

БОБИРЬ Д. В., ГРИЩЕНКО М. А., СЕРДЮК В. Н.

# ТЕОРІЯ ЛОКОМОТИВНОЇ ТЯГИ



ДНІПРО  
2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Д. В. Бобирь, М. А. Грищенко, В. Н. Сердюк

## Теорія локомотивної тяги

ПІДРУЧНИК

ДНІПРО  
2022

УДК 629.42(075.8)

Б 72

Авторський колектив:

*Бобирь Д. В., Грищенко М. А., Сердюк В. Н.*

Рекомендовано вченою радою  
Українського державного університету науки і технологій як  
підручник

*Протокол № 6 від «25» квітня 2022 р.*

*Електронний аналог*

*друкованого видання*

**Б 72**      **Бобирь, Д. В.** Теорія локомотивної тяги : підручник /  
Д. В. Бобирь, М. А. Грищенко, В. Н. Сердюк ; за ред. канд. техн. наук,  
доц. В. Н. Сердюка ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро :  
УДУНТ, 2022. – 385 с.

**ISBN 978-966-2394-60-3**

Відповідно до програми освітньої компоненти у підручнику розглянуто загальні питання механіки транспортного руху, сили, що діють на залізничний поїзд під час його руху (сили тяги, основного та додаткового опору та гальмівні), та фактори, що їх визначають. Наведено необхідні дані для розрахунку цих сил. Дано відомості про тягові характеристики локомотивів.

Наведено аналіз рівняння руху поїзда та можливостей його розв'язання за різних умов. На цій основі викладено традиційну техніку тягових розрахунків, а також з використанням ЕОМ.

Розглянуто методи випробування локомотивів, історію їх розвитку, відзначено роль вітчизняних учених у розвитку науки про локомотивну тягу поїздів.

Призначений для опанування освітньої компоненти «Теорія локомотивної тяги» та дипломного проектування за спеціальністю 273 «Залізничний транспорт» для ОПП «Локомотиви та локомотивне господарство».

Лл. 122, табл. 86, бібліогр. 5 назв.

**УДК 629.42(075.8)**



Цей твір ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons  
[«Attribution-NonCommercial-ShareAlike» 4.0 International \(CC BY-NC-SA 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)  
(«Із зазначенням авторства – Некомерційна – Поширення на тих самих умовах» 4.0 Міжнародна)

# Зміст

Скорочення.....	8
Від авторів.....	9
Вступ.....	10
<b>ГЛАВА 1 СИЛИ, ЩО ДІЮТЬ НА ПОЇЗД.....</b>	<b>12</b>
1.1. Характеристика сил, що діють на поїзд.....	12
1.2. Основні режими руху .....	13
1.3. Керовані сили тяги та гальмування .....	13
1.4. Обмеження сил тяги та гальмування .....	19
<b>ГЛАВА 2 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ</b>	
<b>ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ .....</b>	<b>24</b>
2.1. Основні залежності та визначення.....	24
2.2. Електромеханічна характеристика тягового електродвигуна з послідовною (серієсною) системою збудження.....	27
2.3. Електромеханічна характеристика тягового електродвигуна з паралельною (шунтовою) обмоткою збудження.....	29
2.4. Електромеханічна характеристика тягового електродвигуна з узгоджено-змішаною системою збудження.....	30
2.5. Електромеханічна характеристика електродвигуна зустрічно-змішаного збудження .	32
2.6. Приведення електромеханічних характеристик тягових електродвигунів до колісних пар локомотива.....	33
2.7. Порівняння характеристик тягових електродвигунів. Вимоги, що висуваються до характеристик тягових електродвигунів.....	37
2.8. Способи регулювання швидкості руху на	

тяговому рухомому складі .....	42
2.9. Регулювання швидкості руху шляхом зміни напруги .....	42
2.10. Регулювання швидкості руху шляхом зміни магнітного потоку .....	46
2.11. Управління зміною опору в якірному колі тягових електродвигунів .....	49
2.12. Електромеханічні та тягові характеристики ЕРС постійного струму .....	51
2.13. Електромеханічні та тягові характеристики ЕРС змінного струму .....	54
ГЛАВА 3 ТЯГОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ВЛАСТИВОСТІ АВТОНОМНИХ ЛОКОМОТИВІВ.....	56
3.1. Загальні відомості.....	56
3.2. Обмеження сили тяги тепловоза по потужності дизеля.....	58
3.3. Тягові характеристики локомотивів з механічною передачею потужності.....	66
3.4. Тягові характеристики тепловозів з гідравлічною передачею потужності.....	68
3.5. Електричні передачі постійного струму .....	79
3.6. Електричні передачі потужності змінно- постійного струму.....	83
ГЛАВА 4 СИЛИ ОПОРУ РУХУ ПОЇЗДА.....	89
4.1. Класифікація сил опору руху.....	89
4.2. Основний опір руху поїзда.....	90
4.3. Розрахунок сил питомого основного опору руху .....	97
4.4. Сили додаткових опорів руху.....	103
4.5. Додатковий опір руху поїзда від кривих ділянок плану колії.....	105
4.6. Спряmlення профілю та плану колії .....	107
4.7. Додаткові опору при рушанні поїзда з місця .....	113
4.8. Опір від підвагонних генераторів пасажирського поїзда .....	116
4.9. Додатковий опір руху поїзда від вітру .....	117

4.10. Додатковий опір руху поїзда від низької температури .....	118
<b>ГЛАВА 5 ГАЛЬМІВНІ СИЛИ ПОЇЗДА .....</b>	<b>120</b>
5.1. Загальні відомості.....	120
5.2. Визначення гальмівної сили поїзда .....	123
5.3. Принципи розрахунків гальмівних сил у разі пневматичному управлінні гальмами.....	132
5.4. Системи електричного гальмування.....	138
<b>ГЛАВА 6 РІВНЯННЯ РУХУ ПОЇЗДА .....</b>	<b>146</b>
6.1. Виведення рівняння руху поїзда.....	146
6.2. Розрахунок прискорюючих сил в режимі тяги ....	154
6.3. Розрахунок прискорюючих сил, що діють на поїзд в режимі холостого ходу .....	158
6.4. Розрахунок уповільнюючих сил, що діють на поїзд .....	162
6.5. Аналітичний метод розв'язання рівняння руху поїзда .....	164
6.6. Графічний метод розв'язання рівняння руху поїзда .....	170
<b>ГЛАВА 7 РОЗРАХУНОК ТА ВИЗНАЧЕННЯ ВАГИ СОСТАВА .....</b>	<b>175</b>
7.1. Загальні відомості .....	175
7.2. Визначення ваги состава з урахуванням запасу кінетичної енергії.....	178
7.3. Графічний метод визначення ваги состава.....	184
7.4. Перевірка ваги состава на зрушення з місця.....	185
7.5. Перевірка ваги состава за довжиною приймально-відправних колій .....	189
7.6. Принципи встановлення норм ваги состава.....	191
7.7. Побудова тонно-кілометрової діаграми.....	191
<b>ГЛАВА 8 ШВИДКІСТЬ І ЧАС РУХУ ПОЇЗДА.....</b>	<b>193</b>
8.1. Основні принципи визначення швидкості руху поїзда.....	193
8.2. Графічний метод побудови кривої швидкості .....	200

8.3. Чисельні методи розв’язання рівняння руху поїзда .....	206
8.4. Методика розрахунку швидкості руху з урахуванням довжини та розподіленої ваги поїзда.....	206
<b>ГЛАВА 9 ГАЛЬМУВАННЯ ПОЇЗДА ТА РІШЕННЯ ГАЛЬМІВНИХ ЗАВДАНЬ .....</b>	<b>214</b>
9.1. Види гальмування поїзда.....	214
9.2. Методи вирішення гальмівних завдань .....	215
9.3. Визначення необхідних гальмівних засобів для забезпечення безпечного руху поїзда.....	220
9.4. Визначення довжини гальмівного шляху.....	225
9.5. Графічний метод розв’язання гальмівних задач..	232
9.6. Розв’язання гальмівних задач по інтервалах часу.....	235
9.7. Гальмівні розрахунки за допомогою номограм...	248
<b>ГЛАВА 10 РОЗРАХУНОК НАГРІВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗА МЕТОДОМ МАТВЄЄНКО.....</b>	<b>257</b>
10.1. Визначення температури обмоток якоря.....	257
10.2. Розрахунок нагрівання тягового електродвигуна (головного генератора) аналітичним методом.	267
<b>ГЛАВА 11 ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ НА ТЯГУ ПОЇЗДІВ.....</b>	<b>271</b>
11.1. Фактори, що впливають на витрату енергії на тягу поїздів.....	271
11.2. Визначення витрати палива на ведення поїзда	275
11.3. Технічне нормування витрат палива та електроенергії.....	283
11.4. Побудова кривої витрати палива тепловозом графічним способом А. І. Долінжева.....	287
11.5. Способи зменшення витрати палива та енергії на тягу.....	292
<b>ГЛАВА 12 ВИКОНАННЯ ТЯГОВИХ РОЗРАХУНКІВ НА ЕОМ.....</b>	<b>294</b>

12.1. Загальні відомості та вихідні дані до розрахунків .....	294
12.2. Порядок розрахунків на ЕОМ.....	297
<b>ГЛАВА 13 РАЦІОНАЛЬНІ ПРИЙОМИ КЕРУВАННЯ ПОЇЗДАМИ .....</b>	<b>300</b>
13.1. Режимні карти .....	300
13.2. Системи автоматичного ведення поїздів .....	302
13.3. Система автоведення вантажних з'єднаних поїздів .....	306
<b>ГЛАВА 14 ТЯГОВІ ВИПРОБУВАННЯ ЛОКОМОТИВІВ .....</b>	<b>308</b>
14.1. Дослідні поїздки локомотивів і їх завдання .....	308
14.2. Методи проведення випробувань локомотивів.....	311
14.3. Експериментальне визначення основного опору руху локомотивів та вагонів.....	314
14.4. Перевірка використання потужності локомотива, що вимагається умовами експлуатації на залізничній ділянці.....	317
Список літератури.....	318
Предметний покажчик.....	319
<b>ДОДАТОК А ПРИКЛАД ТЯГОВОГО РОЗРАХУНКУ.....</b>	<b>322</b>
<b>ДОДАТОК Б ВИЗНАЧЕННЯ НОРМИ ВИТРАТ ПАЛИВА НА ТЯГУ ПОЇЗДІВ І ЇЇ КОРИГУВАННЯ.....</b>	<b>367</b>



## Скорочення

ГМ – гідромуфта  
ГТР – гідротрансформатор  
ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння  
ЕПГ – електропневматичні гальма  
ЕРС – електрорухомий склад; електрорушійна сила  
ККД – коефіцієнт корисної дії  
КП – колісна пара  
МВРС – моторвагонний рухомий склад  
МРС – магніторушійна сила  
ОЗ – ослаблення збудження  
ОП – ослаблення поля  
ПЕР – паливо-енергетичні ресурси  
ПП – повне поле  
ПТЕ – Правила технічної експлуатації  
ПТР – Правила тягових розрахунків  
РС – рухомий склад  
САР – система автоматичного регулювання  
ТЕПЛ – тягово-енергетичний паспорт локомотива  
ТГ – тяговий генератор  
ТЕД – тяговий електродвигун  
ТЕМ – тягова електрична машина або тягові електричні машини  
ТРС – тяговий рухомий склад

## Від авторів

Підручник призначений для студентів першого освітнього рівня та відповідає програмі з освітньої компоненти «Теорії локомотивної тяги» для спеціальності 273 «Залізничний транспорт» освітньої програми 273.2 «Локомотиви та локомотивне господарство». При викладі матеріалу враховані положення «Правила тягових розрахунків для поїзної роботи» [1] та використана Міжнародна система одиниць (СІ) в області тяги поїздів.

У освітньої програмі «Локомотиви та локомотивне господарство» особлива увага приділяється теоретичним основам освітніх компонент, зокрема таким як «Теорія локомотивної тяги». Слід зазначити, що для студентів спеціальності 273 «Залізничний транспорт» підручники з цієї освітньої компоненти випускались в основному для електричної тяги, в яких не розглядається ряд питань стосовно тепловозної тяги. Автори рукопису, спираючись на свій педагогічний та науковий досвід роботи в області локомотивної тяги, спробували привести більш повні відомості з даної освітньої компоненти і сподіваються, що підручник допоможе студентам освоїти науку про локомотивну тягу поїздів.

Автори висловлюють вдячність рецензентам – начальнику служби локомотивного господарства Київського метрополітену В. А. Атласу та заступнику директора філії «Пасажирська компанія» АТ «Укрзалізниця» В. С. Любці за уважне прочитання рукопису та зауваження, які сприяли поліпшенню сприйняття матеріалу рукопису.

# Вступ

Теоретична наука, що вивчає механіку руху рейкового транспорту, називається локомотивною тягою. Наукові положення теорії локомотивної тяги дозволяють аналізувати за допомогою тягових розрахунків ефективність експлуатації залізниць, основні параметри ліній, що проєктуються, ділянок, характеристики локомотивів і рухомого складу, руху поїздів. Отримані параметри руху поїздів на лініях і ділянках перевіряються експлуатаційними випробуваннями в тягово-енергетичних лабораторіях. На підставі теоретичного та експериментального аналізів ефективності експлуатації ліній і ділянок складають графік руху поїздів, визначають провізну та пропускну здатність залізниць, виявляють раціональні режими водіння поїздів і найбільш раціональні умови експлуатації локомотивів. Таким чином, наукові положення теорії локомотивної тяги є розрахунковою основою організації роботи всього залізничного транспорту.

Основи теорії локомотивної тяги були закладені в пору інтенсивного розвитку залізничного транспорту в ХІХ ст. видатними вченими Н. П. Петровим, А. П. Бородіним, В. А. Лопушинським і ін. На початку минулого століття теорію локомотивної тяги розробляли професори Ю. В. Ломоносов, А. І. Липец, В. Ф. Єгорченко, А. М. Бабічков, А. А. Босов, Б. Є. Боднар, Г. К. Гетьман, Е. Д. Тартаковський та ін.

Для успішного розвитку електрифікації залізниць основи теорії електричної тяги розробляли проф. А. В. Вульф, А. Б. Лебедев, В. А. Шевалін та ін. Надалі теорію електричної тяги розвивали проф. В. Е. Розенфельд, І. П. Ісаєв, М. М. Сидоров та ін.

Значні дослідження щодо підвищення ефективності локомотивної тяги, в тому числі нових локомотивів, проводять науково-дослідні інститути та університети залізничного транспорту країни.

Метою освоєння освітньої компоненти «Теорія локомотивної тяги» є формування компетенцій відповідно до стандарту вищої освіти України за спеціальністю 273 «Залізничний транспорт» та придбання ними таких компетентностей:

– дотримуватися у професійній діяльності вимог нормативно-правових, законодавчих актів України, Правил технічної експлуатації залізниць України, інструкцій та рекомендацій з експлуатації, ремонту та обслуговування об'єктів залізничного транспорту та їх систем;

– розрізняти типи та серії локомотивів, їх системи, агрегати та вузли з визначенням вимог до їхньої конструкції, параметрам та характеристикам;

– аналізувати техніко-економічні та експлуатаційні показники локомотивів, їх систем, агрегатів та вузлів з метою виявлення та усунення негативних чинників та підвищення ефективності виробничого процесу.

За робочою програмою освітньої компоненти підручник сприяє досягненню таких результатів навчання:

– дотримуватися у професійній діяльності вимог нормативно-правових та законодавчих актів України у сфері залізничного транспорту, Правил технічної експлуатації залізниць України, інструкцій та рекомендацій з експлуатації, ремонту та обслуговування локомотивів, їх систем, агрегатів та вузлів;

– ідентифікувати типи та серії локомотивів, їх системи, агрегати, вузли та вимоги до їх характеристик та параметрів;

– визначати параметри локомотивів, їх систем, агрегатів та вузлів шляхом проведення вимірнвального експерименту з оцінкою його результатів;

– виконувати розрахунок основних характеристик та параметрів технологічних процесів виробництва, експлуатації та ремонту локомотивів, їх систем, агрегатів та вузлів з метою їх порівняння та формування управлінських рішень щодо подальшого функціонування підприємства з оцінкою якості його продукції;

– розраховувати техніко-економічні та експлуатаційні показники локомотивів, їх систем, агрегатів та вузлів.

## Сили, що діють на поїзд

### 1.1. Характеристика сил, що діють на поїзд

На поїзд, що рухається діє багато сил, різних за величиною та напрямком. Умовно їх можна розділити на внутрішні та зовнішні. *Внутрішні* сили, що діють між окремими одиницями рухомого складу, а також сили тяги, гальмівні та сили опору руху врівноважуються всередині системи та не можуть без зовнішніх сил здійснювати рух поїзда [2].

До зовнішніх сил, що діють на поїзд, відносяться *сили реакції колії в точках взаємодії коліс і рейок* на внутрішні сили, без яких неможливо отримати силу тяги локомотива, реалізувати рух і гальмівні сили під час гальмування гальмуванні.

Силою тяги локомотива та силами гальмування поїзда управляє машиніст, тому ці сили називаються *керованими*. Силами опору руху поїзда й зовнішніми силами машиніст управляти не може, тому їх називають *некерованими*.

З метою вивчення впливу діючих сил на рух, поїзд представляють у вигляді *матеріальної точки*, в якій зосереджена вся його маса. Така заміна не вносить велику похибку в розрахунки визначення характеру руху поїзда. Якщо ж поїзд розглядають як *механічну систему*, а не матеріальну точку, то всі діючі сили на рух відносять до точок взаємодії колісних пар з рейками, так як тільки в них виникають *зовнішні* сили.

В даному підручнику розглядаються тільки сили, які безпосередньо впливають на рух поїзда – це *зовнішні* сили та складові цих сил, спрямовані по лінії руху.

## 1.2. Основні режими руху

Сила тяги локомотива спрямована на збільшення швидкості руху поїзда, а гальмівна сила діє в протилежному напрямку. Сили опору спрямовані проти руху, за винятком сил, що діють на спуску.

За «Правилами тягових розрахунків для поїзної роботи» (далі ПТР) маса поїзда зосереджена в середині поїзда без урахування його довжини. Тобто поїзд розглядається як матеріальна точка певної маси, до якої додаються сили тяги, гальмування та опору.

За законами механіки кілька сил ( $F_d$ ,  $-B_r$ ,  $\pm W_d$ , де  $F_d$  – дотична сила тяги локомотива;  $B_r$  – гальмівна сила поїзда при гальмуванні;  $W_d$  – повна сила опору поїзда), що діють на матеріальну точку, можна замінити однією рівнодіючою силою, яку в теорії тяги поїздів називають *прискорювальною силою*  $F_n$ .

Залежно від умов руху поїзд може перебувати:

– в режимі тяги, тобто локомотив поїзда знаходиться в тяговому режимі, при цьому  $F_n = F_d \pm W_d$ ;

– в режимі вибігу, коли локомотив знаходиться в режимі холостого ходу й поїзд рухається за інерцією за рахунок накопиченої кінетичної енергії в процесі режиму тяги, при цьому  $F_n = \pm W_d$  і тоді якщо:

–  $F_n > 0$ , то швидкість руху збільшується і тим самим накопичується кінетична енергія поїзда;

–  $F_n = 0$ , то встановлюється рівномірна постійна швидкість руху поїзда, а в режимі тяги  $F_d = W_d$ ;

–  $F_n < 0$ , то швидкість руху поїзда зменшується, тобто  $F_n$  має від’ємне значення та її називають *уповільнювальною силою*;

– в режимі гальмування, коли до сил опору руху додається гальмівна сила  $B_r$ :  $F_n = -B_r \pm W_d$ .

## 1.3. Керовані сили тяги та гальмування

Машиніст, керуючи локомотивом, для збільшення швидкості руху поїзда встановлює режим тяги (тут розглядається поїзд як механічна система). Тягові електродвигуни, отримавши електроенергію, через

зубчасті редуктори починають передавати крутний момент колісним парам. Крутний момент створює пару сил, одна з яких діє в точці дотику колеса з рейкою, інша – в центрі обертання колеса. У точці дотику колеса з рейкою (рис. 1.1, *a*) сила  $F_1$ , прикладена від обода колеса до рейки, викликає, за третім законом Ньютона, реакцію  $F_2$  від рейки до колеса й рівну силі  $F_1$ . При відсутності прослизання площин взаємодії ці дві сили зчіплюють колесо з рейкою, віднімаючи колесо від системи локомотива та переводячи його в систему колії.

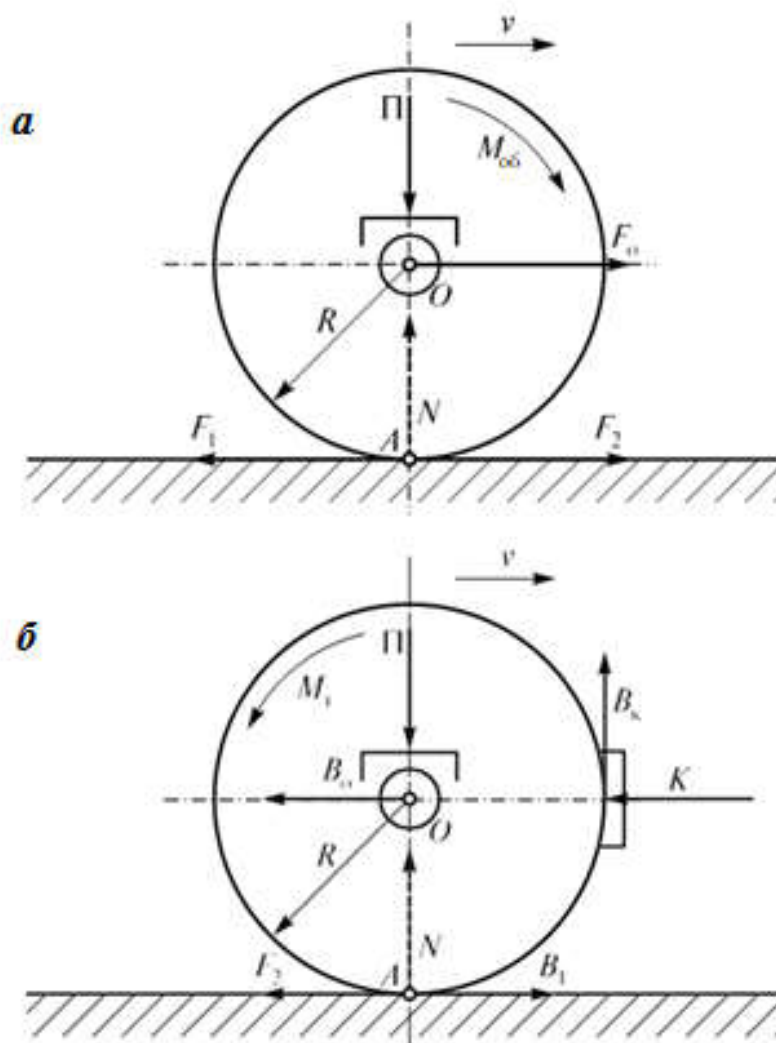


Рис. 1.1. Схеми керованих сил тяги та гальмування:  
*a* – режим тяги; *б* – режим гальмування

Тоді сила  $F_0$ , прикладена до осі колеса, є зовнішньою силою по ві-

дношенню до локомотива. Вона викликає обертальний рух колеса навколо точки  $A$  як миттєвого центру, і тим самим створюється поступальний рух локомотива. Тому сила  $F_0$  є рушійною силою локомотива, яка викликає поступальний рух поїзда.

*Силою тяги називається активна сила, створювана двигуном локомотива за допомогою рейок, прикладена до центру колеса та обертаюча колесо навколо точки дотику його з рейкою.*

Однак силою тяги називають не силу  $F_0$ , а горизонтальні дотичні сили обох коліс колісної пари в точках взаємодії з рейками. Сума всіх тягових (рушійних) колісних пар створює *дотичну силу тяги* локомотива  $F_d$ . Хоча дотична сила і не тягне локомотив вперед, але стає причиною виникнення рушійної сили всього локомотива (рис. 1.2).

