни локомотивних бригад. На основі отриманих розрахунків складаний розклад руху та побудован графік обороту на ділянці, складено відомості роботи на ділянках, побудовано графік обороту електропоїздів, розраховано явочний та списочний штат. Розраховані основні показники роботи електропоїздів, річна програма ремонту та на основі отриманих результатів побудован графік постановки на ремонт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1 Програма енергозбереження на залізничному транспорті України / Міністерство транспорту України, Державна Адміністрація Залізничного транспорту України. – Київ: АТ «Укрзалізниця», 2019. – 20 с.

2 Бобирь Д. В., Грищенко М. А. , Сердюк В. Н. Теорія локомотивної тяги : підручник. – Дніпро: Дріант, 2022. – 386 с.

3 Бобирь Д. В., Білоконь І. М., Очкасов О. Б., Сердюк В. Н. Теорія локомотивної тяги. Тягові розрахунки для маненрової роботи : навч. посіб. Дніпро : Дріант, 2023. 130 с.

4 Бобирь Д. В., Капіца М. І., Сердюк В. Н. Теорія локомотивної тяги. Тягові розрахунки для промислового залізничного транспорту : навч. посіб.. Дніпро : Дріант, 2022. 113 с.

5 Теорія локомотивної тяги : методичні рекомендації для виконання розрахунково-графічної роботи та дипломного проєктування / уклад. Д. В. Бобирь, М. І. Капіца, В. Н. Сердюк. Дніпро : УДУНТ, 2022. 59 с

6 Horn Peter. Üer die Aswendung den Maximum-Prinzipe von Pontrjagin zur Ermittlung von Algorithmen für eine energieoptimals Zugsteuerung // Vias. Z. Hochsch. Verkehram. Dresden, 1971. V. 18, № 4, s. 919–934.

7 Jonson C. D. Theory of disturbance – accommoding controllers // Advanced in control and dynamic systems. Vol. 12 – Academic Press, 1976. – P. 35–41.

8 Computers in Railways. J. Allan, C. Brebbia, R. Hill, G. Sciutto, S. Sone. WIT Press, Human-Computer Interaction, Dept. of Information Technology www.witpress.com

9 Hauptmann D. et al. System of the programs of TRAIN for the design of longitudinal dynamics of train // Eisenbahntechnische Rundschau. – 2008. – № 8. –S. 306–309.

10 Sanftleben D., Sonntag H., Weber K. Verfahren "Energiesparende Fahrweise" – ESF // ETR: Eisenbahntechn. – 2021. – № 9. – S. 510–517.

11 Töpfer C. Optimization of conduct of train by a side computer //

Eisenbahningenieur. – 2018. – № 2. – S. 68–70.

12 Lademann F. Eingabedaten für Eisenbahnbetriebssimulationen // Eisenbahningenieur. – 2014. – № 4. – S. 5–10.

13 Mao Bao-hua, He Tian-jian, Yuan Zhen-zhou, Liu Hai-dong, Zhao Li-ning, Chen Zhi-ying. Tiedao xuebao // China Railway Soc. – 2019. – № 1. – p. 1–6.

14 Боднарь Б. Е, Бобырь Д. В., Ляшук В. М. Результаты испытаний устройства для организации оптимального ведения поезда машинистом // Вісник східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2006. – № 8 (102). – Ч. 2. – С. 18–23.

15 Експлуатація локомотивів та локомотивне господарство: методичні вказівки до курсового та дипломного проектування / уклад.: Л. Ф. Гагін, М. І. Капіца, Д. В. Бобирь; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2013. – 44 с.

16 Боднар Б. Є., Капіца М. І., Боднар Є. Б., Очкасов О. Б. Експлуатація локомотивів та локомотивне господарство. Організація ремонтного та екіпірувального господарства : підручник. – Дніпро : Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2022. – 220 с.