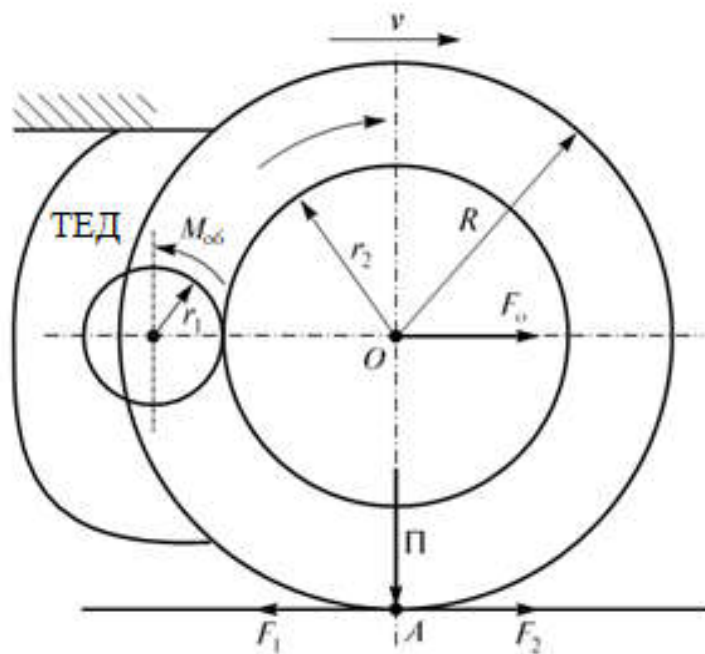


Рис. 1.2. Схема створення сили тяги локомотива

Сила тяги на ободі коліс однієї колісної пари  $F_d = F_2 = F_1 = F_0 = F_{зч}$  дорівнює (див. рис. 1.2)

$$F_d = M_{об} \frac{r_2}{R \cdot r_1}, \quad (1.1)$$

де  $M_{об}$  – момент обертання якоря тягового електродвигуна;  
 $r_1$  – радіус провідної шестерні тягового електродвигуна;



$r_2$  – радіус зубчастого колеса колісної пари;

$R$  – радіус кола катання обода колеса колісної пари.

Дотична сила тяги  $F_d$  локомотива є *внутрішньою силою*. Згідно ПТЕ для поїзної роботи п. 1.1.5 «... Тягові розрахунки виконувати за силою тяги на ободах рушійних коліс (за дотичною силою тяги  $F_d$ )».

Реакцією рейок на дотичну силу є зовнішня сила зчеплення  $F_{зч}$ , яка визначається в залежності від навантаження колеса на рейку ( $P$ ) і коефіцієнта тертя кочення (зчеплення) взаємодіючих поверхонь колеса і рейки  $\psi$ , тобто  $F_{зч} = \psi P$ , а не від моменту тягового двигуна  $M_{об}$ , де  $\psi$  – коефіцієнт тертя кочення колеса в точці взаємодіючих поверхонь колеса і рейки, що отримав назву *коефіцієнт зчеплення (коефіцієнт тертя спокою)*.

У локомотиві розрізняють три стадії послідовної передачі механічної роботи: а) в циліндрах двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) тепловоза або на валах тягових електродвигунів електровоза; б) через передавальний механізм на рейки; в) на автозчеплення. Відповідно до цього розрізняють три поняття про силу тяги:

а) індикаторна (циліндрична ДВЗ) сила тяги тепловоза або сила тяги на валах тягових електродвигунів електровоза –  $F_i$ ;

б) дотична сила тяги на ободі рушійних коліс –  $F_d$ ;

в) сила тяги на автозчепі локомотива (корисна сила тяги) –  $F_k$ .

**Індикаторна сила тяги  $F_i$**  – фіктивна сила тяги, яка виділяється за умови, що її робота за один оберт рушійних коліс дорівнює роботі газу в циліндрах ДВЗ тепловоза або роботі тягових електродвигунів електровоза. Ця сила називається фіктивною тому, що під час її визначення не враховуються механічні втрати, без яких робота ДВЗ і тягових електродвигунів неможлива.

**Дотична сила тяги  $F_d$**  – дійсна сила тяги тепловоза. Вона визначається за умови роботи, що здійснюється за один оберт рушійних коліс тепловоза. Ця робота дорівнює роботі газу в циліндрах дизеля без врахування роботи, що витрачається на допоміжні потреби та роботи сил опорів в передавальному механізмі за відрізок поступального переміщення локомотива, що відповідає одному обертру рушійних коліс. Для електровоза дійсна дотична сила тяги  $F_d$  визначається за умови рівності робіт рушійних коліс за один оберт і роботи сил на валах тягових

електродвигунів без врахування роботи втрат в передавальному механізмі. Дотична сила тяги завжди менше індикаторної

$$F_d = F_i \eta_m, \quad (1.2)$$

де  $\eta_m$  – механічний ККД ( $\eta_m < 1$ ).

**Сила тяги на автозчепі**  $F_k$  – зовнішня сила по відношенню до состава поїзда (на автозчепі), прикладена до автозчепу першого за локомотивом вагона. Вона визначається за умови рівності роботи поступального руху, що здійснюється за один оберт рушійних коліс локомотива, і роботи дотичної сили тяги без урахування роботи сил повного опору руху  $W_d$  локомотива (сума основного опору руху локомотива в режимі тяги та опорів від профілю та плану колії), тобто

$$A_{\Pi} = F_k \pi D_k = (F_d \pm W'_d) \pi D_k,$$

звідси

$$A_{\Pi} = F_k \pm W'_d, \quad (1.3)$$

де  $A_{\Pi}$  – робота поступального руху локомотива, що здійснюються на відстані, пройденій за один оберт колеса;

$D_k$  – діаметр рушійних коліс локомотива;

$W'_d$  – повний опір руху локомотива.

**Динамометрична сила тяги**  $F_{дин}$  – дійсна сила, яка вимірюється динамометром між локомотивом і першим за ним вагоном.

Динамометрична сила тяги  $F_{дин} = F_k$  тільки за умови рівномірного руху локомотива. При прискореному русі  $F_{дин} < F_k$ , так як частина роботи  $F_d$  витрачається на підвищення кінетичної енергії локомотива. При уповільненому русі (без гальмування)  $F_{дин} > F_k$  за рахунок зменшення кінетичної енергії локомотива.

У відповідності з різними поняттями про силу тяги різняться і потужності (робота, виконана за 1 с), що розвиваються локомотивом – індикаторна, дотична, по автозчепленню та динамометрична.

Якщо  $F$  – сила тяги в Н, а швидкість  $v$  в км/год, то потужність локомотива в кВт

$$N = \frac{Fv}{3600}. \quad (1.4)$$

Для різних сил тяги  $F$  знаходимо такі потужності в кВт:

– індикаторна

$$N_i = \frac{F_i v}{3600};$$

– дотична

$$N_d = \frac{F_d v}{3600};$$

– на автосцепі

$$N_k = \frac{F_k v}{3600};$$

– динамометрична

$$N_{\text{дин}} = \frac{F_{\text{дин}} v}{3600}.$$

Обертання коліс рухомого складу на вибігу залежить від сил інерції, що діють на осі колісних пар і сил зчеплення взаємодії коліс і рейок. У процесі гальмування величиною сили  $K$ , натискання колодки на колесо, що обертається, управляє машиніст. Від тертя ковзання притисненої колодки об колесо утворюється сила  $B_k$ , яка відносно центру обертання колеса створює гальмівний момент  $M_r$  (див. рис. 1.1, б). Гальмівний момент, перешкоджаючи вільному коченню колеса під час поступального переміщення рухомого складу, в точці дотику  $A$  силою  $B_r$  впливає на рейку.

Реакція рейки в точці взаємодії силою  $F_2 = F_{3ч} = B_r$  перешкоджає прослизанню колеса відносно рейки і, подібно до утворення сили тяги,

створює силу  $B_0$ , спрямовану від центру обертання колеса  $O$  проти інерційної сили  $F_i$  і поступального руху, позначеного на малюнку вектором швидкості  $v$ . Величина  $B_r$  визначається за формулою:

$$B_r = K\varphi,$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт тертя ковзання колодки об колесо.

## 1.4. Обмеження сил тяги та гальмування

Кожен локомотив залежно від своєї конструкції та потужності може реалізувати тільки певну кількість енергії в зовнішню механічну роботу. Відповідно до різних фаз перетворення енергії в локомотивах вводяться обмеження сили тяги:

– в тепловозі – по потужності дизеля, по передачі та зчепленню колісних пар з рейками та конструкційній швидкості;

– в електровозі – по потужності тягових електродвигунів, по зчепленню колісних пар з рейками та конструкційній швидкості.

Дотична сила тяги колісних пар локомотива  $F_d$  не може бути більше сили реакції рейок  $F_{зч\max}$ . Внутрішньою дотичною силою тяги управляє машиніст локомотива, а зовнішньою силою зчеплення машиніст управляти не може, так як ця сила залежить від навантаження тягових коліс на рейки та коефіцієнта зчеплення в контактах коліс з рейками.

Якщо  $F_d > F_{зч\max}$ , тоді  $F_d = F_{зч} = P\varphi$  (де  $\varphi$  – коефіцієнт тертя ковзання колеса об рейки), відбудеться боксування колісних пар. У такому разі цьому величина  $\varphi$  значно менше коефіцієнта зчеплення  $\psi$ .

Відношення максимально можливої дотичної сили тяги  $F_d = F_{зч\max}$ , одержуваної без боксування, до зчіпної ваги  $P_d$  локомотива називається коефіцієнтом зчеплення  $\psi$ .

Коефіцієнт зчеплення локомотива визначається за формулою:

$$\psi = \frac{F_{d\max}}{P_d}, \quad (1.5)$$

де  $P_d$  – зчіпна вага локомотива, кН.

$$F_{d\max} = F_{зч} = 1000P_d\psi.$$

Коефіцієнт зчеплення  $\psi$  залежить від багатьох чинників: швидкості руху, особливостей конструкції локомотива, метеорологічних умов, стану поверхні рейок і бандажів та інш. Цей коефіцієнт не піддається точним теоретичним обчисленням. Коефіцієнт зчеплення (коефіцієнт тертя кочення в точках взаємодії коліс і рейок) визначається на основі спеціальних досліджень. Зазвичай такі випробування проводять в різний час доби та різні сезони, застосовуючи пісок. Досвідчений машиніст за обрані швидкості руху збільшує дотичну силу тяги локомотива до зриву зчеплення. Досягнуту силу тяги вимірюють, ділять її на вагу локомотива і таким чином знаходять коефіцієнт зчеплення за певну швидкість руху. Щоб отримати найбільш достовірні результати, необхідно мати якомога більше дослідних значень коефіцієнта зчеплення в залежності від швидкості руху.

Отримані дослідом значення коефіцієнта зчеплення наносять на графік в залежності від швидкості та сили тяги, потім їх обробляють методами математичної статистики. Результати розрахунків представляють у вигляді графіків (рис. 1.3).

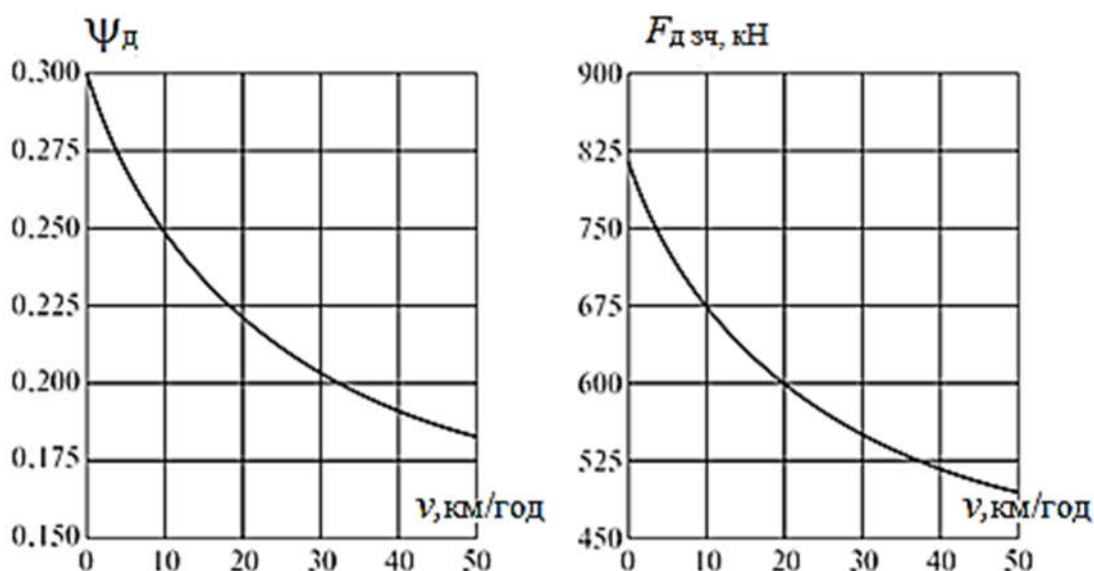


Рис. 1.3. Графіки  $\psi_d$  і  $F_{d\text{ зч}}$  в залежності від швидкості  $v$  руху тепловоза 2ТЭ116

ПТР рекомендують значення розрахункового коефіцієнта зчеплення локомотива визначати за емпіричною формулою:

$$\psi_d = a + \frac{b}{c + d \cdot v} - e \cdot v, \quad (1.6)$$

де  $a, b, c, d$  і  $e$  – постійні величини, які отримані на основі експериментальних досліджень, диференційовані для різних серій локомотивів і представлені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

**Значення емпіричних коефіцієнтів для різних серій локомотивів**

Тип локомотива	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$
<i>Тепловози</i>					
М62, 2М62, 2ТЕ10В, 2ТЭ10М, 2ТЭ116	0,118	5	27,5	1	0
ТЭ10, 2ТЭ10Л	0,118	4	24	1	0
<i>Електровози</i>					
ВЛ10, ВЛ11, ВЛ10 <sup>у</sup> , ВЛ82, ВЛ82 <sup>М</sup>	0,28	3	50	20	0,0007
* ВЛ82 <sup>М</sup> , ВЛ23, ВЛ8	0,25	8	100	20	0
ВЛ60, ВЛ60 <sup>р</sup> , ВЛ60 <sup>пк</sup> , ВЛ80 <sup>г, к, р, с</sup> , ВЛ65, ВЛ85	0,28	4	50	6	0,0006

*Примітка.* \* такі локомотиви в даний час зустрічаються тільки на промтранспорті, в АТ «Укрзалізниця» вони списані та утилізовані.

За наявності кривих ділянок малого радіусу на крутих підйомах розрахункові значення коефіцієнтів слід зменшувати пропорційно поправному коефіцієнту  $K_{кр}$ , залежному від радіуса кривої  $R$

$$\psi_{кр} = \psi_d K_{кр}. \quad (1.7)$$

Значення поправного коефіцієнта визначаються за формулами:

– для електричної тяги на кривих радіусом менше 500 м

$$K_{кр} = \frac{250 + 1,55R}{500 + 1,1R}; \quad (1.8)$$

– для тепловозної тяги на кривих радіусом менше 800 м

$$K_{\text{кр}} = \frac{3,5R}{400 + 3R}. \quad (1.9)$$

**Приклад 1.** Розрахувати і побудувати залежність сили тяги по зчепленню колісних пар з рейками тепловоза 2ТЭ116 під час руху зі швидкостями 0; 5; 10; 20; 30; 40; 50 км/год. Маса тепловоза  $M_p = 276$  т. Потрібно визначити силу тяги тепловоза по зчепленню в кривій радіусом  $R = 400$  м за швидкість руху 40 км/год.

*Рішення.*

Коефіцієнт зчеплення тепловоза 2ТЭ116 визначається за формулою

$$\psi_d = 0,118 + \frac{5}{27,5 + v}.$$

Сила тяги  $F_{\text{дзч}}$  розраховується за формулою

$$F_{\text{дзч}} = 1000M_p g \psi_d.$$

Результати розрахунків зведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

**Результати розрахунків сили тяги**

$v$ , км/год	$\psi_d$	$F_{\text{дзч}}$ , Н
0,0	0,300	811 775,7
5,0	0,272	736 039,8
10,0	0,251	680 500,1
15,0	0,236	638 028,6
20,0	0,223	604 498,4
25,0	0,213	577 354,9
30,0	0,205	554 932,1
35,0	0,198	536 096,9
40,0	0,192	520 052,1
45,0	0,187	506 220,4
50,0	0,183	494 173,4

Коефіцієнт зчеплення в кривій радіусом  $R = 400$  м за швидкість  $v = 40$  км/год визначається за формулою:

$$\psi_{\text{дкр}} = \psi_{\text{д}} \frac{3,5R}{400 + 3R} = 0,192 \cdot \frac{3,5 \cdot 400}{400 + 3 \cdot 400} = 0,168.$$

Сила тяги по зчепленню в кривій радіусом 400 м за швидкість  $v = 40$  км/год визначається за формулою:

$$F_{\text{дзч}} = 1000M_{\text{р}}g\psi_{\text{дкр}} = 100 \cdot 276 \cdot 9,81 \cdot 0,168 = 454870,08 = 454,87 \text{ кН.}$$

Отриманий результат необхідно порівняти з графіком  $F_{\text{дзч}} = f(v)$  на рис. 1.3.

Подібно дотичній силі тяги, гальмівна сила залежить від сили зчеплення в точках взаємодії коліс з рейками. Перевищення сили гальмування над силою зчеплення може привести до заклинювання коліс, в результаті якого на поверхні кочення коліс утворюються ділянки, що називаються повзунами.

### Питання для самоконтролю

1. Назвіть сили, що діють на поїзд.
2. Назвіть режими руху поїзда.
3. Що таке сила тяги локомотива?
4. Як виникають сили гальмування?
5. Від чого залежить сила зчеплення коліс з рейками?
6. Від чого залежить дотична сила тяги?
7. Коли виникає боксування коліс локомотива?
8. Назвіть обмеження сили тяги локомотива.
9. Назвіть обмеження сил гальмування.
10. Що таке повзун і як він утворюється?



## Електромеханічні характеристики тягових електродвигунів

Тягові електродвигуни (ТЕД) постійного струму, які використовуються на тяговому рухомому складі, можуть мати такі системи збудження:

- послідовне з'єднання якірної обмотки тягового двигуна з обмоткою збудження (серієсне з'єднання);
- паралельне з'єднання якірної обмотки тягового двигуна з обмоткою збудження (шунтове з'єднання);
- незалежне включення якірної обмотки тягового двигуна з обмоткою збудження;
- узгоджено-змішане включення якірної обмотки тягового двигуна з обмотками збудження;
- зустрічно-змішане включення якірної обмотки тягового двигуна з обмотками збудження.

Залежно від обраної системи збудження двигуни будуть мати різні характеристики. Розрізняють електромеханічні, механічні, магнітні та навантажувальні характеристики тягових електродвигунів.

### 2.1. Основні залежності та визначення

У сталому режимі роботи напруга, підведена до ТЕД, врівноважується електрорушійною силою (ЕРС), що наводиться в обмотці якоря та падінням напруги в його ланцюзі (рис. 2.1)

$$U = E + I \sum r, \quad (2.1)$$

де  $U$  – напруга, що подається до ТЕД, В;

- $E$  – ЕРС ТЕД, В;  
 $I$  – струм, що протікає через якірну обмотку ТЕД, А;  
 $\sum r$  – опір ланцюга ТЕД, Ом.

ЕРС тягового електродвигуна виникає під час переміщення провідників обмотки якоря в магнітному полі. Вона пропорційна магнітному потоку та частоті обертання вала якоря, а також залежить від конструктивних особливостей тягового електродвигуна

$$E = c_e n \Phi, \quad (2.2)$$

де  $c_e$  – електромашинна стала;

$n$  – частота обертання вала ТЕД, хв<sup>-1</sup>;

$\Phi$  – магнітний потік, створений головними полюсами ТЕД, Вб.

$$c_e = \frac{pN}{60a},$$

$p$  – число пар полюсів;

$N$  – число активних провідників обмотки якоря;

$a$  – число пар паралельних гілок обмотки якоря.

Використовуючи вираз (2.2), напругу тягового двигуна можна записати в наступному вигляді:

$$U = c_e n \Phi + I r. \quad (2.3)$$

Отже, частота обертання тягового електродвигуна дорівнює

$$n = \frac{U - I \sum r}{c_e \Phi}. \quad (2.4)$$

Рівняння потужності для тягового електродвигуна має вигляд

$$UI = EI + I^2 \sum r, \quad (2.5)$$

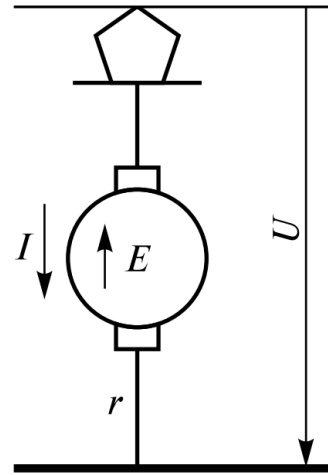


Рис. 2.1. Схема включення тягового електродвигуна

де  $EI$  – електромагнітна потужність тягового електродвигуна.

Електромагнітний момент, створюваний тяговим електродвигуном, дорівнює

$$M_{\text{ем}} = c_m \Phi I, \quad (2.6)$$

де  $c_m$  – машинна стала моменту.

$$c_m = \frac{pN}{2a\pi}.$$

Електромагнітний момент приводить до обертання вал тягового електродвигуна та за постійну частоту обертання витрачається на подолання моменту опору руху  $M$  (крутний момент), моменту механічних втрат  $M_{\text{мех}}$  і моменту магнітних втрат  $M_{\text{магн}}$

$$M_{\text{ем}} = M + M_{\text{мех}} + M_{\text{магн}}. \quad (2.7)$$

Звідси крутний момент тягового двигуна визначається таким чином

$$M = M_{\text{ем}} - M_{\text{мех}} - M_{\text{магн}} = c_m \Phi I - M_{\text{мех}} - M_{\text{магн}}. \quad (2.8)$$

Коефіцієнт корисної дії тягового електродвигуна  $\eta$  визначають як відношення вихідної (яка віддається) потужності до вхідної (підведеної). Використовуючи вирази (2.3) – (2.8), коефіцієнт корисної дії можна визначити за формулою:

$$\eta = \frac{M \cdot \frac{\pi n}{30}}{UI} = 1 - \frac{I^2 \sum r + \Delta M_{\text{мех}} \cdot \frac{\pi n}{30} + \Delta M_{\text{магн}} \cdot \frac{\pi n}{30}}{UI}. \quad (2.9)$$

*Електромеханічною характеристикою тягового електродвигуна називається залежність крутного моменту  $M$ , частоти обертання  $n$ , магнітного потоку  $\Phi$ , коефіцієнта корисної дії (ККД  $\eta$ ) від споживаного струму тягового двигуна за постійну напругу, підведену до його затишків, та постійну температуру обмоток 115 °С.*

Природною електромеханічною характеристикою тягового електродвигуна називається електромеханічна характеристика, виміряна за

номінальну напругу на затискачах тягового двигуна.

Електромеханічні характеристики тягових двигунів визначають під час стендових випробувань на заводі-виробнику та приводять у вигляді графіків або таблиць. Усереднені характеристики з випробувань перших 10 тягових двигунів називаються типовими.

*Механічною характеристикою тягового електродвигуна* називається залежність крутного моменту  $M$  і ККД  $\eta$  тягового двигуна від частоти обертання його вала  $n$  за постійну напругу на затискачах.

*Магнітною характеристикою тягового електродвигуна* називають залежність магнітного потоку від струму збудження, що протікає по обмотці збудження тягового двигуна. На практиці замість магнітного потоку, враховуючи вираз (2.2), для зручності подальших обчислень використовують залежність відношення  $E/n$  від струму збудження  $I_3$ .

Під час протікання струму по обмотці якоря створюється магнітне поле якоря, спрямоване перпендикулярно до магнітного поля, створюваному головними полюсами. В результаті через перенасичення окремих ділянок магнітного ланцюга магнітний потік головних полюсів зменшується. Це явище називається реакцією якоря. Тому, як правило, будується сімейство залежностей  $E/n = f(I_3)$  за різні постійні значення струму навантаження. Таке сімейство залежностей називається *навантажувальною характеристикою*. На рис. 2.2 показана навантажувальна характеристика тягового електродвигуна.

## **2.2. Електромеханічна характеристика тягового електродвигуна з послідовною (серієсною) системою збудження**

На рис. 2.3 показані схема та електромеханічна характеристика тягового двигуна даного типу.

В електродвигуні обмотка збудження включена послідовно з якірною обмоткою. Тому при зростанні струму навантаження зростає магніторушійна сила головних полюсів і, отже, створюваний ними магнітний потік. У разі невеликих струмів навантаження магнітна система двигуна практично ненасичена та залежність магнітного потоку від струму навантаження лінійна.

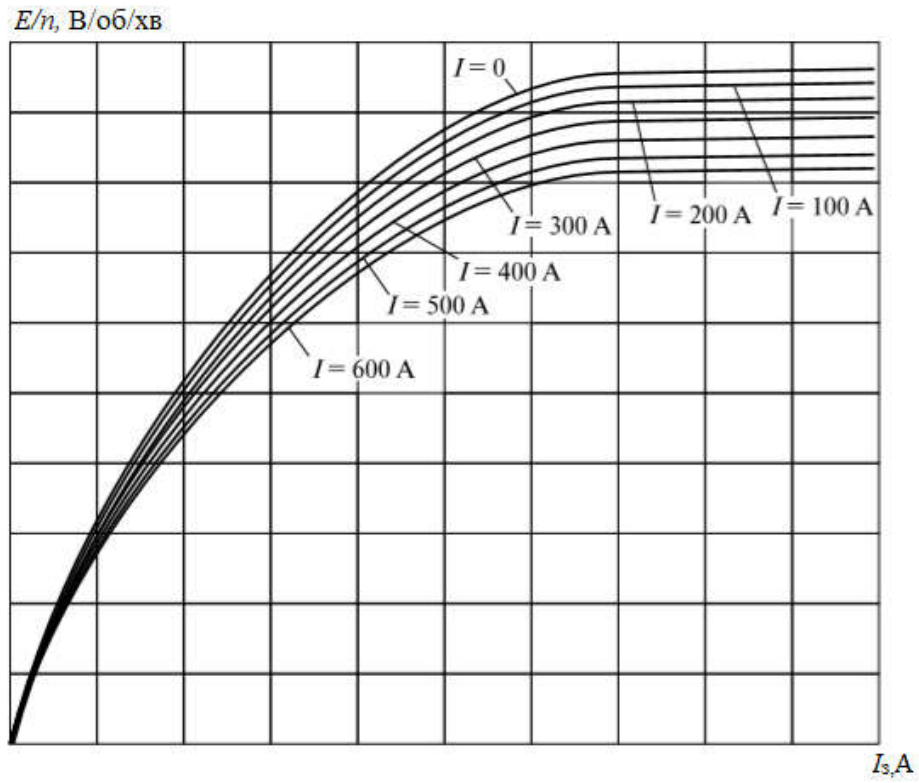


Рис. 2.2. Навантажувальна характеристика тягового двигуна

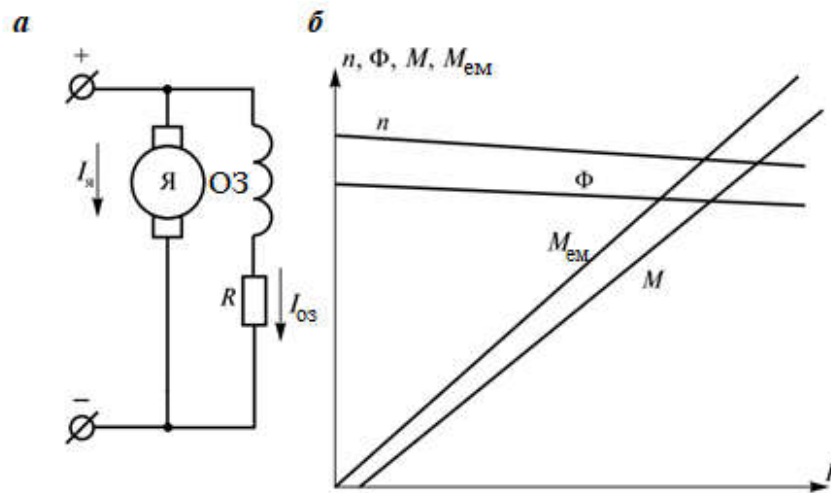


Рис. 2.3. Схема включення (а) та електромеханічна характеристика (б) тягового електродвигуна з послідовною (серієсною) системою збудження

З рівнянь (2.7) і (2.4) випливає, що у разі ненасиченої магнітної си-

стеми крутний момент буде пропорційний квадрату струму навантаження, а частота обертання валу двигуна – обернено пропорційна струму навантаження.

У разі великих струмів навантаження настає насичення магнітної системи тягового двигуна. В цьому випадку у разі зміни струма навантаження магнітний потік практично не змінюється.

### 2.3. Електромеханічна характеристика тягового електродвигуна з паралельною (шунтовою) обмоткою збудження

Схема включення та характеристика даного типу електродвигуна приведена на рис. 2.4.

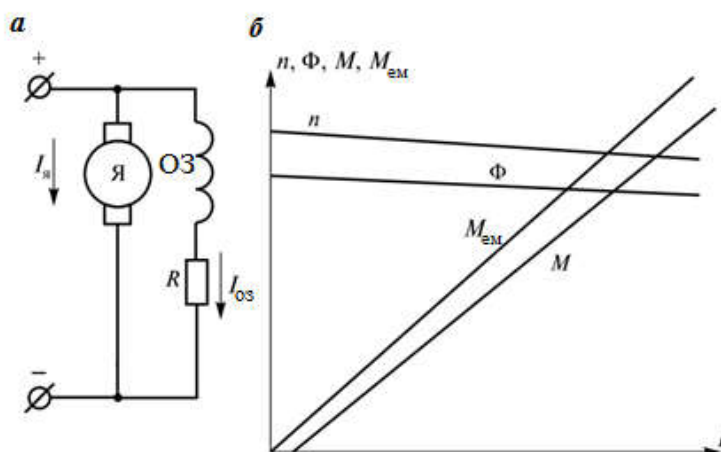


Рис. 2.4. Схема включення (а) та електромеханічна характеристика (б) тягового двигуна паралельного збудження

В електродвигуні обмотка збудження включена паралельно якірній обмотці, тому у разі зміни струма навантаження струм збудження та створюваний головними полюсами магнітний потік практично не змінюються. Отже, використовуючи рівняння (2.5), можна зробити висновок про те, що крутний момент у даному випадку буде лінійно залежати від зміни струму навантаження.

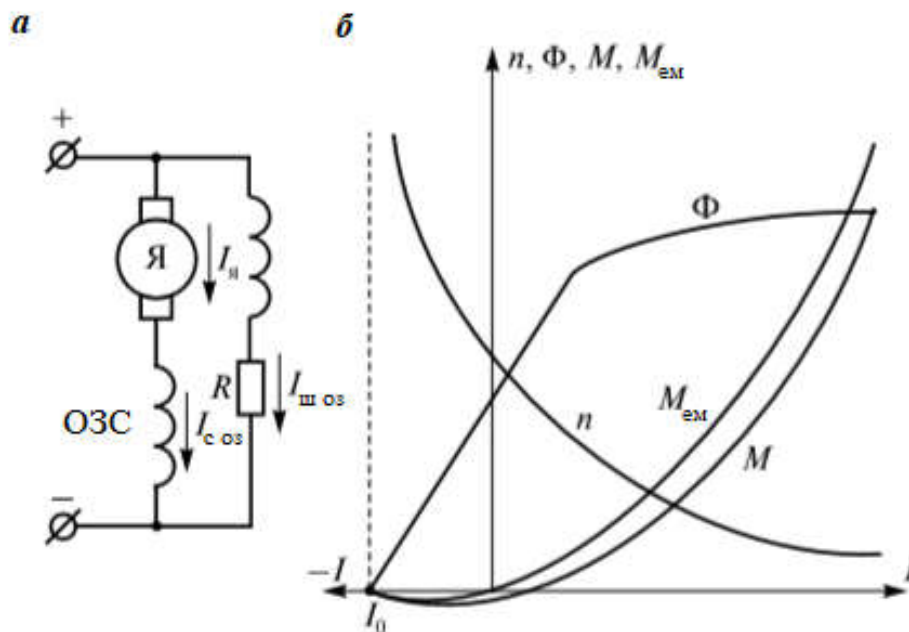
Деяке зменшення результуючого магнітного потоку, показане на

рис. 2.4 пов'язане з розмагнічувальним впливом реакції якоря, що виникає під час протікання струму по обмотці якоря.

Характер зміни частоти обертання вала тягового електродвигуна можна визначити з рівняння (2.4). З одного боку, збільшення струму навантаження призводить до зростання складової  $I \sum r$ , отже, зменшення частоти обертання, з іншого – зменшення магнітного потоку  $\Phi$ , призводить до зростання частоти обертання. Зазвичай вплив реакції якоря невеликий і дія складової  $I \sum r$  переважає. Отже, зі зростанням струму навантаження частота обертання незначно зменшується (у межах 5...10 %).

## 2.4. Електромеханічна характеристика тягового електродвигуна з узгоджено-змішаною системою збудження

На рис. 2.5 показані схема включення та електромеханічна характеристика електродвигуна узгоджено-змішаного збудження.



Рису. 2.5. Схема включення (а) та електромеханічна характеристика (б) тягового двигуна узгоджено-змішаного збудження

Особливість конструкції електродвигуна полягає в тому, що на його головні полюси намотуються відразу дві обмотки – послідовна (серієсна) і паралельна (шунтова). Причому обмотки намотані таким чином, щоб створювані ними магніторушійні сили додавались під час створення магнітного потоку. Загальну магніторушійну силу, створювану обмотками збудження головних полюсів, можна визначити за формулою:

$$F_{\text{мрс}} = I_{\text{с}} w_{\text{с}} + I_{\text{ш}} w_{\text{ш}}, \quad (2.10)$$

де  $I_{\text{с}}$ ,  $I_{\text{ш}}$  – струм, що протікає по послідовній (серієсній) і паралельній (шунтовій) обмоткам збудження тягового двигуна відповідно;

$w_{\text{с}}$ ,  $w_{\text{ш}}$  – число витків серієсної та шунтової обмоток збудження відповідно.

Оскільки струм в шунтовій обмотці постійний, рівняння (2.10) можна привести до виду:

$$F_{\text{мрс}} = (I + I_0) w_{\text{с}}, \quad (2.11)$$

де

$$I_0 = I_{\text{ш}} \frac{w_{\text{ш}}}{w_{\text{с}}}.$$

Отже, тяговий електродвигун узгоджено-змішаного збудження можна розглядати як електричну машину послідовного збудження, через яку поряд зі струмом якоря протікає незмінний струм  $I_0$ . Тому залежності магнітного потоку  $\Phi$  і частоти обертання  $n$  від струму якоря  $I$  в двигуні узгоджено-змішаного збудження, будуть подібні залежностям для двигуна послідовного збудження з тією лише різницею, що початок координат буде зрушено вліво на величину струму  $I_0$ .

В електродвигуні узгоджено-змішаного збудження за струмом якоря рівному нулю зберігається магніторушійна сила паралельної обмотки, що забезпечує можливість автоматичного переходу електродвигунів в режим рекуперативного гальмування (для електрорухомого складу). Так як при цьому струм якоря змінює напрямок, то в рекупе-



ративному режимі електродвигун працює як генератор зустрічно-змішаного збудження. Тому зі збільшенням струму рекуперації зменшується магнітний потік  $i$ , отже, різко зростає швидкість. Під час переходу в генераторний режим електромагнітний момент стає гальмівним. Під час збільшення струму рекуперації він спочатку зростає, а за великих струмах рекуперації машина сильно розмагнічується і абсолютне значення електромагнітного моменту наближається до нуля.

## 2.5. Електромеханічна характеристика електродвигуна зустрічно-змішаного збудження

Схема даного типу двигуна та його електромеханічна характеристика наведені на рис. 2.6.

Відмінність цього електродвигуна від розглянутого вище виявляється в тому, що серієсна та шунтова обмотки збудження тягового електродвигуна намотані не узгоджено, а зустрічно, тобто їх магніторушійні сили не додаються, а віднімаються:

$$F_{\text{мрс}} = I_c w_c - I_{\text{ш}} w_{\text{ш}}. \quad (2.12)$$

Якщо магніторушійна сила (МРС) паралельної обмотки збудження виявиться більше МРС серієсної обмотки, то такий електродвигун не можна використовувати на тяговому рухомому складі через електричну нестійкість його роботи.

Рівняння (2.12) можна представити в наступному вигляді:

$$F_{\text{мрс}} = (I - I_0) w_c, \quad (2.13)$$

де

$$I_0 = I_{\text{ш}} \frac{w_{\text{ш}}}{w_c}.$$

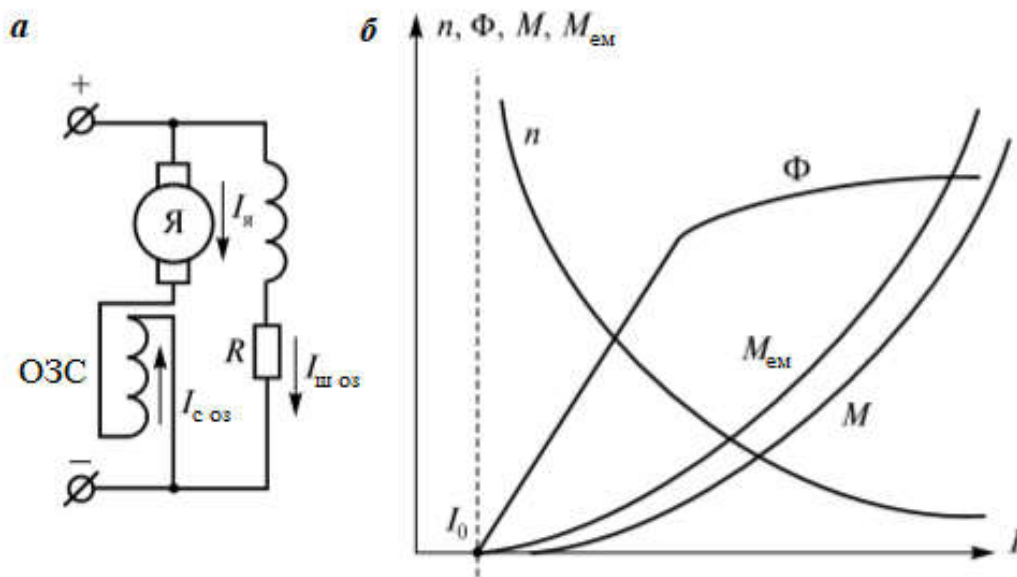


Рис. 2.6. Схема включення (а) та електромеханічна характеристика (б) тягового двигуна зустрічно-змішаного збудження

Електромеханічна характеристика електродвигуна даного типу у разі переважання серієсної обмотки практично подібна до характеристики електродвигуна послідовного збудження, якщо початок координат змістити вправо на величину струму  $I_0$ .

## 2.6. Приведення електромеханічних характеристик тягових електродвигунів до колісних пар локомотива

Електромеханічні характеристики, віднесені до ободів колісних пар локомотивів отримують шляхом перерахунку характеристик на валах тягових електродвигунів. Як показано на рис. 2.7, вал якоря тягового двигуна пов'язаний з колісною парою через зубчасту передачу (редуктор), причому шестерня, пов'язана з валом якоря тягового електродвигуна, має менше число зубців, ніж зубчасте колесо, насаджене на вісь колісної пари або на подовжену маточину колеса. Відношення числа зубів зубчастого колеса до числа зубів шестерні називається передавальним відношенням редуктора  $\mu$ .

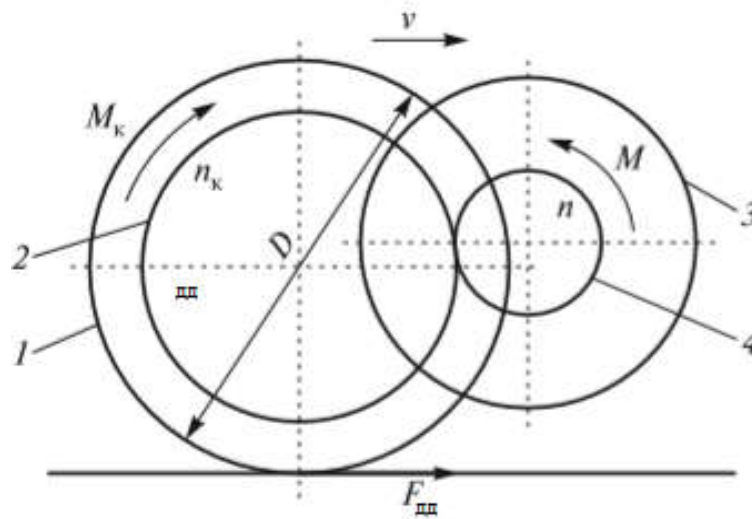


Рис. 2.7. Схема передачі крутного моменту від тягового двигуна до колісної пари

Залежність між швидкістю руху та частотою обертання валу тягового електродвигуна знаходиться наступним чином.

Лінійна швидкість на ободах колісних пар локомотива дорівнює

$$v = \frac{\pi D n_{\text{кп}}}{60}. \quad (2.14)$$

де  $n_{\text{кп}}$  – частота обертання колісної пари,  $\text{хв}^{-1}$ .

Частота обертання колісної пари в  $\mu$  разів менше частоти обертання валу якоря тягового електродвигуна:

$$n_{\text{кп}} = \frac{n}{\mu}.$$

З огляду на це співвідношення, формулу (2.14) можна записати в наступному вигляді:

$$v = \frac{\pi D n}{60\mu}. \quad (2.15)$$

На практиці швидкість руху найчастіше представляють не в м/с, а в км/год. Оскільки  $1 \text{ м/с} = 3,6 \text{ км/год}$ , для швидкості, вираженої в км/год, отримаємо

$$v = \frac{\pi D n}{60 \mu} \cdot 3,6 = 0,188 \frac{\pi D n}{\mu}. \quad (2.16)$$

Дотичну силу тяги, прикладену до ободів однієї колісної пари, можна визначити за формулою

$$F_{\text{дд}} = \frac{2M_{\text{к}}}{D}, \quad (2.17)$$

де  $M_{\text{к}}$  – обертаючий момент на валу колісної пари, Н·м;

$D$  – діаметр колісної пари, м.

З урахуванням ККД осьового редуктора  $\eta_{\text{ор}}$  і його передавального відношення  $\mu$  вираз (2.17) набуде вигляду

$$F_{\text{дд}} = \frac{2M\mu\eta_{\text{ор}}}{D}.$$

Дотична сила тяги локомотива визначається за формулою

$$F_{\text{д}} = \frac{2M\mu\eta_{\text{ор}}m}{D}. \quad (2.19)$$

де  $m$  – число тягових колісних пар.

За допомогою формул (2.16) і (2.19) за заданими електромеханічними характеристиками тягових електродвигунів можна розрахувати тягові характеристики ЕРС.

Для цього задають 8–10 значень струму тягового електродвигуна в діапазоні від 0 до максимального струму, за електромеханічною характеристикою визначають частоту обертання та крутний момент тягового електродвигуна, а за формулами (2.16) і (2.19) швидкість руху та силу тяги. При цьому результати розрахунку зручно представити у вигляді табл. 2.1.

На рис. 2.8 показані тягові характеристики локомотива за різні системи збудження та обмеження, що накладаються на тягову характеристику.

Як видно з рис. 2.8, тягова характеристика локомотива обмежується

трьома основними параметрами:

- максимальним струмом тягового електродвигуна та зчепленням колісних пар з рейками у разі низьких швидкостях руху та великих значеннях крутного моменту;

- максимальною швидкістю руху, яка визначається конструктивними особливостями екіпажу;

- максимально допустимою частотою обертання вала електродвигуна або максимально допустимою напругою, що підводиться.

Таблиця 2.1

### Розрахунок тягової характеристики ЕРС

№ п/п	$I$	$n$	$M$	$v$	$F_d$
	A	хв <sup>-1</sup>	Н·м	км/год	Н

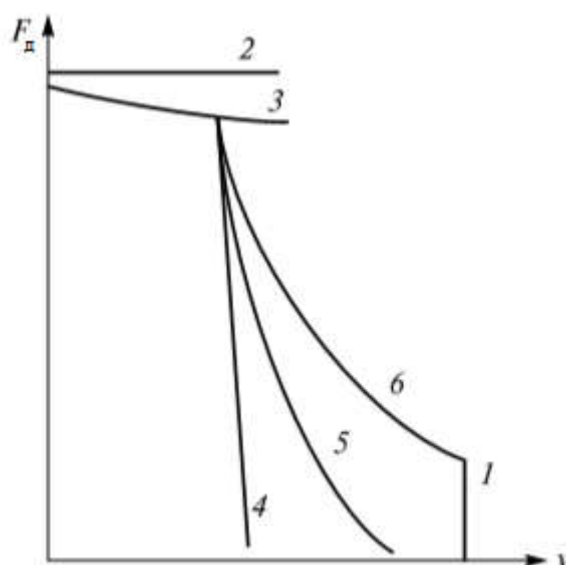


Рис. 2.8. Тягові характеристики локомотива за різних системах збудження:

1 – обмеження по максимальній швидкості руху; 2 – обмеження по максимальному струму тягового електродвигуна; 3 – обмеження по зчепленню колісних пар з рейками; 4 – тягова характеристика локомотива з двигунами незалежного та паралельного збудження; 5 – тягова характеристика локомотива з двигунами узгоджено-змішаного збудження; 6 – тягова характеристика ЕРС з двигунами серієсного збудження

## 2.7. Порівняння характеристик тягових електродвигунів. Вимоги, що висуваються до характеристик тягових електродвигунів

Характеристики електродвигунів, використовуваних для тяги поїздів, повинні відповідати таким вимогам:

- електрична стійкість режимів роботи;
- механічна стійкість руху поїзда;
- рівномірний розподіл навантажень між паралельно працюючими тяговими двигунами;
- можливо менші зміни навантаження двигунів у разі коливання напруги в контактній мережі;
- найменші зміни споживаної потужності під час руху поїзда по різних елементах профілю;
- економічне регулювання швидкості в широкому діапазоні;
- найменша витрата енергії на тягу поїздів;
- використання рекуперативного гальмування;
- максимальне використання зчеплення колісних пар з рейками;
- надійність в роботі.

**Електрична стійкість.** Під електричною стійкістю розуміють відновлення електродвигунами значення усталеного струму під час його незначних випадкових відхилень. Дана вимога є найбільш важливою, так як електрично нестійкий електродвигун не можна використовувати на практиці.

Для визначення електричної стійкості використовують рівняння (2.3), яке приводять до вигляду

$$I = \frac{U - c_e n \Phi}{\sum r}. \quad (2.20)$$

При цьому частоту обертання за швидко протікаючих електричних процесах можна вважати практично незмінною.

Як показано вище, електрично нестійким є електродвигун зустрічно-змішаного збудження.

**Механічна стійкість.** Механічною стійкістю називають прагнення тягового електродвигуна до відновлення сталої швидкості руху у разі виникнення її відхилень. Як відомо з механіки, усталений рух виникає

за рівності сили тяги силам опору руху. Для визначення механічної стійкості тягових електродвигунів з різними системами збудження нанесемо на рис. 2.8 криві сил опору руху (рис. 2.9), які дещо зростають зі зростанням швидкості.

Усталений рух поїзда виникає в точках перетину кривих сил тяги (1–3) з кривою опору руху (4).

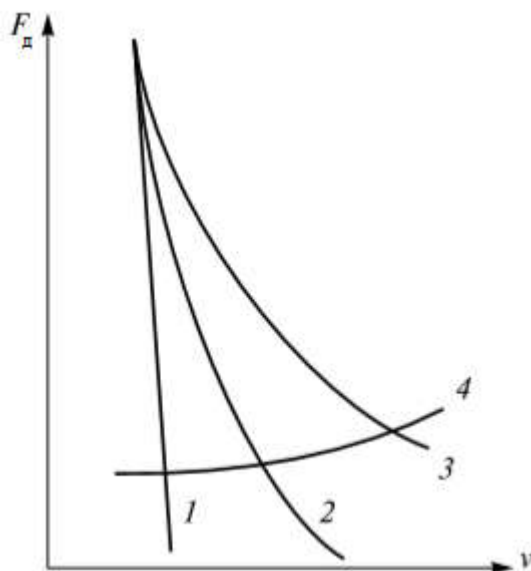


Рис. 2.9. До визначення механічної стійкості тягових електродвигунів у разі різних систем збудження:

1 – тягова характеристика локомотива з двигуном паралельного або незалежного збудження; 2 – тягова характеристика локомотива з двигуном узгоджено-змішаного збудження; 3 – тягова характеристика локомотива з двигуном послідовного збудження; 4 – крива сил опору руху  $W$

Як видно з рис. 2.9 для всіх трьох розглянутих випадків у разі випадкового збільшення швидкості руху сила опору руху стане більше сили тяги. Отже, поїзд почне сповільнюватися аж до досягнення сталої швидкості руху. У разі випадкового зменшення сили тяги, навпаки, стають більші сили опору руху, отже, поїзд буде набирати швидкість до досягнення сталої швидкості руху.

**Рівномірний розподіл навантаження між тяговими електродвигунами.** Як правило, локомотиви мають кілька тягових електродвигунів, що включаються в паралельні гілки. Під час виготовлення неминучі відхилення розмірів деталей, якості обробки поверхонь, магнітних властивостей використовуваних сталей в межах встановлених допусків. Тому електромеханічні характеристики електродвигунів

дещо відрізняються один від одного. Певну роль відіграють також відмінності в діаметрах колісних пар локомотива. Всі ці відхилення є причиною нерівномірного розподілу навантажень по колісним парам локомотива.

З аналізу електромеханічних характеристик випливає, що електродвигуни послідовного збудження, які мають м'які характеристики, забезпечують більш рівномірний розподіл навантажень в порівнянні з електродвигунами узгоджено-змішаного та паралельного збудження.

**Зміна навантажень тягових електродвигунів у разі зміни напруги в контактній мережі.** Як видно з формули (2.4), частота обертання залежить від напруги на електродвигуні, яка визначається напругою в контактній мережі. Отже, у разі зміни напруги в контактній мережі зміниться і залежність  $n = f(I)$ . На рис. 2.10 показано вплив зміни напруги в контактній мережі на струм і крутний момент для електродвигуна з послідовною та паралельною системою збудження. У разі стрибкоподібної зміни напруги частота обертання вала електродвигуна завдяки його інерційним властивостям практично не змінюється, отже, перехід від однієї залежності  $n = f(I)$  до іншої відбувається по горизонтальній лінії. Як видно з рис. 2.10, зміна струму тягового електродвигуна  $\Delta I$  і крутного моменту  $\Delta M$  в електродвигунах послідовного збудження невелика, а в двигунах паралельного збудження вона значно більша.

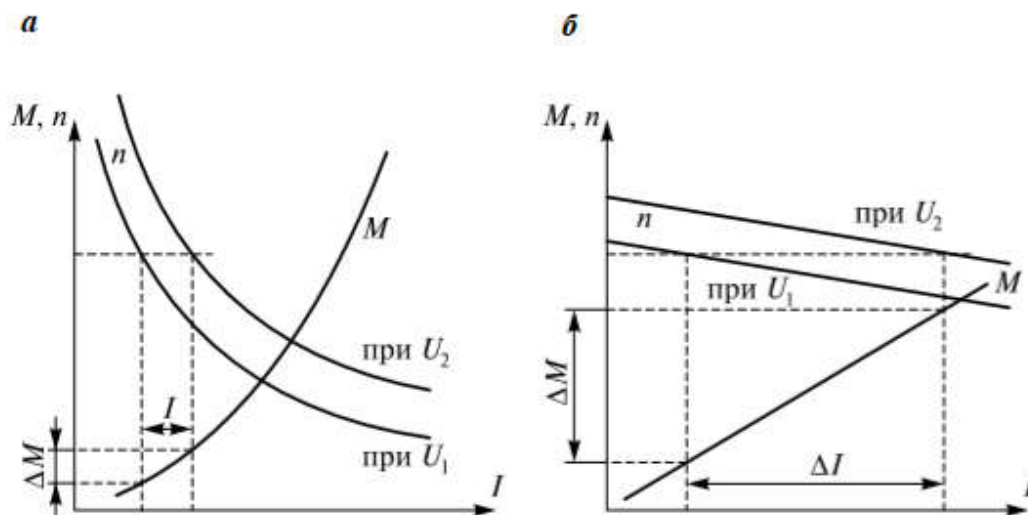


Рис. 2.10. Вплив зміни напруги на струм навантаження та крутний момент тягового двигуна:

а – двигун послідовного збудження; б – двигун паралельного збудження



**Зміни потужності, споживаної тяговими електродвигунами під час руху по різних елементах профілю.** Залежно від умов руху тягові електродвигуни локомотива розвивають різні потужності. У разі проходження по легких ділянках профілю вони працюють з невеликими навантаженнями та споживаними потужностями. У разі руху поїзда на важких підйомах електродвигуни працюють з великими струмами навантаження та потужностями. У разі збереження режиму ведення поїзда для тягових двигунів незалежного та паралельного збудження швидкість руху зменшується незначно і, отже, споживана потужність зростає практично паралельно зі збільшенням сили тяги (крутного моменту).

Тягові електродвигуни послідовного збудження у разі підвищення сили тяги знижують швидкість руху, отже, споживана ними потужність і струм виявляються менше, ніж у електродвигунів паралельного збудження, що сприяє більш рівномірному завантаженню тягових підстанцій.

**Використання пропускної здатності ліній.** Тягові електродвигуни послідовного збудження забезпечують рух на важких підйомах з меншими швидкостями, ніж на більш легких ділянках колії. Ділянки з важкими підйомами обмежують кількість пар поїздів, що пропускаються. При використанні тягових електродвигунів паралельного збудження швидкість руху поїздів по всіх елементах профілю буде приблизно однаковою та на важких підйомах буде більше, ніж з електродвигунами послідовного збудження.

**Економічне регулювання швидкості руху.** Швидкість руху поїзда при установці на локомотиві електродвигунів паралельного і змішаного збудження можна легко регулювати, змінюючи магнітний потік шляхом впливу на невеликий струм збудження. У електродвигунах послідовного збудження для регулювання магнітного потоку потрібно ускладнити силове коло і ввести додаткове обладнання через великі струми, що протікають через обмотку збудження. Однак в цьому випадку потрібна менша кількість ступенів регулювання завдяки м'яким характеристикам електродвигунів і меншим діапазонам зон регулювання швидкості.

**Витрата електроенергії на тягу поїздів.** Під час постійної швидкості руху відбувається менша робота по переміщенню поїзда. Тому у разі використання електродвигунів паралельного збудження витрача-

ється менше електроенергії. У разі використання електродвигунів послідовного збудження швидкість руху змінюється в широких межах залежно від профілю колії. У разі рівної середньої швидкості в останньому випадку потрібно зробити велику роботу та витратити трохи більше енергії. Це пов'язано з тим, що опір руху зі збільшенням швидкості зростає сильніше, ніж сама швидкість руху. Частково така перевитрата енергії компенсується зниженням втрат в пусковому реостаті за рахунок більш низьких швидкостей виходу на безреостатні характеристики.

**Використання рекуперативного гальмування.** Рекуперативне гальмування дозволяє зменшити витрату електроенергії завдяки її поверненню в мережу під час руху поїзда на спуску або у разі зниження швидкості руху. Тягові електродвигуни паралельного та узгоджено-змішаного збудження переходять в режим рекуперації (в генераторний режим роботи) автоматично у разі збільшення швидкості руху.

Тягові електродвигуни послідовного збудження в режимі рекуперації стійко працювати не можуть. Тому на електрорухомому складі електродвигуни переводять на незалежне збудження від спеціального перетворювача, що ускладнює обладнання та електричні схеми.

**Умови зчеплення коліс з рейками.** У разі використання електродвигунів паралельного або незалежного збудження зчеплення колісних пар з рейками відновлюється швидше. Середнє значення сили тяги по зчепленню та коефіцієнт зчеплення отримуються більші, ніж у разі використання електродвигунів послідовного збудження.

З аналізу пропонованих до тягових електродвигунів вимог видно, що кожна система збудження має свої переваги та недоліки. Однак за такими найважливішими показниками, як рівномірність розподілу навантажень, менша зміна навантаження у разі коливання напруги в контактній мережі, менша зміна потужності під час руху по різних елементах профілю колії, електродвигуни послідовного збудження мають переваги. Тому ці електродвигуни використовуються в якості тягових на локомотивах. Їх недолік – більш низький коефіцієнт зчеплення – усувають за допомогою різних систем протибоксовочного захисту. Для забезпечення рекуперації електродвигуни переводять на незалежне збудження, хоча це і ускладнює електрообладнання локомотива.

## **2.8. Способи регулювання швидкості руху на тяговому рухомому складі**

Тяговий рухомий склад повинен забезпечувати зрушення з місця, розгін і рух з різними швидкостями, прискореннями та уповільненнями. Як видно з формули (2.4), регулювати частоту обертання (швидкість) можна трьома способами:

- змінюючи напругу, що підводиться до тягового двигуна;
- змінюючи магнітний потік, створюваний обмоткою збудження двигуна;
- вводячи додатковий опір в коло обмотки якоря тягового двигуна.

Перші два способи набули широкого поширення на тяговому рухомому складі, тому що в цьому випадку відсутні додаткові втрати енергії.

Третій спосіб (введення додаткового опору) використовується, як правило, тільки при рушанні з місця електрорухомого складу постійного струму. В процесі зміни схеми з'єднання тягових електродвигунів у разі введення додаткових опорів в коло обмотки якоря значна частина енергії, що підводиться, буде витрачатися на нагрів цих опорів, не здійснюючи корисної роботи та тим самим значно знижуючи ККД локомотива.

## **2.9. Регулювання швидкості руху шляхом зміни напруги**

На деяких локомотивах постійного струму напруга, прикладена до затискачів тягових електродвигунів, змінюється шляхом зміни схеми їх з'єднання. Номінальна напруга в мережі постійного струму і, отже, в струмоприймачі електрорухомого складу становить 3000 В. Тягові електродвигуни електрорухомого складу, як правило, виготовляють на максимальну напругу 1500 В. Таким чином, на напругу контактної мережі необхідно включити послідовно, як мінімум, два тягових електродвигуна. Якщо встановити послідовно більше число тягових електродвигунів, то напруга на кожному з них буде менша.

На шестивісних електровозах застосовуються три можливі схеми

з'єднання тягових електродвигунів (рис. 2.11) – послідовне, послідовно-паралельне та паралельне з'єднання. У разі послідовного з'єднання на затискачі кожного електродвигуна подається напруга 500 В, у разі послідовно-паралельного – 1000 В, у разі паралельного – 1500 В. Схожа картина буде і для восьмивісних електровозів лише з тією різницею що послідовне з'єднання утворюється вісьмома послідовно з'єднаними електродвигунами (напруга 375 В), послідовно-паралельне – двома групами з чотирьох послідовно з'єднаних електродвигунів (напруга 750 В), а паралельне – чотирма групами по два послідовно з'єднаних електродвигуна (напруга 1500 В).

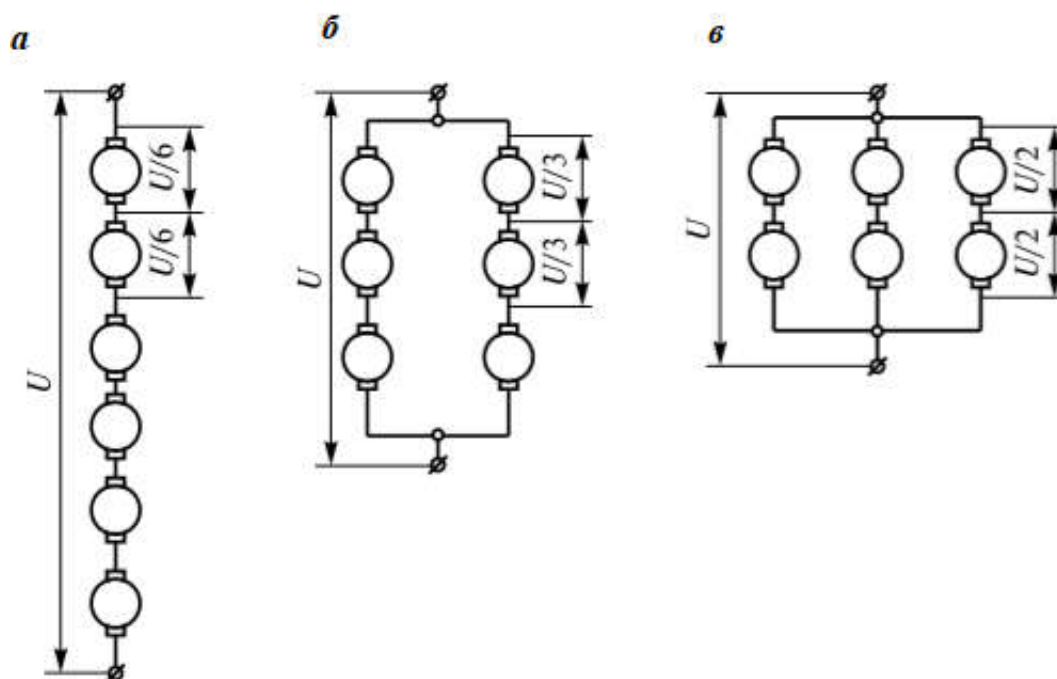


Рис. 2.11. Схеми з'єднання тягових електродвигунів:

*а* – послідовне з'єднання; *б* – послідовно-паралельне з'єднання; *в* – паралельне з'єднання

На чотиривісних електровозах та електропоїздах ЕР1 і ЕР2 використовуються дві схеми з'єднання електродвигунів – послідовне (750 В на один двигун) та паралельне (1500 В на один електродвигун). Тягові електродвигуни електропоїздів ЕД4, ЕР2Т, ЕР2Р, ЕР22 розраховані на напругу 750 В, тому використовується тільки послідовне їх з'єднання.

На електрорухомому складі змінного струму напруга, що подається до тягових електродвигунів, змінюється шляхом налаштування числа витків первинної (рис. 2.12, *а*) або вторинної (рис. 2.12, *б*) обмотки тягового трансформатора.

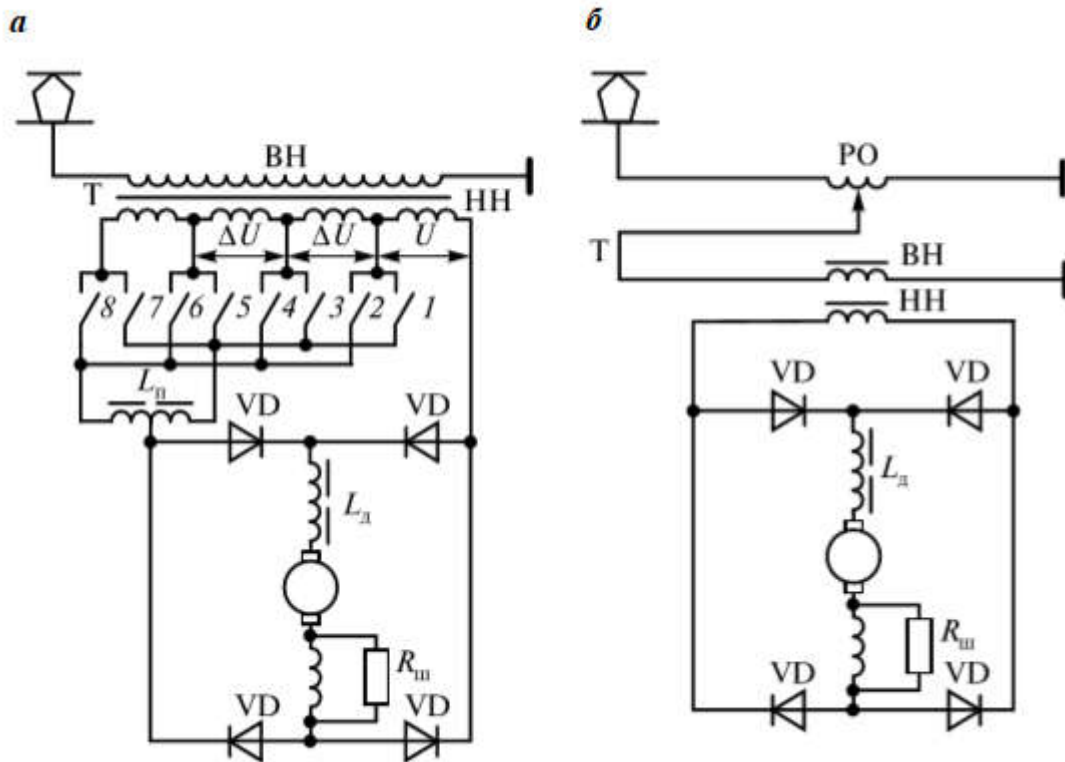


Рис. 2.12. Керування зміною напруги на електрорухомому складі змінного струму:

*a* – регулювання на боці низької напруги (НН); *б* – регулювання на боці високої напруги (ВН); Т – трансформатор; РО – регулятор ослаблення

Відомі електромеханічні характеристики для одної напруги, наприклад 500 В у разі послідовного з'єднання (див. рис. 2.11, а) можуть бути досить просто перераховані на іншу напругу, наприклад 1000 В у разі послідовно-паралельного з'єднання (див. рис. 2.11, б). Такі ж дії можуть бути виконані у разі зміни напруги на ЕРС змінного струму.

Для перерахунку характеристики з напруги  $U_{д1}$  на напругу  $U_{д2}$  застосовується наступний порядок. Користуючись формулою (2.4), визначають частоту обертання валу електродвигуна при напрузі  $U_{д1}$  і струмі тягового електродвигуна  $I_{д}$ :

$$n_1 = \frac{U_{д1} - I_{д} \sum r}{c_e \Phi}. \quad (2.21)$$

Аналогічно обчислюють частоту обертання вала тягового електродвигуна за напругою та струмом ТВД

$$n_2 = \frac{U_{д2} - I_{д} \sum r}{c_e \Phi}. \quad (2.22)$$

Розділивши вираз (2.22) на вираз (2.21) отримаємо

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{U_{д2} - I_{д} \sum r}{U_{д1} - I_{д} \sum r}, \quad (2.23)$$

тобто частоти обертання будуть прямопропорційні ЕРС тягового електродвигуна. Вираз (2.23) можна записати в наступному вигляді:

$$n_2 = \frac{U_{д2} - I_{д} \sum r}{U_{д1} - I_{д} \sum r} \cdot n_1. \quad (2.24)$$

Падіння напруги на валу тягового електродвигуна (потужність дорівнює кільком сотням кВт) в порівнянні з доданою до його затискачів напругою становить не більше 2...4%, тому з достатньою точністю можна написати

$$n_2 = \frac{U_{д2}}{U_{д1}} \cdot n_1. \quad (2.25)$$

Як видно з виразів (2.7) і (2.8), електромагнітний потік і крутний момент від прикладеного до затискачів тягового електродвигуна напруга не залежать, і, отже, значення струму та магнітного потоку залишаться незмінними. Тому не зміниться й створювана двигуном сила тяги. Електромеханічні характеристики за різні напруги матимуть той же вигляд, що і на рис. 2.10, а. З урахуванням виразів (2.15) і (2.25) можна записати

$$v_2 = \frac{U_{д2}}{U_{д1}} \cdot v_1. \quad (2.26)$$

Тягова характеристика ЕРС з електродвигунами послідовного збудження при різних значеннях підведеної напруги буде мати вигляд, показаний на рис. 2.13.

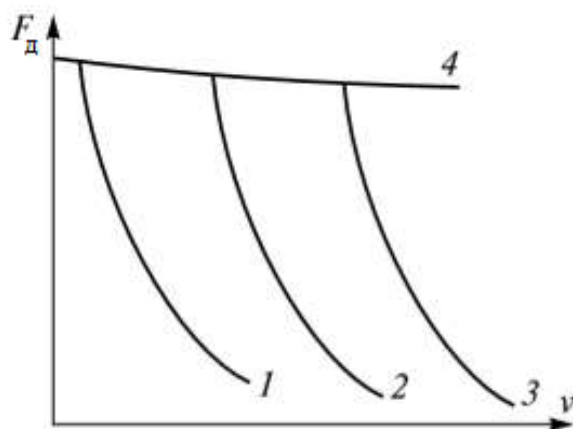


Рис. 2.13. Тягова характеристика ЕРС за різні значення підведеної напруги: 1 — тягова характеристика при напрузі  $U_{д1}$ ; 2 — тягова характеристика при напрузі  $U_{д2}$ ; 3 — тягова характеристика при напрузі  $U_{д3}$ ; 4 — обмеження по зчепленню коліс з рейками  
 $U_{д1} < U_{д2} < U_{д3}$

## 2.10. Регулювання швидкості руху шляхом зміни магнітного потоку

Ступінь зміни магнітного потоку тягового електродвигуна характеризує коефіцієнт регулювання збудження (ступінь ослаблення збудження (ОЗ), також звана ступенем ослаблення поля (ОП)), що дорівнює відношенню магніторушійної сили головних полюсів у разі ослабленого збудження  $(I_3 w)_{оз}$  до магніторушійної сили головних полюсів у разі повного збудження  $(I_3 w)_{пз}$

$$\beta = \frac{(I_3 w)_{оз}}{(I_3 w)_{пз}}. \quad (2.27)$$

У разі шунтування обмотки збудження електродвигуна з послідов-

ним збудженням струм збудження  $I_3$  менше струму якоря  $I_d$ . Оскільки число витків обмотки збудження незмінне, то коефіцієнт  $\beta$  дорівнює відношенню струму в обмотці збудження  $I_3$  до струму якоря  $I_d$

$$\beta = \frac{I_3}{I_d}. \quad (2.28)$$

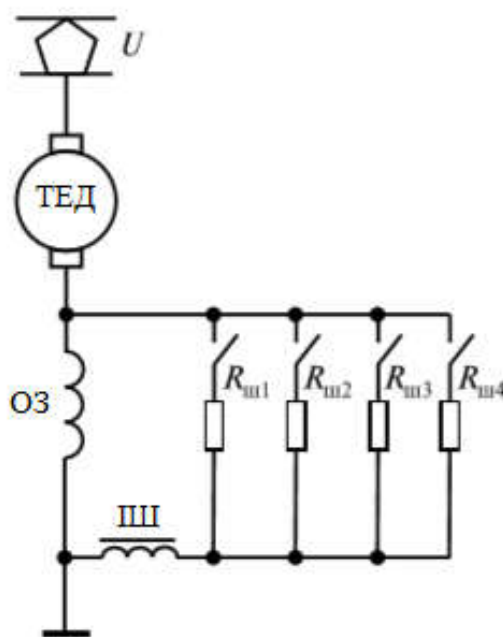


Рис. 2.14. Управління зміною магнітного потоку на ЕРС:  
 ОЗ – обмотка збудження;  $I_{ш}$  – індуктивний шунт;  $R_{ш1} \dots R_{ш4}$  – опір шунтів

Ступінь ослаблення збудження може досягати певної межі, нижче якої порушується нормальна комутація на колекторі тягового електродвигуна, що може привести до кругового вогню. Зазвичай найменший коефіцієнт регулювання збудження на електровозах становить  $0,3 \dots 0,5$ . У електродвигунів з компенсаційною обмоткою можна допустити більш глибоке ослаблення магнітного потоку – до  $0,2 \dots 0,25$ . Як правило, на ЕРС використовується кілька ступенів ослаблення збудження (рис. 2.14), що дозволяє отримати більшу кількість ходових позицій контролера.

Щоб зрозуміти, як зміниться характеристика тягового електродвигуна у разі включення ступеня ослаблення збудження, припустимо, що завдяки інерційним властивостям рухомого складу швидкість руху (частота обертання) практично не змінилася, тобто



$$n_{\text{пз}} = n_{\text{оз}}. \quad (2.29)$$

Використовуючи вираз (2.5), отримаємо такий вираз:

$$\frac{U_{\text{д}} - I_{\text{дпз}} \sum r_{\text{пз}}}{c_e \Phi_{\text{пз}}} = \frac{U_{\text{д}} - I_{\text{доз}} \sum r_{\text{оз}}}{c_e \Phi_{\text{оз}}}. \quad (2.30)$$

Як було сказано вище, падіння напруги в ланцюзі тягового електродвигуна  $I_{\text{д}} \sum r$  становить 2...4% від напруги, прикладеної до його затискачів, отже, з достатньою точністю можна написати

$$\frac{U_{\text{д}}}{\Phi_{\text{пз}}} = \frac{U_{\text{д}}}{\Phi_{\text{оз}}}. \quad (2.31)$$

Тобто за ту ж саму частоту обертання вала тягового електродвигуна у разі включення ослаблення поля (напруга постійна) магнітний потік повинен залишатися незмінним

$$\Phi_{\text{пз}} = \Phi_{\text{оз}}. \quad (2.32)$$

Отже, незмінним має залишатися й струм в обмотці збудження тягового електродвигуна

$$I_{\text{оз}} = I_{\text{зпз}}. \quad (2.33)$$

Визначимо, як у разі включення ослаблення збудження зміниться струм якоря тягового електродвигуна. Для цього в вираз (2.33) підставимо струм електродвигуна з виразу (2.28):

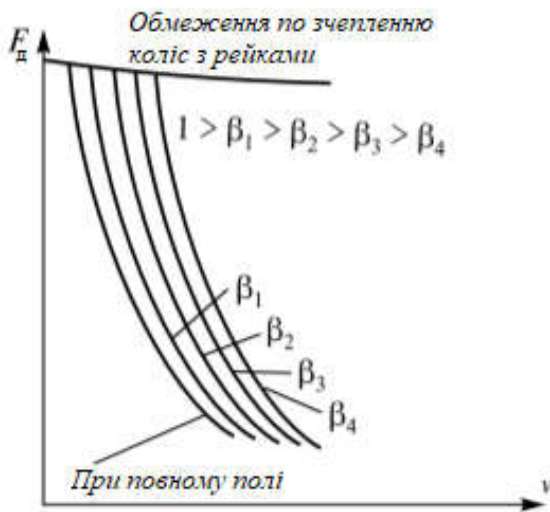
$$I_{\text{доз}} \beta = I_{\text{дпз}}. \quad (2.34)$$

У більш зручній для сприйняття формі вираз має вигляд

$$I_{\text{доз}} = \frac{I_{\text{дпз}}}{\beta}. \quad (2.35)$$

Користуючись виразом для електромагнітного моменту (2.6) і виразами (2.32) і (2.35), після ряду елементарних підстановок отримаємо

$$M_{\text{емоз}} = \frac{M_{\text{емпз}}}{\beta}. \quad (2.36)$$



Тобто за тією ж самою частотою обертання (швидкості руху) електромагнітний момент (сила тяги) виявиться в  $1/\beta$  разів більше, ніж при повному збудженні. Тягова характеристика ЕРС з двигунами послідовного збудження за різні значення ослаблення збудження та постійну підведену напругу буде мати вигляд, показаний на рис. 2.15.

Рис. 2.15. Тягова характеристика ЕРС за різні ступені ослаблення  $\beta$  поля

## 2.11. Управління зміною опору в якірному колі тягових електродвигунів

Управління тяговими електродвигунами шляхом зміни падіння напруги у колі якоря пов'язане з необхідністю мати потужні резистори в якірному колі тягового електродвигуна і, як наслідок, з наявністю втрат енергії в них. На ЕРС постійного струму зміна опору застосовується дуже широко для пуску та розгону, тому що в кузові локомотива можна розмістити будь-яке число пускових резисторів. Більш економічні методи регулювання ще не знайшли широкого поширення.

Реостатний пуск підтримує необхідні значення пускового струму та пускової сили тяги в процесі розгону ЕРС до виходу на ходову ступінь швидкісної характеристики тягових двигунів. Пускові сила тяги та струм визначаються умовами зчеплення коліс з рейками, заданими прискоренням і способом реостатного пуску. Необхідність застосування реостатного пуску на ЕРС постійного струму пояснюється тим,

що активний опір тягових електродвигунів відносно невеликий (менше 0,1 Ом), а ЕРС в момент рушення дорівнює нулю. Навіть у разі восьми послідовно включених тягових електродвигунів опір кола не перевищить 1 Ом.

Струм, що протікає через якірні обмотки тягового електродвигуна у разі спроби рушити з місця, ЕРС постійного струму без пускових реостатів складе:

$$I = \frac{U - cn\Phi_e}{\sum r} = \frac{300 - 0}{1,0} = 300 \text{ А.}$$

Як видно, струм значно перевищує допустимий струм, крім того, за таким струмом значно будуть перевищені сила тяги за умовами зчеплення коліс з рейками й максимально допустиме прискорення поїзда.

Процес реостатного пуску показаний на рис. 2.16.

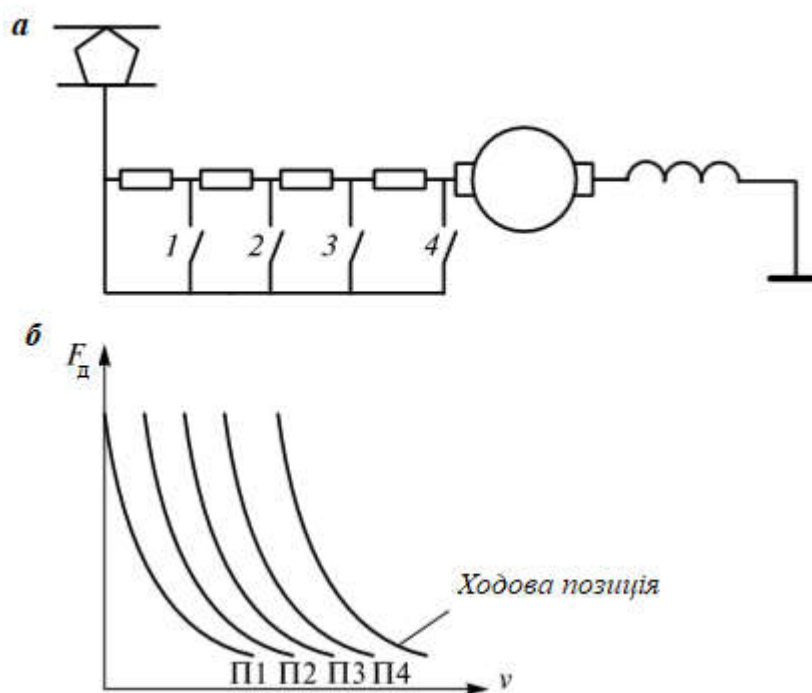


Рис. 2.16. Реостатний пуск ЕРС постійного струму:

а – схема з'єднання під час реостатного пуску; б – тягові характеристики під час реостатного пуску; 1–4 – контактори; П1–П4 – характеристики реостатних позицій

Рушання поїзда починається за всіх введених пускових опорах (контакти 1–4 розімкнуті). Під час розгону сила тяги та струм тягового

електродвигуна зменшуються (лінія П1). Для підтримки необхідних значень сили тяги та продовження розгону машиніст починає виводити пускові опори, переходячи на інші пускові характеристики. Характеристиці П2 відповідає замкнений контакт 1 (в колі двигуна – 3 опору), характеристиці П3 – замкнуті контакти 1 і 2 (в колі електродвигуна – 2 опору), характеристиці П4 – замкнуті контакти 1, 2 і 3 (в колі електродвигуна – один опір), і, нарешті, при ходовій позиції замкнуті контакти 1–4, тобто з ярірного кола електродвигуна виведені всі пускові опори.

## **2.12. Електромеханічні та тягові характеристики ЕРС постійного струму**

У довідковій літературі електромеханічні характеристики тягових двигунів наводяться до колісних пар локомотива (див. п.р. 2.6) і будуються для різних режимів роботи (див. п.р. 2.9–2.11). Як приклад на рис. 2.17 приведені електромеханічні характеристики тягового електродвигуна ТЛ-2К електровоза ВЛ10<sup>У</sup>.

Методика побудови розрахункових тягових характеристик детально представлена в п. 2.6. На рис. 2.18 показана тягова характеристика електровоза ВЛ10<sup>У</sup>. Як видно з рисунків, даний восьмивісний електровоз має три схеми з'єднання тягових електродвигунів і чотири ступеня ослаблення магнітного поля збудження.

На тягових характеристиках ЕРС виділяють три основні режими роботи – розрахунковий, годинний та тривалий.

Розрахунковим називається режим, встановлений по тяговій характеристиці ЕРС виходячи з максимально повного використання потужності ЕРС з урахуванням обмеження сили тяги.

Розрахунковий режим (відповідно й розрахункова швидкість) і розрахункова дотична сила тяги електровоза постійного струму зазвичай відповідають точкам переходу з обмеження сили тяги по зчепленню на обмеження по струму комутації двигунів. За розрахунковим режимом роботи електровоза визначають вагові норми та проводять основні тягово-енергетичні розрахунки.

Тривалий та годинний режими роботи визначаються нагріванням тягових електродвигунів ЕРС. Годинним режимом називається режим

роботи з найбільшим струмом, за яким з практично холодного стану ТЕД протягом однієї години за номінальною напругою не відбувається перевищення гранично допустимих температур. Тривалим режимом називається режим роботи з найбільшим струмом, за яким протягом необмеженого часу за номінальну напругу не перевищуються гранично допустимі температури.

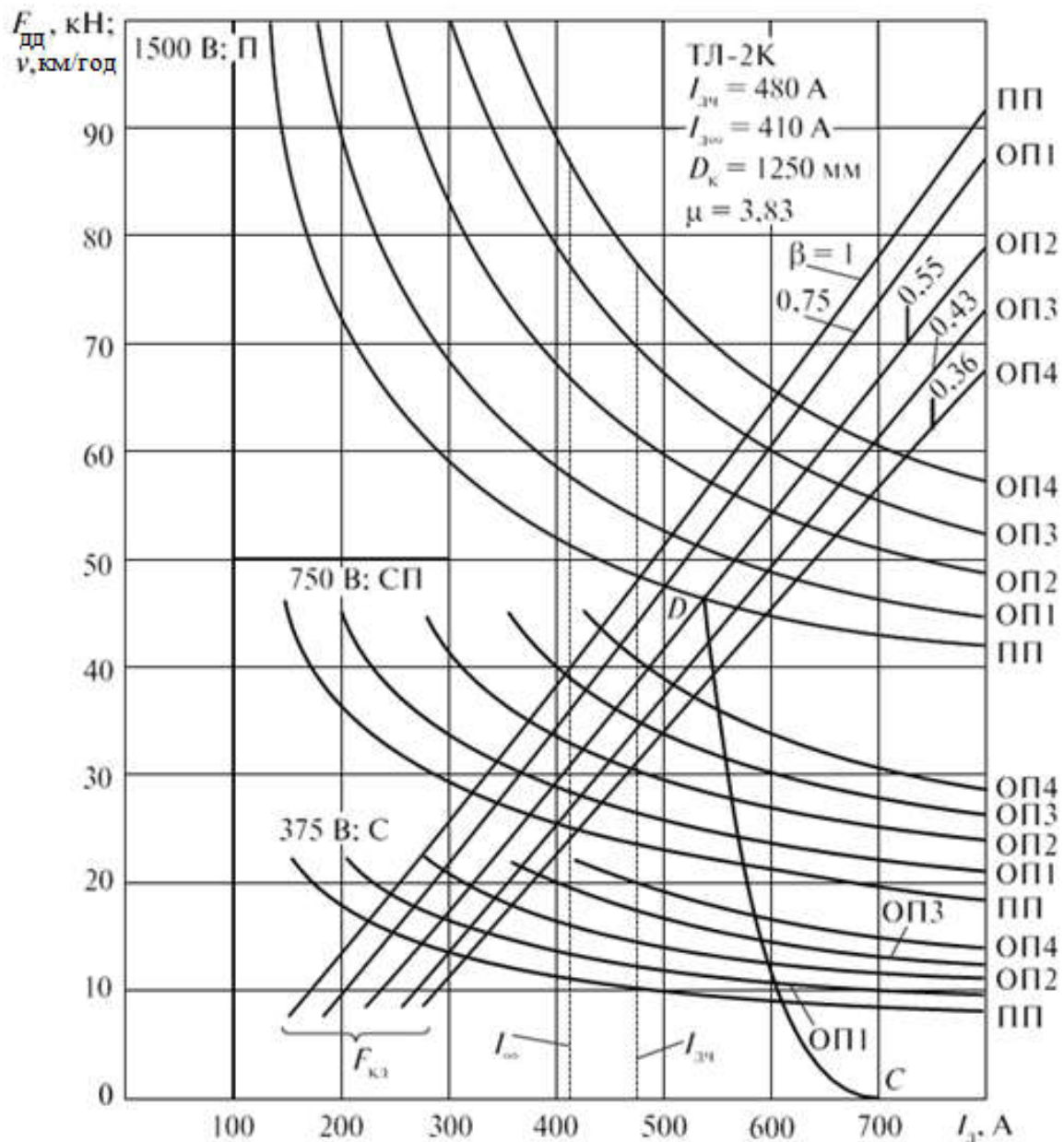


Рис. 2.17. Електромеханічні характеристики тягового електродвигуна ТЛ-2К електровоза ВЛ10<sup>у</sup>

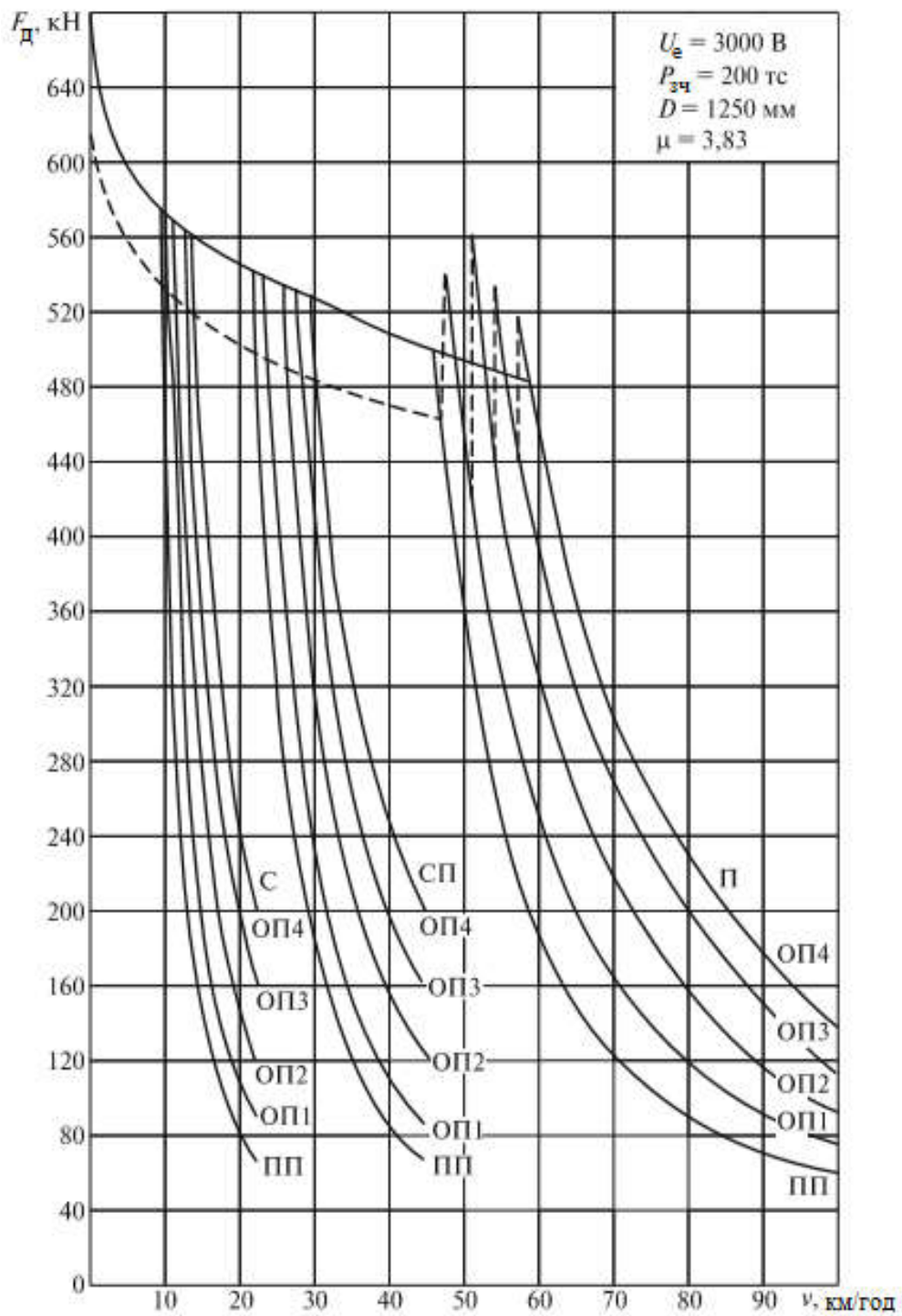


Рис. 2.18. Тяговая характеристика электровоза ВЛ10<sup>У</sup>

Під час роботи електровоза в годинному режимі забезпечується експлуатаційна надійність його силового обладнання у разі руху локомотива по найбільш важкому елементу профілю з критичною (розрахунковою) вагою состава протягом години.

Під час роботи електровоза в розрахунковому режимі забезпечується експлуатаційна надійність його силового обладнання у разі руху локомотива по найбільш важкому елементу профілю з критичною (розрахунковою) вагою складу протягом будь-якого проміжку часу.

Годинний і тривалий режими роботи електровоза на його тяговій характеристиці відповідають паралельному з'єднанню електродвигунів і третього ступеню ослаблення магнітного поля збудження.

## **2.13. Електромеханічні та тягові характеристики ЕРС змінного струму**

Регулювання швидкості руху на ЕРС змінного струму здійснюється двома способами – зміною підведеної напруги (перемикання виводів обмоток трансформатора) та ослабленням магнітного потоку. Як було сказано вище, пускові опори на ЕРС змінного струму не вводяться.

Основним способом регулювання швидкості руху є зміна підведеної до тягових електродвигунів напруги. Ослаблення магнітного потоку застосовується, як правило, тільки у разі досягнення максимально допустимої для даного електродвигуна напруги. Виняток становлять двосистемні електровози ВЛ82 і ВЛ82М. Як приклад на рис. 2.19 приведена тягова характеристика електровоза ВЛ80<sup>С</sup>.

### **Питання для самоконтролю**

- 1. Перерахуйте можливі системи збудження тягових двигунів постійного струму.*
- 2. Яка система збудження набула поширення на тяговому рухомому складі і чому?*
- 3. Які вимоги висуваються до характеристик тягових електродвигунів?*
- 4. Що мається на увазі під електричною стійкістю тягового електродвигуна?*

5. Які способи регулювання швидкості руху застосовуються на ЕРС і які їхні характеристики?
6. Яким чином регулюється напруга на ЕРС постійного струму?
7. Яким чином регулюється напруга на ЕРС змінного струму?
8. Чому регулювання швидкості руху шляхом зміни опорів не отримало широкого поширення? Коли і чому потрібно застосувати даний метод?

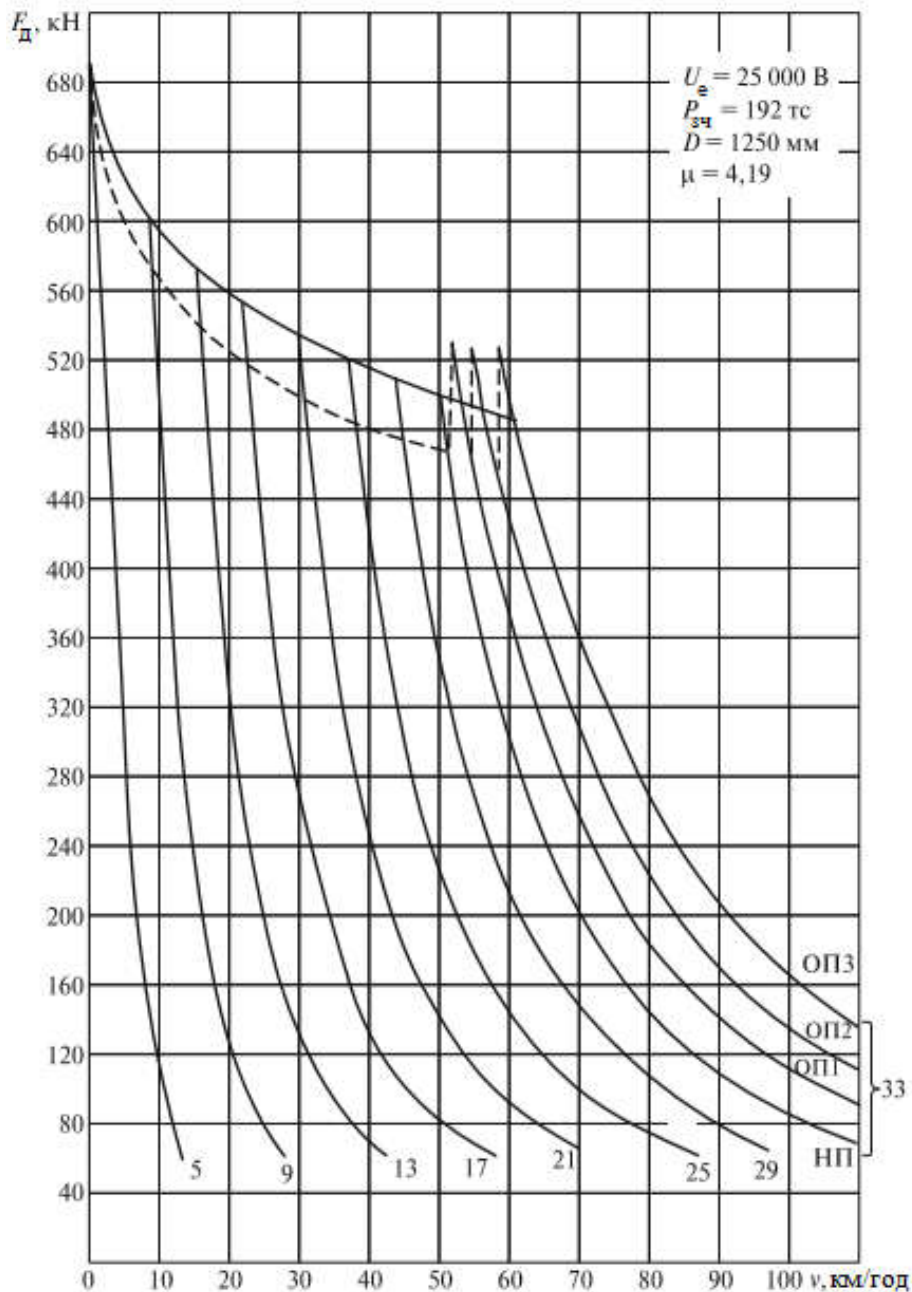


Рис. 2.19. Тягова характеристика електровоза ВЛ80С



## Тягові характеристики та властивості автономних локомотивів

### 3.1. Загальні відомості

Тягові характеристики тепловозів і електрорухомого складу мають принципові відмінності. Це пов'язано з тим, що тепловози мають автономне джерело енергії – дизель, потужність якого обмежена. Тому виникає обмеження сили тяги по потужності дизеля. Для повного використання потужності дизеля необхідно мати гіперболічну тягову характеристику тепловоза  $F_d v = \text{const}$  якомога в більшому діапазоні швидкостей руху. У цьому випадку потужність дизеля використовується найбільш повно, а пропускна та провізна здатність ділянок максимальна. Графічний вид реальної тягової характеристики визначається типом і параметрами використовуваної передачі потужності, а також обмеженнями, які накладаються. Ідеальна тягова характеристика автономного локомотива приведена на рис. 3.1, показані дві характерні точки: швидкість виходу на автоматичну характеристику ( $v_{\min}$ ) і розрахункова швидкість  $v_p$ . Швидкістю виходу на автоматичну характеристику називається мінімальна швидкість руху, за якою може бути реалізована повна потужність дизеля.

Для автономних локомотивів розрахунковим режимом роботи називається такий режим, за яким реалізується найбільша можлива сила тяги, що не викликає перегріву елементів тягового приводу протягом необмеженого часу. Розрахунковий режим роботи автономного локомотива відповідає тривалому режиму роботи ЕРС.

Тягові характеристики тепловозів і дизель-поїздів мають обмеження по ресурсу та надійності таких елементів: дизеля, тягової передачі, зчеплення й конструкційної швидкості.

До тягових властивостей і характеристик локомотивів, отже, і до

типу використовуваної передачі потужності висуваються такі вимоги:

- висока мобільність (постійна готовність до руху);
- реверсування (зміна напрямку руху) без зміни напрямку обертання колінчастого вала дизеля;
- невелика тривалість перехідних процесів;
- плавна, без ривків, зміна сили тяги у разі зміни швидкості руху;
- зміна сили тяги та швидкості в широкому діапазоні;
- відсутність аварійних режимів роботи;
- використання повної ефективної потужності дизеля в діапазоні від розрахункової (номінальної) швидкості руху до конструкційної (максимальної) швидкості руху;
- робота дизеля та тягової передачі з максимально можливим коефіцієнтом корисної дії в більшості експлуатаційних режимів.

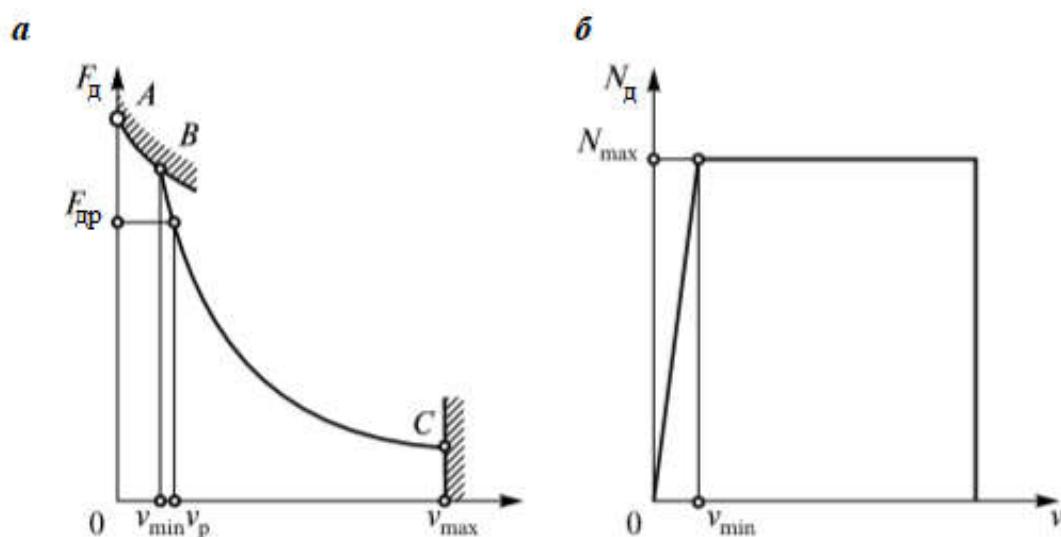


Рис. 3.1. Ідеальна форма тягової характеристики автономного локомотива:  
 а – ідеальна тягова характеристика; б – залежність дотичної потужності локомотива від швидкості руху у разі ідеальної форми тягової характеристики

Магістральні тепловози повинні мати високу секційну потужність для ведення поїздів великої маси з високою швидкістю. Велику роль відіграє можливість швидкого розгону поїзда, тому що це дозволяє збільшити пропускну здатність станцій, зменшити час руху поїзда по перегону, знизити втрати часу через зупинки та зниження швидкості за попередженнями.

Отже, тепловоз повинен забезпечувати плавний розгін поїзда з по-

стійним прискоренням, мати можливість реалізувати силу тяги, граничну за умовами зчеплення колісних пар з рейками, а також мати пристрої автоматичного захисту елементів тягового приводу від перевантажень. Сучасні вантажні тепловози забезпечують прискорення до  $0,2 \text{ м/с}^2$ , маневрові – до  $0,3 \text{ м/с}^2$ , пасажирські – до  $0,4 \text{ м/с}^2$ , високошвидкісні – до  $0,6 \text{ м/с}^2$ . У разі більш високих прискорення настає біологічний дискомфорт.

Одним з найважливіших показників досконалості використовуваної передачі потужності є коефіцієнт кратності зміни робочих швидкостей  $K_{ш}$ , рівний відношенню конструкційної швидкості руху до розрахункової

$$K_{ш} = \frac{v_{\text{констр}}}{v_p}. \quad (3.1)$$

Для сучасних вантажних локомотивів цей коефіцієнт становить  $3,5 \dots 5,0$ , для маневрових –  $6 \dots 11$ , для пасажирських –  $2,5 \dots 3,5$ .

Іншим найважливішим показником є коефіцієнт розрахункової сили тяги  $\varphi_p$  – відношення розрахункової сили тяги до зчпної ваги локомотива

$$\varphi_p = \frac{F_{\text{др}}}{P_{\text{зч}}}. \quad (3.2)$$

Для вантажних локомотивів даний коефіцієнт становить  $0,19 \dots 0,24$ , для маневрових –  $0,15 \dots 0,17$ , для пасажирських –  $0,11 \dots 0,14$ .

### **3.2. Обмеження сили тяги тепловоза по потужності дизеля**

Потужність тепловоза, підведена до ободів колісних пар, називають дотичною потужністю і визначають за формулою:

$$N_d = N_e (1 - \beta) \eta_{\text{п}}, \quad (3.3)$$

де  $N_e$  – ефективна потужність дизеля, кВт;  
 $\eta_n$  – коефіцієнт корисної дії передачі потужності;  
 $\beta$  – частка енергії, що виділяється на допоміжні потреби (на сучасних локомотивах  $\beta = 0,8 \dots 0,14$ ).

Ефективну потужність дизеля можна визначити за формулою:

$$N_e = \frac{p_e V_h z n}{0,03i} = \frac{\eta_e B_r Q_n^p}{V_h} \cdot \frac{V_h z n}{0,03i} = \frac{z n}{0,03i} B_r Q_n^p \eta_e, \quad (3.4)$$

де  $p_e$  – середній ефективний тиск, МПа;  
 $V_h$  – робочий об'єм циліндра двигуна, л;  
 $z$  – кількість циліндрів двигуна;  
 $n$  – частота обертання колінчастого вала дизеля,  $\text{хв}^{-1}$ ;  
 $i$  – тактність дизеля;  
 $\eta_e$  – ефективний ККД дизеля;  
 $B_r$  – годинна витрата палива, кг/год;  
 $Q_n^p$  – нижча робоча теплота згоряння палива, кДж/кг.

Виразимо дотичну потужність через параметри тягової характеристики

$$N_d = \frac{F_d v}{3600}. \quad (3.5)$$

де  $F_d$  – дотична сила тяги, Н;  
 $v$  – швидкість, км/год.

Використовуючи вирази (3.3)–(3.5) і виконавши ряд нескладних перетворень, отримаємо вираз для дотичної сили тяги по дизелю:

$$F_d = 120 \frac{z n}{i v} B_r Q_n^p \eta_m \eta_i (1 - \beta). \quad (3.6)$$

Найбільша сила тяги по дизелю визначається родом служби теплового та умовами його експлуатації. У разі заданого навантаження від колісної пари на рейки та осьової формули локомотива вона може бути

обмежена масогабаритними показниками. Для підвищення потужності та сили тяги тепловоза для даної швидкості необхідно підвищити потужність тепловозного дизеля за рахунок збільшення числа циліндрів, робочого об'єму циліндра, частоти обертання колінчастого вала, циклової подачі палива.

Збільшення числа циліндрів і їх робочого об'єму призводить до збільшення маси дизеля та може бути обмежена масогабаритними показниками тепловоза. Крім того, необхідно враховувати, що підвищення потужності дизеля призведе до збільшення розмірів допоміжних систем тепловоза.

Подача палива за робочий цикл дизеля (циклова подача) та частота обертання колінчастого вала визначають режим роботи тепловозного дизеля, силу тяги та швидкість руху тепловоза.

Однак збільшення кількості палива, що подається в циліндр без збільшення кількості повітря, що подається (ступеня наддуву), може знизити якість згоряння палива і, отже, ККД дизеля.

Підвищення потужності за рахунок збільшення частоти обертання колінчастого вала дизеля знижує моторесурс і ККД дизеля, збільшує витрати на його обслуговування та ремонт. Номінальна частота обертання тепловозних дизелів зазвичай не перевищує  $1500 \text{ хв}^{-1}$ . Зменшення номінальної частоти обертання нижче  $800 \dots 1000 \text{ хв}^{-1}$  небажане з точки зору масогабаритних показників дизеля та передачі потужності.

Індикаторний ККД дизеля визначається за формулою:

$$\eta_i = \frac{3600 N_i}{B_T Q_H^p}. \quad (3.7)$$

де 3600 – перевідний коефіцієнт.

Значення індикаторного ККД і середнього індикаторного тиску характеризують якість робочого процесу тепловозного дизеля. Індикаторний тиск можна підвищити, збільшуючи циклову подачу з одночасним збільшенням тиску наддуву, однак тиск вище  $1,6 \dots 2,0 \text{ МПа}$  для чотиритактних і  $1,2 \dots 1,4 \text{ МПа}$  для двотактних дизелів небажаний, тому що це різко знижує моторесурс.

Індикаторний ККД тепловозних дизелів змінюється в межах  $0,25 \dots 0,53$ . Зі зниженням потужності ККД спочатку зростає через збільшення коефіцієнта надлишку повітря, а потім знижується, тому що

горюча суміш збіднюється і знижується середній індикаторний тиск.

Механічний ККД можна визначити за формулою:

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} = \frac{p_e}{p_i} = \frac{\eta_e}{\eta_i}, \quad (3.8)$$

де  $p_e$  – середній ефективний тиск (МПа);

$\eta_e$  – ефективний ККД дизеля.

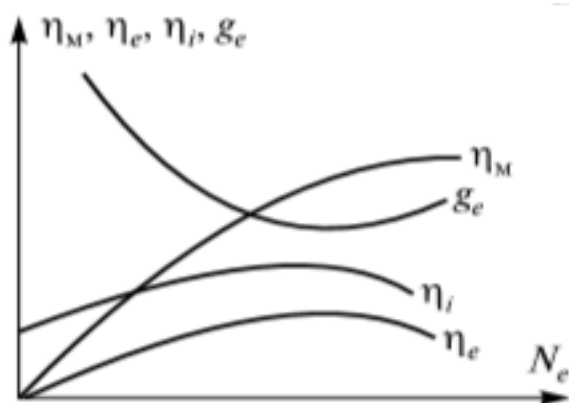


Рис. 3.2. Залежність механічного, індикаторного та ефективного ККД, а також питомої ефективної витрати палива від ефективної потужності дизеля

Механічний ККД дизеля залежить від конструкції дизеля, якості обробки та змащування поверхонь, режиму роботи. Величиною механічного ККД оцінюють всі механічні втрати дизеля, його значення в експлуатаційних режимах змінюється в межах 0,7...0,92. Характер зміни механічного ККД показаний на рис. 3.2.

Ефективний ККД тепловозного дизеля характеризує його енергетичну ефективність і визначається зі співвідношення

$$\eta_e = \frac{3600N_e}{B_r Q_H^p}. \quad (3.9)$$

Величина  $\eta_e$  коливається в межах 0,22...0,42.

Економічність дизеля також оцінюється величиною питомої ефективної витрати палива

$$g_e = \frac{B_r}{N_e} = \frac{3600}{\eta_e Q_H^p}. \quad (3.10)$$

В сучасних тепловозних дизелях вдається досягти

$g_e = 202...207 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{год})$ . У разі зменшення потужності дизеля  $g_e$  різко зростає, а  $\eta_e$  різко зменшується, тому що у цьому разі значно погіршується якість розпилення палива, знижується тиск наддування та зменшується  $\eta_i$ .

Частка енергії, що витрачається на допоміжні потреби, визначається за формулою:

$$\beta = \frac{N_{\text{доп}}}{N_e}, \quad (3.11)$$

де  $N_{\text{доп}}$  – сумарна потужність, що відбирається на допоміжні потреби.

Величина  $N_{\text{доп}}$  складається з наступних складових:

$$N_{\text{доп}} = N_{\text{вент.х}} + N_{\text{вент.г}} + N_{\text{вент.д}} + N_{\text{зб}} + N_{\text{компр}} + N_{\text{дг}}, \quad (3.12)$$

де  $N_{\text{вент.х}}$  – потужність, що відбирається на привід вентилятора холодильника;

$N_{\text{вент.г}}$  – потужність, що відбирається на привід вентилятора охолодження тягового генератора;

$N_{\text{вент.д}}$  – потужність, що відбирається на привід вентиляторів охолодження тягових електродвигунів і апаратури;

$N_{\text{зб}}$  – потужність збудника і підзбудника;

$N_{\text{компр}}$  – потужність, що відбирається на привід компресора гальмівної системи;

$N_{\text{дг}}$  – потужність допоміжного генератора.

Значення  $N_{\text{доп}}$  для різних тепловозів складає 120...300 кВт. Режими роботи дизелів змінюються відповідно до зміни навантаженнями в широкому діапазоні. При цьому змінюються потужність, частота обертання, обертовий момент, теплові та механічні навантаження, подача палива, економічні показники. Якщо в процесі роботи дизеля зазначені показники залишаються незмінними, то режим роботи дизеля називають сталим.

Залежність параметрів в тому чи іншому поєднанні за сталих режимів роботи дизеля називають *характеристиками дизеля*. Параметри

характеристик значно впливають на тягово-експлуатаційні властивості та економічну ефективність роботи дизеля. Кожному тепловозному дизелю встановлюється допустимий (від мінімальної до максимальної частоти обертання) діапазон частот обертання.

*Швидкісними характеристиками* дизеля називають залежність його параметрів від частоти обертання колінчастого вала дизеля за фіксованих положеннях рейки паливного насоса.

*Зовнішньою характеристикою* дизеля називають швидкісну характеристику, отриману за граничну подачу палива (рейка паливного насоса знаходиться на упорі). Зовнішня характеристика обмежує поле граничної потужності, режимів тривалої роботи дизеля в експлуатації.

*Частковими* називають швидкісні характеристики, отримані за зменшені значення подачі палива та фіксованому положенні рейки паливного насоса. Режим роботи тепловоза, який відповідає цим характеристикам, називають режимом часткових тягових характеристик, або їзду на проміжних позиціях контролера.

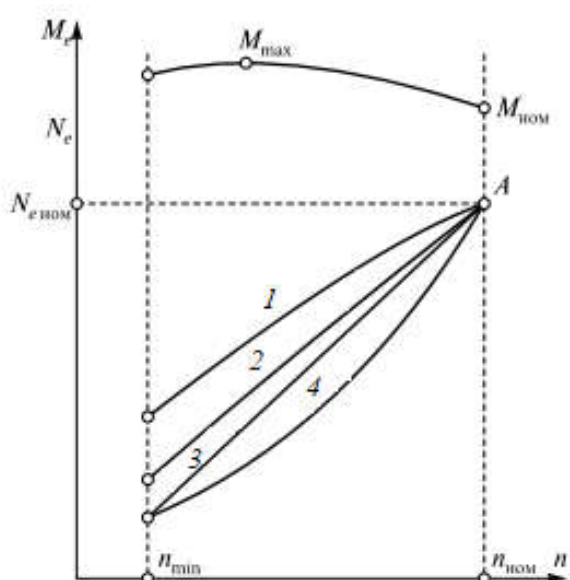


Рис. 3.3. Характеристики дизеля:

1 – зовнішня; 2 – обмежувальна; 3 – генераторна; 4 – гвинтова

Залежність ефективної потужності дизеля, що витрачається на привід тягового генератора тепловоза, від частоти обертання називають *тепловозною* (генераторною) характеристикою (рис. 3.3). Вона знаходиться нижче зовнішньої характеристики для всіх часткових навантажень, а у разі номінального режиму збігається з нею. Форма генераторної характеристики залежить від характеристик системи збудження тягового генератора.

Під час роботи дизеля з гідроредукцією його швидкісна характеристика залежить від типу включеного апарату – гідротрансформатора або гідромумфти. У разі роботи з гідротрансформатором потужність дизеля змінюється в залежності від частоти обертання колінчастого вала за законом кубічної параболи ( $N_e \cong \text{const} \cdot n^3$ ).



При цьому на номінальній частоті обертання реалізується номінальна потужність. Таку характеристику називають *гвинтовою*.

Коли потужність дизеля передається через гідromуфту або механічну коробку передач, двигун працює за своєю зовнішньою характеристикою. При цьому виникає лінійна залежність між частотою обертання вала дизеля та швидкістю руху локомотива.

Для двигунів, що працюють на змінних режимах по потужності та частоті обертання, оцінити їх економічність зручно за *універсальними характеристиками* (рис. 3.4). Вони являють собою залежності на сталих режимах ефективної потужності від частоти обертання за постійних питомих витратах палива та ефективних ККД.

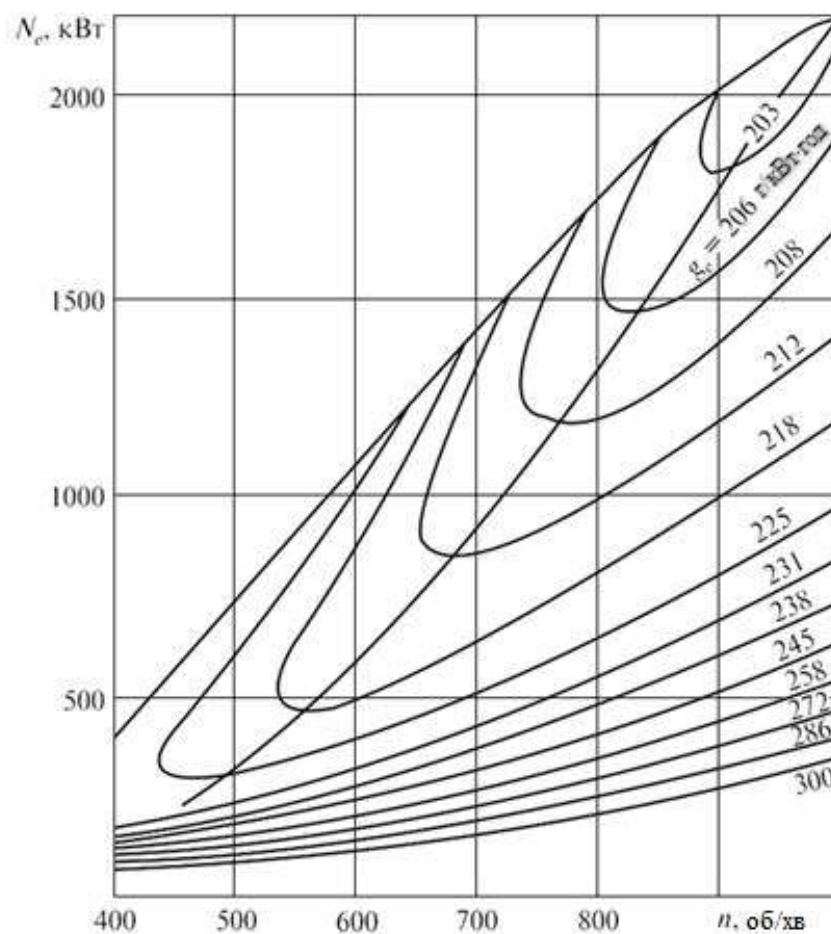


Рис. 3.4. Універсальні характеристики дизеля 5Д49 з неохолоджувальним колектором

З цих характеристик видно, що будь-яка задана потужність може

бути реалізована в полі допустимих режимів роботи дизеля за різною частотою обертання колінчастого вала. Однак найменша витрата палива досягається тільки за певну частоту обертання. Визначивши для всього діапазону потужностей частоти обертання, за якими досягається найменша витрата палива, отримаємо залежність  $N_e = f(n)$ , яку називають *швидкісною економічною характеристикою*. Робота за цією характеристикою забезпечує найменші витрати палива дизелем під час експлуатації. Слід мати на увазі, що режими найбільшої економічності дизеля та тепловоза можуть не збігатися, тому що під час передачі крутного моменту від дизеля до колісних пар також відбуваються втрати енергії, що необхідно враховувати під час вибору найбільш економічних режимів роботи тепловоза.

Здатність дизеля до саморегулювання під час впливу пасивного зовнішнього навантаження характеризується коефіцієнтом пристосування – відношенням максимального крутного моменту  $M_{\max}$  до моменту номінального режиму  $M_n$  (номінального моменту – крива 5 на рис. 3.3). Його значення для дизелів з наддувом коливається в межах  $1,1 \dots 1,15$ , що говорить про низьку пристосовність до перевантажень.

Аналізуючи параметри дизеля, можна оцінити його властивості з позицій вимог рейкового транспорту, встановити обмеження по енергетичних ресурсів і надійності, визначити силу тяги за різні способи регулювання та вибрати оптимальні режими роботи під час експлуатації.

Дизелі забезпечують необхідну потужність тепловозів і високу ефективність тяги поїздів. Жоден з відомих на сьогоднішній день теплових двигунів не може зрівнятися з дизелем за енергетичною економічністю на експлуатаційних режимах роботи.

Однак необхідно відзначити, що тепловозний дизель непридатний до тягової служби у разі передачі крутного моменту колінчастого вала безпосередньо до колісних пар без використання передачі потужності. Це обумовлено декількома причинами.

По-перше, у разі безпосередній передачі крутного моменту дизеля його запуск і початок руху тепловоза повинні збігатися в часі. Тому що дизель запускається від стороннього джерела енергії та не може накопичувати теплову енергію, такий тепловоз виявився б непридатний для зрушення з місця та розгону поїзда.

По-друге, у разі безпосереднього зв'язку колінчастого вала дизеля з колісними парами його частота обертання  $i$ , отже, потужність, що реа-

лізується безпосередньо залежали б від швидкості руху тепловоза. Таким чином, під час проходження підйому, на якому швидкість тепловоза зменшується, знижувалися б потужність і сила тяги по дизелю, в той час як для подолання більш важкого підйому потрібна більша сила тяги.

Крім того, у разі роботи з навантажувальною характеристикою для подолання підйомів був би потрібний дизель значно більшої потужності, ніж це можливо, виходячи з масогабаритних показників.

Таким чином, тепловозний дизель можна успішно застосовувати в якості джерела енергії у разі автономної тяги лише за умови використання його спільно з одним з типів передачі потужності, що здійснює перетворення крутного моменту та частоти обертання. На даний момент в автономній тязі використовуються механічна, гідравлічна, гідромеханічна та електрична передачі потужності.

### **3.3. Тягові характеристики локомотивів з механічною передачею потужності**

Механічна передача складається з двох або більше пар зубчастих коліс, причому включення в роботу тієї чи іншої пари здійснюється муфтами зчеплення. Механічна передача має жорсткий кінематичний зв'язок між дизелем і колісними парами, що характеризує її як «прозору» передачу. Схему триступінчастої механічної передачі показано на рис. 3.5.

Головна муфта зчеплення призначена для роз'єднання вала дизеля з колісною парою під час запуску дизеля, реверсуванні тепловоза та перемиканні ступенів швидкості. Перемикання ступенів швидкості здійснюється за допомогою муфт 1–3 і коробки передач (перемикання швидкостей), що є основним вузлом передачі потужності. Реверсування механічної передачі здійснюється шляхом введення в зачеплення додаткової шестерні (на рисунку не показано).

Зрушення та розгін поїзда здійснюються на першому ступені швидкості (включена муфта 3). Після досягнення швидкості  $v_1$  (рис. 3.6) подальший розгін на першому ступені неможливий і потрібен перехід на другий рівень швидкості (замкнута муфта 1). Для цього потрібно роз'єднати дизель з колісними парами за допомогою головної муфти

зчеплення, відключити муфту 3, знизити частоту обертання вала дизеля, включити муфту 1 і лише після цього знову з'єднати дизель з колісними парами за допомогою головної муфти зчеплення. У разі досягнення швидкості руху  $v_2$  для подальшого розгону необхідно перейти на третю ступінь швидкості (замкнута муфта 2). При цьому порядок перемикавання буде аналогічний перемикавню з першого на другий ступінь.

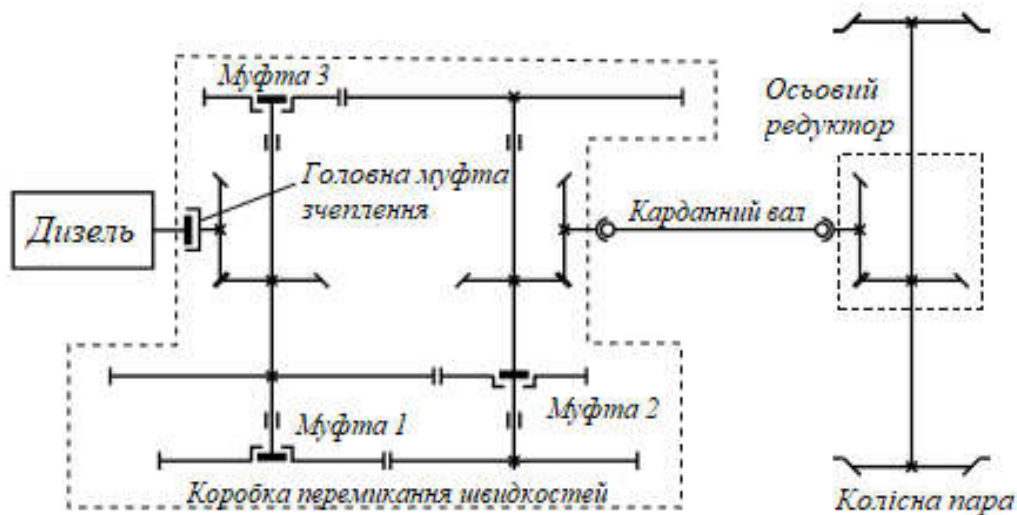


Рис. 3.5. Механічна передача потужності з триступеневою коробкою передач

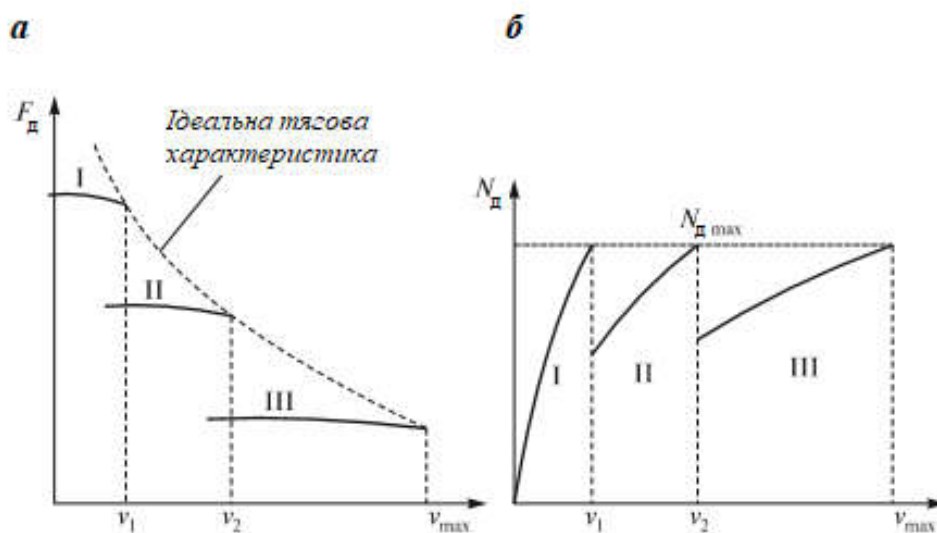


Рис. 3.6. Характеристики тепловоза з механічною передачею:  
 а – розрахункова тягова характеристика; б – крива зміни дотичної потужності; I – перший ступінь швидкості; II – другий ступінь швидкості; III – третій ступінь швидкості

Як видно з рис. 3.6, у разі використання механічної передачі дизель реалізує повну потужність лише в декількох точках тягової характеристики. Сама ж тягова характеристика досить далека від ідеальної тягової характеристики тепловоза.

До переваг механічної передачі в порівнянні з іншими видами передач потужності слід віднести:

- низьку вартість;
- високий ККД передачі;
- компактність і невеликі габаритні розміри за невеликих потужностях, що передаються.

Однак даний тип передачі має низку істотних недоліків:

- повне використання потужності дизеля можливе лише в декількох точках тягової характеристики;
- зниження ККД дизеля через роботу в перехідних і неекономічних режимах роботи;
- «провали» сили тяги під час перемикання ступенів швидкості, що призводить до великих динамічних реакцій в поїзді;
- різке погіршення масогабаритних показників у разі зростання переданої потужності.

Через ці недоліки механічна передача не застосовується на поїзних локомотивах. Механічна передача, як правило, використовується на тяговому рухомому складі потужністю до 100...150 кВт: автомотрисах, вузькоколіїних тепловозах малої потужності. На рис. 3.7 приведена тягова характеристика вузькоколіїного тепловоза ТУ6.

### **3.4. Тягові характеристики тепловозів з гідравлічною передачею потужності**

У гідравлічній передачі потужності механічна енергія спочатку перетворюється в енергію руху рідини, а потім назад в механічну енергію обертання колісних пар.

Гідростатична передача потужності являє собою пару гідравлічних апаратів, з яких один (гідронасос) з'єднаний з валом первинного двигуна, а інший (гідродвигун) працює за рахунок енергії рідини, що нагнітається насосом. Вихідний вал гідродвигуна з'єднується з рушійними колесами локомотива. Практично всі види гідравлічних передач відносяться до «непрозорих» передач.

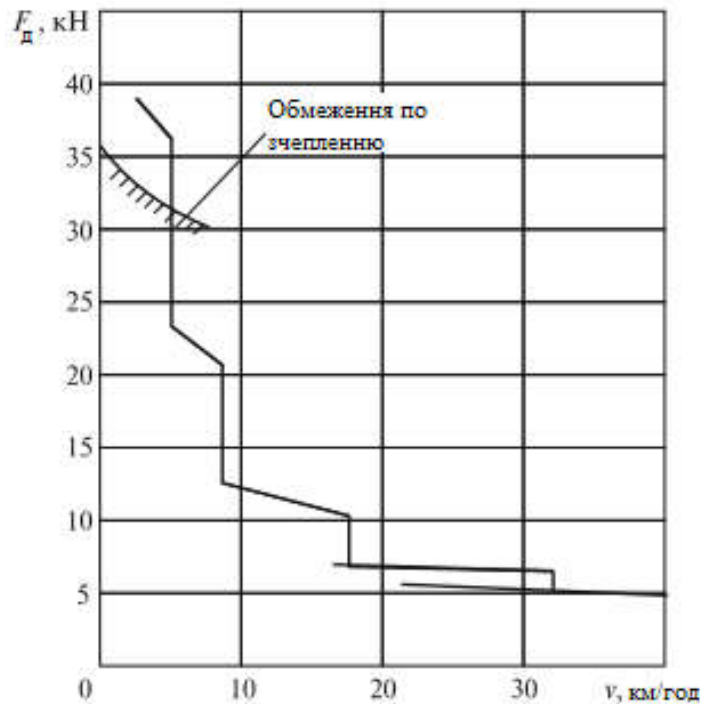


Рис. 3.7. Тягова характеристика вузькоколіїної тепловоза ТУ6

Якщо крутний момент від вхідного вала до вихідного передається головним чином за рахунок використання тиску робочої рідини (приблизно до  $350 \text{ кг/см}^2$ ) при незначній швидкості її руху ( $2 \dots 3 \text{ м/с}$ ), то передача називається гідростатичною. У гідростатичних передачах застосовують об'ємні (поршневі або частіше ротаційні) насоси та двигуни. На рис. 3.8 приведена схема гідростатичної передачі потужності з аксіально-поршневим насосом і аксіально-поршневим двигуном.

Насос і гідродвигун гідростатичної передачі можна встановити на тепловозі практично на будь-якій відстані один від одного, що дає можливість мати у своєму розпорядженні допоміжне обладнання в будь-якому зручному місці.

Зміна сили тяги та швидкості руху локомотива з гідростатичною передачею досягається шляхом зміни тиску рідини в передачі. При цьому можна отримати великі значення кратності зміни сили тяги та швидкості руху локомотива при високих значеннях ККД передачі.

Гідростатична передача потужності має такі переваги:

- безступінчасте регулювання швидкостей обертання;
- можливість отримання великих тягових зусиль;
- автоматичне запобігання від перевантажень;

- мала вага та зручність компонування при дистанційному розміщенні веденої та ведучої ланок;
- відсутність шуму і вібрації.

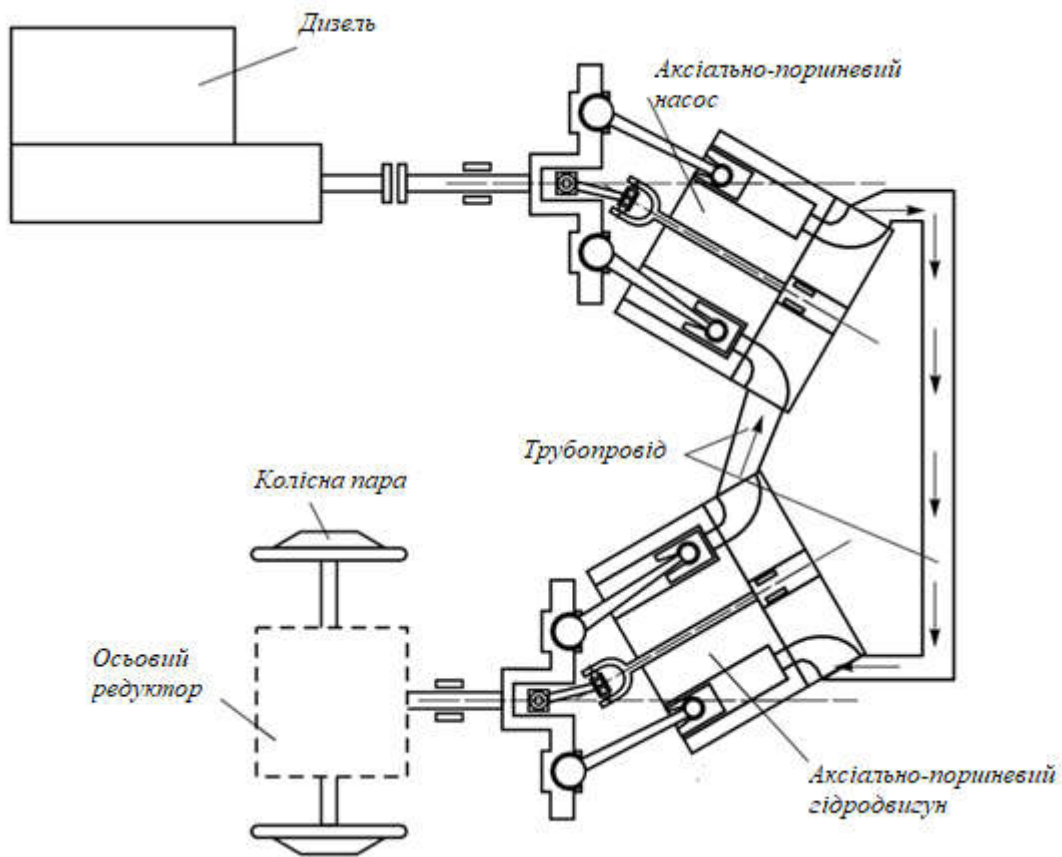


Рис. 3.8. Схема гідростатичної передачі потужності

До істотних недоліків даного типу передач слід віднести:

- конструктивні та технологічні труднощі в забезпеченні високого тиску у разі тривалої експлуатації;
- труднощі виготовлення та експлуатації гнучких з'єднань, розрахованих на великий тиск.

Ці недоліки значно обмежують застосування даного типу приводу. Гідростатична передача поршневого типу застосовується переважно в якості приводу допоміжних машин, зокрема, для вентиляторів шахти холодильної установки тепловозів ТЭП70, ТГ102, в дизель-поїздах ДР-1, ДР-2.

Якщо крутний момент передається в основному за рахунок кінетичної енергії рідини та незначному використанні тиску, передача називається

вається гідродинамічною. У цих передачах застосовуються відцентрові насоси, пов'язані з валом дизеля, і доцентрові гідравлічні турбіни, пов'язані з колісними парами. Принципова схема такої передачі показана на рис. 3.9.

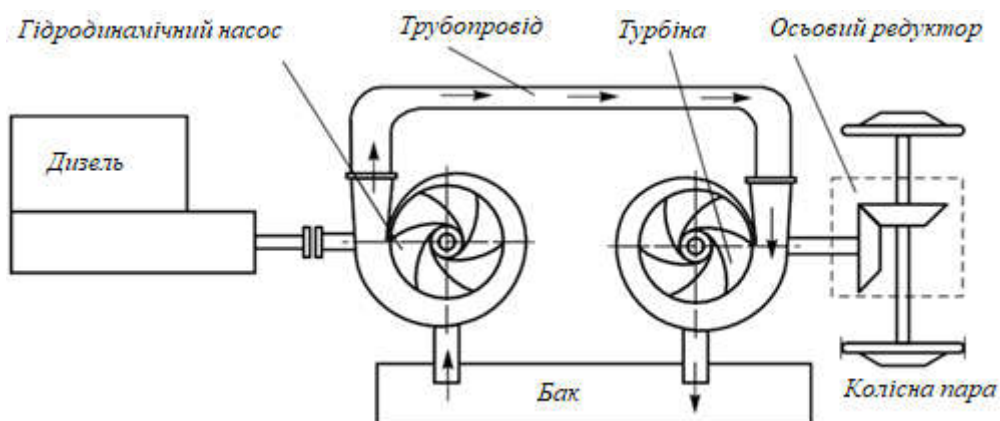


Рис. 3.9. Схема гідродинамічної передачі потужності

Однак розміщення на значній відстані гідродинамічного насоса та гідродвигуна призводить до необґрунтовано великих втрат під час руху рідини по трубопроводу, тому насос і двигун намагаються максимально зблизити. Для цього гідродинамічна передача, як правило, виконується таким чином, щоб насосне та турбінне колеса максимально зблизити між собою та розташувати в одному корпусі. Це дозволяє потоку рідини, яка сходить з лопатей насоса, надходити безпосередньо на лопаті турбіни й далі через реактор (що приводить в рух) знову повертатися на лопаті насосного колеса.

В результаті передача виходить легкою, компактною та з мінімальними втратами. Основними апаратами гідравлічних передач є гідротрансформатори та гідروмуфти. Гідромашина, в одному корпусі якої розташовані насос, турбіна та реактор, називається гідротрансформатором. Гідромашина, що складається тільки з насоса та турбіни, називається гідромуфтою. У гідромуфті (рис. 3.10) вхідний вал, на якому насаджене насосне колесо, з'єднаний з ведучим валом двигуна. З насосним колесом з'єднаний кожух. Між насосним і турбінним колесами є зазор. У робочу порожнину гідромуфти масло подається допоміжним насосом через впускний канал вихідного вала. Насосне колесо, обертаючись, направляє масло в турбінне колесо, яке також починає обертатися і таким чином передає навантаження вихідного валу, з яким



воно жорстко з'єднане.

Енергія від ведучого вала до веденого передається тільки за допомогою рідини, що циркулює в колесах. Для підтримки температури масла в допустимих межах проводиться обмін масла через випускний канал в кожусі.

Особливістю роботи гідромуфти є рівність моментів на насосному і турбінному колесах (відноситься до «прозорих» передач).

У разі зниження швидкості обертання вхідного вала знижуються швидкості рідини в насосі та турбіні, тому моменти насоса  $M_n$  та турбіни  $M_t$  зменшуються. На рис. 3.11 показані відносні характеристики гідромуфти, де  $M_{ном}$  номінальне значення моменту на валу насоса за номінальну частоту його обертання  $n_{ном}$ .

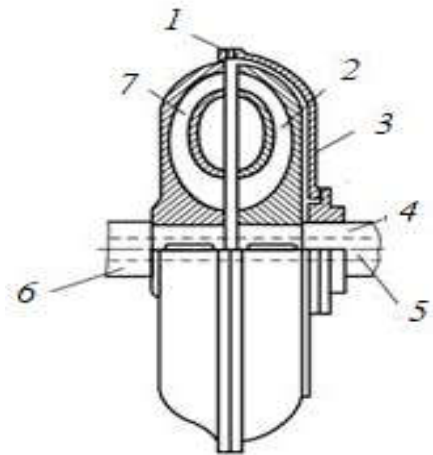


Рис. 3.10. Схема гідромуфти: 1 – випускний канал; 2 – турбінне колесо; 3 – кожух; 4 – вихідний (ведучий) вал; 5 – випускний канал; 6 – вхідний (ведучий) вал; 7 – насосне колесо

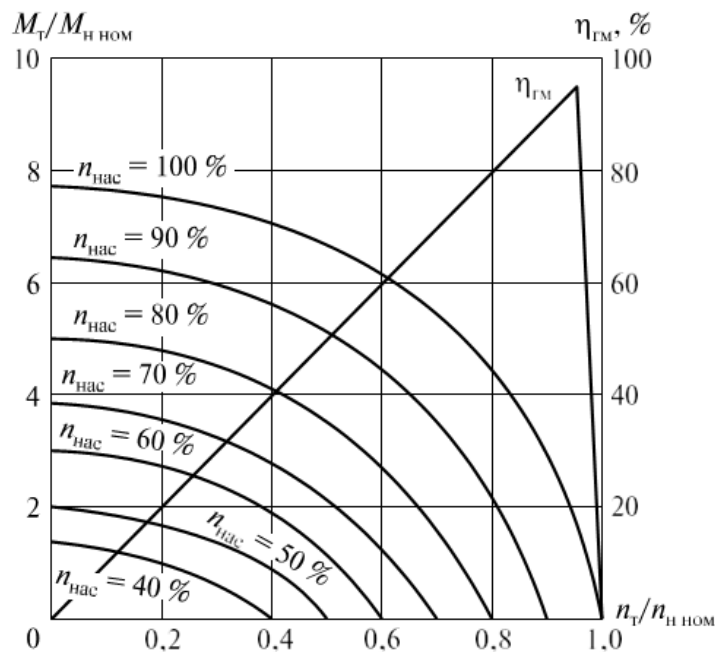


Рис. 3.11. Універсальна характеристика гідромуфти

Максимальне значення ККД гідромуфти без урахування механічних втрат у підшипниках становить 0,94...0,97. Збереження постійних значень потужності та моменту на вхідному валу передачі забезпечує гідротрансформатор, конструкція якого представлена на рис. 3.12.

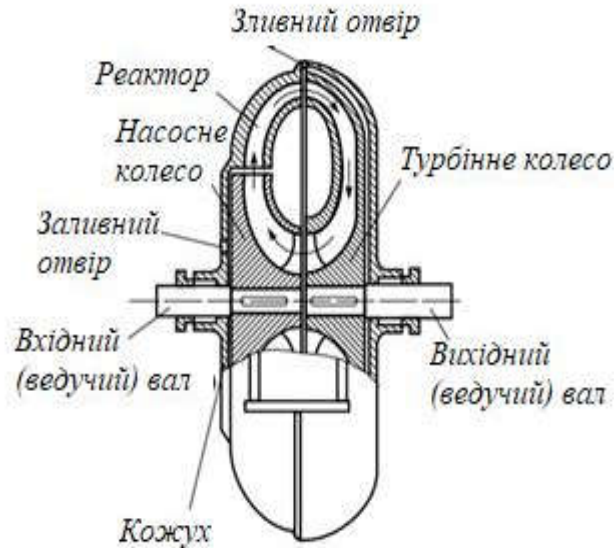


Рис. 3.12. Схема гідротрансформатора

Насосне колесо приводиться в обертання від ведучого вала, з'єднаного з валом дизеля. Якщо в гідротрансформаторі відсутнє масло, то ведений вал турбінного колеса роз'єднаний з ведучим валом. Для наповнення гідротрансформатора маслом є допоміжний насос, який нагнітає масло через заливний отвір. Насосне колесо, обертаючись, подає під тиском масло на реактор (нерухомий направляючий апарат), а з нього на турбінне колесо та повертається в насосне колесо. Створюється замкнутий рух рідини в колесах гідротрансформатора. Внутрішнє кільце називається тором, а зовнішнє – чашею.

Потужність, що витрачається на подолання опору руху рідини в корпусі, перетворюється в тепло, нагріває масло гідротрансформатора. Для охолодження частину масла з гідротрансформатора через зливний отвір в кожусі відводять в холодильник.

Залежно від числа турбінних коліс гідротрансформатори ділять на одноступінчасті та багатоступінчасті (комплексні гідротрансформатори).

З рис. 3.13 видно, що зі зменшенням передавального відношення або зі зменшенням частоти обертання турбінного колеса його момент  $M_T$  збільшується, перевищуючи момент на насосному колесі.

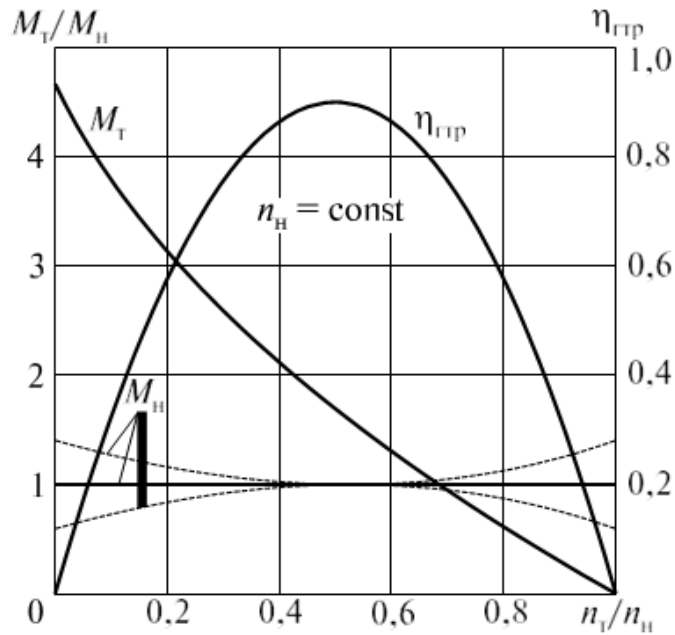


Рис. 3.13. Універсальна характеристика гідротрансформатора (ГТР)

Коефіцієнт корисної дії  $\eta_{\text{ГТР}}$  гідротрансформаторів зі збільшенням передавального відношення  $n_t/n_n$  спочатку збільшується від нуля до максимального значення ( $\eta_{\text{ГТР}} = 0,83 \dots 0,92$ ), а потім знову зменшується до нуля.

Щоб забезпечити роботу гідропередачі з високим ККД у великому діапазоні, як правило, використовується кілька гідравлічних машин, налаштованих на включення за різні швидкості руху. Як приклад на рис. 3.14 показана схема гідропередачі, що складається з двох гідротрансформаторів (ГТР1 і ГТР2) і гідромуфти (ГМ). Тягова характеристика тепловоза з даною передачею приведена на рис. 3.15.

У даній передачі під час рушання тепловоза з місця заповнюється маслом гідротрансформатор ГТР1 і вся потужність дизеля буде передаватися через нього на колісні пари. Робота на гідротрансформаторі ГТР1 здійснюється до певної швидкості руху. Для подальшого розгону поїзда відбувається перемикання з першого гідротрансформатора (ГТР1) на другий (ГТР2) гідротрансформатор, налаштований на роботу з високим ККД за великі швидкості руху. При цьому масло з гідротрансформатора ГТР1 повністю зливається, а гідротрансформатор ГТР2 навпаки заповнюється маслом. У разі подальшого підвищення швидкості та зниження ККД гідротрансформатора ГТР2 відбувається перемикання на гідромуфту (ГМ). Для цього з гідротрансформатора

ГТР2 повністю зливається масло і ним заповнюється гідромуфта ГМ.  
 На гідромуфті здійснюється розгін до максимальної швидкості руху.

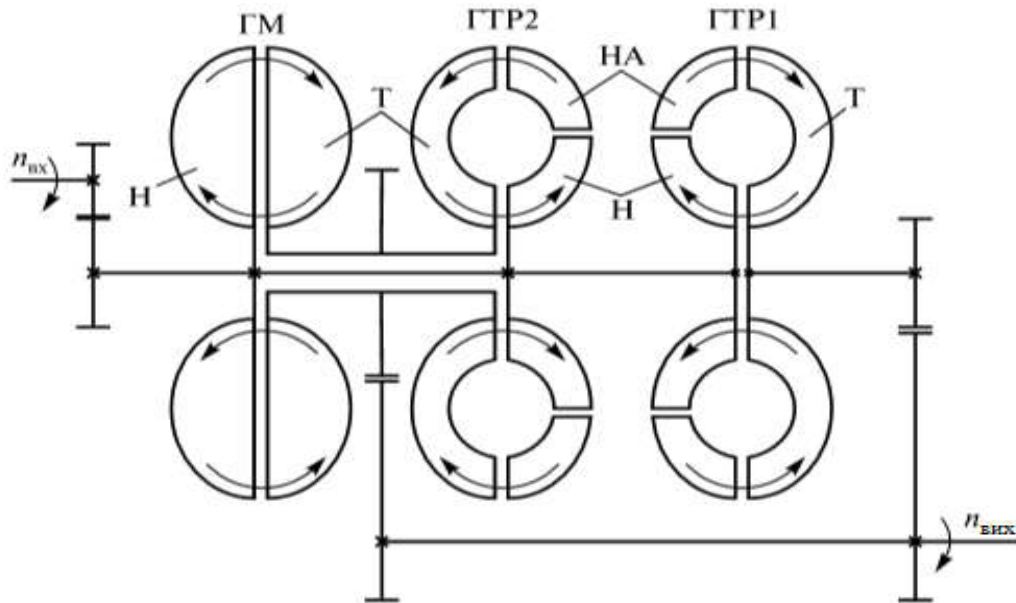


Рис. 3.14. Схема гідродинамічної передачі потужності:

ГТР1 – гідротрансформатор першого ступеня; ГТР2 – гідротрансформатор другого ступеня; ГМ – гідромуфта; Т – турбінне колесо; Н – насосне колесо; НА – нерухомий направляючий апарат

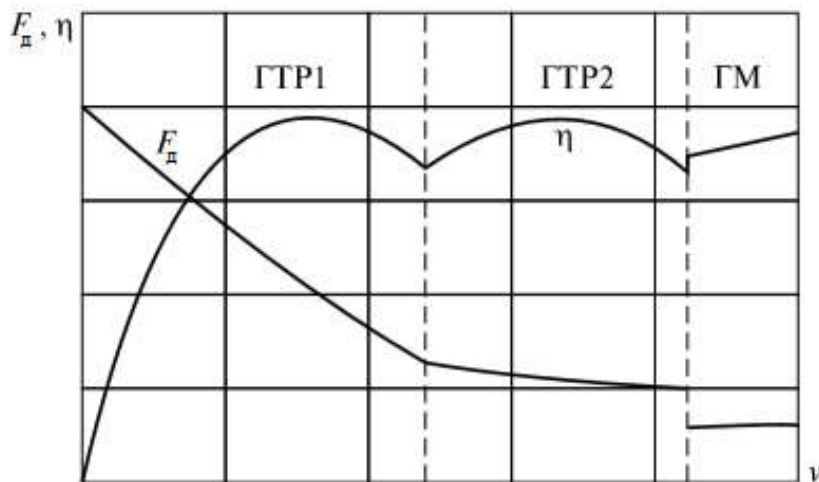


Рис. 3.15. Тягова характеристика гідродинамічної передачі потужності

До основних переваг гідродинамічних передач потужності слід віднести:

- невисоку вартість;
- високі масогабаритні показники при потужності до 1000 кВт;
- непрозорість передачі;
- високий ККД передачі;
- автоматичну зміну сили тяги у разі зміни швидкості руху;
- простота управління передачею;
- відсутність «провалів» сили тяги;
- робота дизеля на режимах, близьких до оптимального.

До недоліків гідродинамічних передач відносяться:

- відсутність свободи компоновання дизеля та колісних пар тепловоза через необхідність розміщення насосного та турбінного колеса в одному корпусі;
  - зниження масогабаритних показників і ККД передачі при потужностях понад 1000 кВт;
  - чутливість передачі до якості ремонту та технічного обслуговування;
  - додаткові втрати енергії через механічний зв'язок між рушійними колісними парами (груповий привід);
  - тривалий час реверсування і деяке зниження ККД передачі під час перемикавання з одного гідравлічного апарату на інший.

У нашій країні на сьогоднішній день гідродинамічні передачі потужності з успіхом застосовуються на тепловозах маневрового та промислового транспорту, рейкових автобусах, дизель-поїздів потужністю до 1000 кВт. Слід зазначити, що за кордоном, наприклад в Німеччині, гідродинамічними передачами потужності обладнано близько 40 % тепловозів. Тепловоз потужністю до 2000 кВт з гідродинамічної передачею не є рідкістю.

Як приклад на рис. 3.16 показана приблизна тягова характеристика тепловоза ТГМ6А в поїзному режимі, в передачі потужності якого використовуються два гідротрансформатора та гідromуфта. Перемикавання з маневрового на поїзний режим і назад в даному тепловозі здійснюється завдяки наявності реверс-режимного пристрою, що змінює передавальне число в шестернях, що з'єднують турбінне колесо з колісними парами.

На рис. 3.17 представлена тягова характеристика шестивагонного дизель-поїзда ДР1 з двома моторними вагонами, передача якого складається з двох гідротрансформаторів.

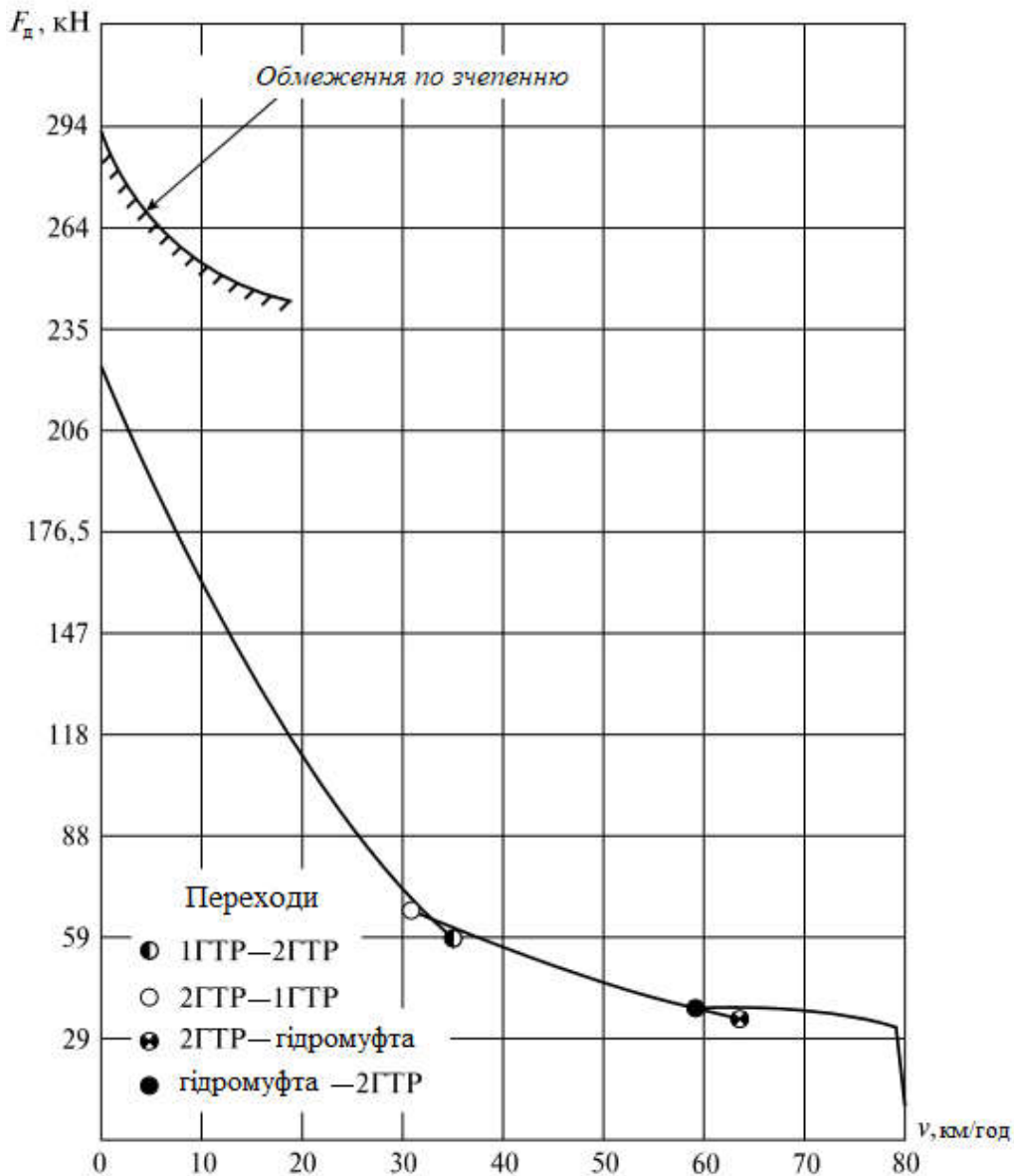


Рис. 3.16. Тягова характеристика тепловоза ТГМ6А

Гідромеханічні передачі потужності є механізмами, в яких потужність від дизеля до колісних пар може передаватися на одному режимі гідравлічним шляхом (як правило, при рушанні з місця), а на іншому – через механічну коробку передач. Такі типи гідромеханічних передач називаються однопотокові. До іншого типу гідромеханічних передач відносяться двопотокові передачі, в яких енергія передається від дизеля до колісних пар двома шляхами – через гідравлічний апарат і через механічний зв'язок одночасно.

Через складності виконання та ряду конструктивних недоліків на

сучасних локомотивах гідромеханічні передачі практично не використовуються. Прикладом використання даного типу передач може служити тепловоз ТГМЗ, що має комплексний гідротрансформатор і механічну коробку передач.

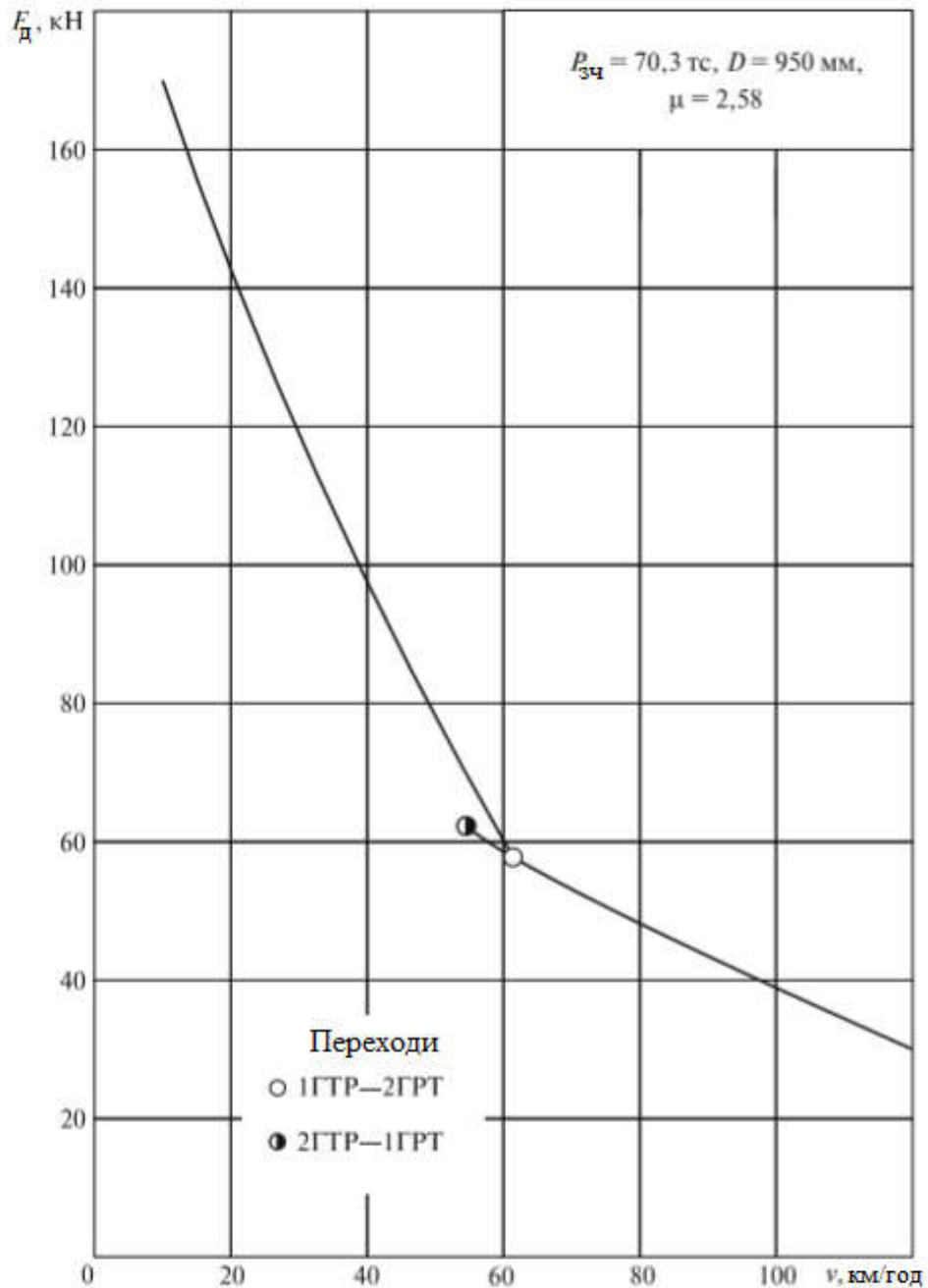


Рис. 3.17. Тягова характеристика шестивагонного дизель-поїзда ДР1 з двома моторними вагонами

### 3.5. Електричні передачі постійного струму

В даний час більшість тепловозів, які використовуються на залізницях Росії та світу, як передачі потужності використовують електричну передачу. Залежно від типу використовуваних електричних машин електричні передачі поділяють на передачі постійного струму, змінно-постійного струму та змінного струму. У передачах постійного струму використовуються тяговий генератор і тягові електродвигуни постійного струму, в передачах змінно-постійного струму – синхронний тяговий генератор і електродвигуни постійного струму, а в передачах змінного струму – генератор і електродвигуни змінного струму. В електричній передачі якор тягового генератора через муфту жорстко з'єднаний з колінчастим валом дизеля, а якорі тягових електродвигунів через осьові редуктори з'єднані з рушійними колісними парами тепловоза.

Принципова схема електричної передачі постійного струму приведена на рис. 3.18. Передача містить тяговий генератор і декілька тягових двигунів. Такі передачі знайшли широке поширення на тепловозах потужністю до 2200 кВт.

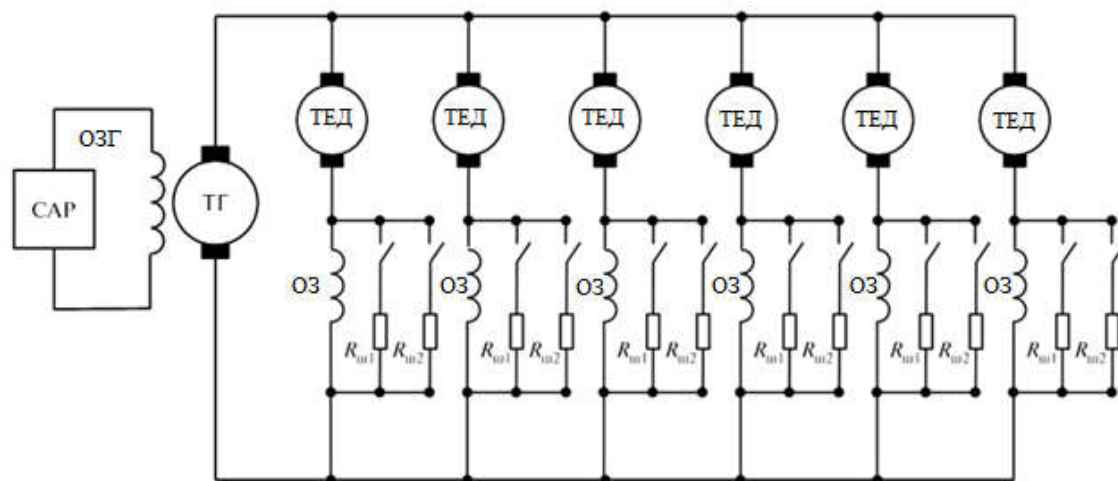


Рис. 3.18. Схема електричної передачі постійного струму:

САР – система автоматичного регулювання збудження тягового генератора; ОЗГ – обмотка збудження тягового генератора; ТГ – тяговий генератор; ТЕД – тяговий електродвигун; ОЗ – обмотка збудження тягового електродвигуна;  $R_{ш1}$ ,  $R_{ш2}$  – опори ослаблення магнітного потоку тягового двигуна



Завдяки двом послідовно з'єднаним колекторам генератора та тягового електродвигуна весь тяговий ланцюг даної передачі може бути розділений на дві практично незалежні системи: дизель – тяговий генератор і тяговий двигун – колісна пара.

Як і у випадку з ЕРС, регулювання швидкості руху тепловоза з електричною передачею здійснюється шляхом зміни напруги тягового генератора (ступеневу у разі зміни схеми з'єднання або плавну у разі регулюванні збудження тягового генератора) або регулюванням тягових двигунів шляхом включення ступенів ослаблення магнітного потоку.

Під час регулювання тягового генератора прагнуть забезпечити сталість потужності, частоти обертання та подачі палива дизеля за різних значеннях струму навантаження. Для цього використовується спеціальна система регулювання напруги тягового генератора.

У разі регулювання та вибору типу застосовуваних тягових електродвигунів основним завданням є забезпечення найменшої зміни струму навантаження при зміні моменту опору руху. Найбільш придатними для цієї умови є двигуни з серієсною (послідовною) системою збудження (див. розділ 2). Як регулювання використовується включення ступенів ослаблення магнітного поля збудження.

При сталому режимі роботи дизеля і постійному виході рейки паливного насоса система регулювання збудження тягового генератора змінює напругу на його затискачах таким чином, щоб забезпечити виконання наступної умови:

$$P_{\Gamma} = (N_{\epsilon} - N_{\text{доп}}) \eta_{\Gamma} = U_{\Gamma} I_{\Gamma} \cdot 10^{-3}, \quad (3.13)$$

де  $P_{\Gamma}$  – вихідна потужність тягового генератора, кВт;

$\eta_{\Gamma}$  – коефіцієнт корисної дії тягового генератора;

$U_{\Gamma}$  – напруга на затискачах тягового генератора, В;

$I_{\Gamma}$  – струм навантаження тягового генератора, А.

Залежність  $U_{\Gamma} = f(I_{\Gamma})$  у разі реалізації номінальної потужності дизеля називають *зовнішньою характеристикою тягового генератора*. Та ж залежність за потужності дизеля менше номінальної називається *частковою характеристикою тягового генератора*. Зовнішня та часткові характеристики тягового генератора показані на рис. 3.19. У разі

визначення потужності генератора на часткових навантаженнях за різних частотах обертання, перш за все, прагнуть забезпечити економічність роботи тепловозного дизеля (див. п.п. 3.2).

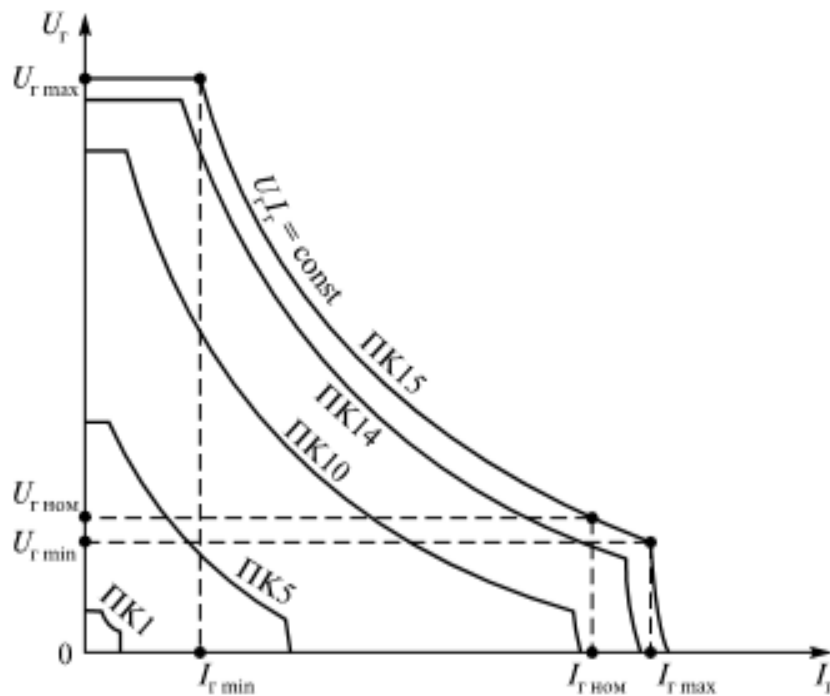


Рис. 3.19. Зовнішня і часткові характеристики тягового генератора:

$U_{Г \max}$  – максимальна напруга тягового генератора;  $U_{Г \text{ ном}}$  – номінальна напруга тягового генератора;  $U_{Г \min}$  – мінімальна напруга тягового генератора;  $I_{Г \max}$  – максимальний струм тягового генератора;  $I_{Г \text{ ном}}$  – номінальний (розрахунковий) струм тягового генератора;  $I_{Г \min}$  – мінімальний струм тягового генератора; ПКМ1, ПКМ5, ПКМ10, ПКМ14 і ПКМ15 – відповідно перша, п’ята, десята, чотирнадцята та п’ятнадцята позиції контролера машиніста

Важливим питанням є вибір основних параметрів зовнішньої характеристики тягового генератора – максимального та номінального струму, а також максимальної напруги. Максимальний струм тягового генератора обирається таким чином, щоб забезпечити реалізацію тяговими електродвигунами максимальної сили тяги за умовою зчеплення колісних пар з рейками. Номінальний струм тягового генератора обирається таким чином, щоб забезпечити реалізацію тривалої (розрахункової) сили тяги за умовою нагрівання електричних машин. Значення максимальної напруги генератора визначається за умови забезпечення максимальної швидкості руху тепловоза при включеному ослабленні поля.

Перевагами електричної передачі потужності постійного струму є:

- відсутність кінематичного зв'язку вала теплового двигуна з рушійними колесами локомотива;
- можливість плавного регулювання сили тяги та швидкості локомотива у всьому заданому робочому діапазоні;
- високе значення ККД передачі та теплового двигуна у всьому робочому діапазоні (при потужності менше 1000 кВт ККД становить 0,78...0,84, а при більше 1000 кВт – 0,84...0,86);
- високий ступінь використання потужності теплового двигуна у всьому робочому діапазоні;
- відсутність муфт зчеплення та проміжних зубчастих редукторів;
- можливість здійснення електродинамічного або реостатного гальмування;
- висока довговічність і надійність;
- достатня свобода розміщення силового та допоміжного обладнання під час конструювання локомотива.

До числа недоліків електричної передачі постійного струму можна віднести:

- більш високу вартість передачі в порівнянні з механічною та гідравлічною, що особливо помітно при малих потужностях;
- значні витрати кольорових металів, високоякісної сталі та ізоляційних матеріалів на виготовлення;
- багаторазові випробування для налаштування (реостатні) в процесі експлуатації;
- зниження надійності та ККД передачі в цілому від погіршення кліматичних умов експлуатації;
- досить велику вагу електричних машин і передачі в цілому;
- необхідність ретельного догляду за колекторно-щітковим вузлом електричних машин.

Електрична передача постійного струму для тягового рухомого складу розрахована на діапазон потужностей 220...4400 кВт. Окремі локомотиви будуються або проектуються на великі потужності. За потужності понад 1470 кВт в агрегаті застосовується виключно електрична передача.

### 3.6. Електричні передачі потужності змінно-постійного струму

Тенденція до збільшення потужності на одиницю ваги та габаритів тепловоза призвела до того, що виникла проблема з розміщенням обладнання в дизельному приміщенні та на моторних візках, а потім і знизилась надійність роботи колекторно-щіткового вузла машин постійного струму і в першу чергу тягового генератора. Збільшення навантажень призвели до незадовільної роботи його щіток і колектора.

Розрахунки та дослідні дані показали, що при добутку  $P_{г\text{ном}} \cdot n_{д\text{ном}} > (25...30) \cdot 10^3$  не вдається забезпечити надійну роботу колекторно-щіткового вузла машини постійного струму. Тому перехід на передачу постійно-змінного струму для тепловозів був обумовлений.

З 60-х рр. минулого століття почався випуск тепловозів з синхронним генератором і напівпровідниковою випрямною установкою. Система регулювання генератора та характеристики на виході випрямляча відповідали передачам постійно-постійного струму. В наш час даний тип передачі використовується на тепловозах 2ТЭ116, 2ТЭ121, ТЭП70, ТЭМ7 і ін.

На тепловозах з передачею потужності змінно-постійного струму застосовуються тягові електродвигуни постійного струму з послідовним збудженням і ступінчастим ослабленням магнітного потоку збудження.

У тепловозній передачі потужності змінно-постійного струму (рис. 3.20) застосований синхронний трифазний генератор СТГ зі збудником і напівпровідниковий кремнієвий випрямляч ВУ з інтенсивним охолодженням. Вага синхронних генераторів на одиницю потужності майже в два рази менше ваги генераторів постійного струму за тією ж потужністю та частоту обертання вала дизеля. При цьому є реальні можливості для зниження ваги та розмірів випрямних установок.

Основна перевага синхронного генератора в порівнянні з генератором постійного струму полягає в відсутності колектора, що підвищує надійність його роботи та дозволяє значно збільшити обводову швидкість на поверхні ротора. Якщо для генератора постійного струму обводова швидкість якоря не перевищує 70 м/с, то для синхронного генератора вона досягає 180 м/с, а в деяких випадках – 200 м/с.

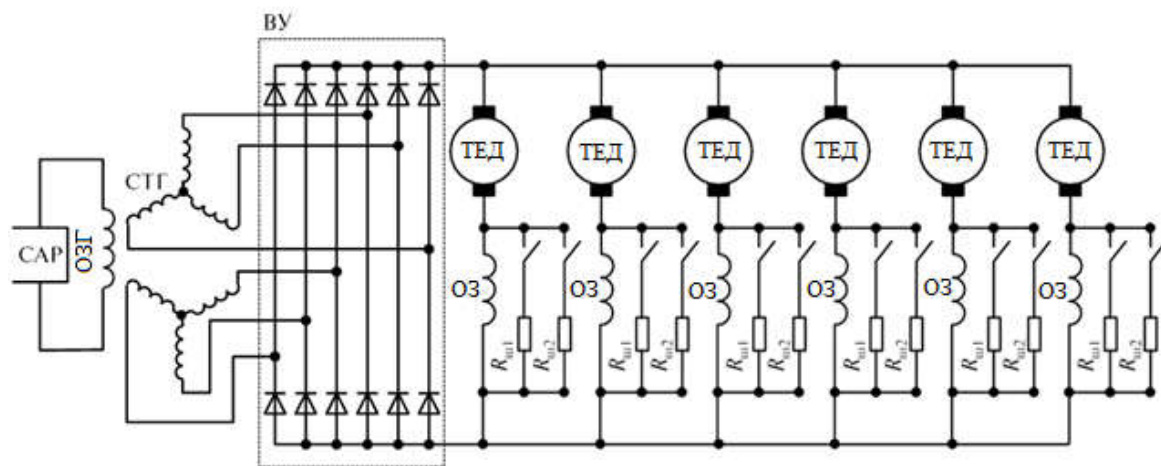


Рис. 3.20. Схема електричної передачі змінно-постійного струму: САР – система автоматичного регулювання збудження тягового генератора; ОЗГ – обмотка збудження тягового генератора (розташована на роторі); СТГ – синхронний тяговий генератор; ВУ – випрямна установка; ТЕД – тяговий електродвигун; ОЗ – обмотка збудження тягового електродвигуна;  $R_{ш1}$ ,  $R_{ш2}$  – опори ослаблення магнітного потоку тягового двигуна

Розрахунок тягових характеристик тепловозів з електричною передачею аналогічний подібному розрахунку для ЕРС з тією лише різницею, що напруга тягових електродвигунів змінюється відповідно до гіперболічної характеристики тягового генератора.

На рис. 3.21 наведені характеристики тепловоза 3ТЭ10М з електричною передачею постійного струму, а на рис. 3.22 – тепловоза 2ТЭ116 з передачею змінно-постійного струму.

Подальший розвиток електричної передачі потужності локомотива – це застосування передачі потужності змінно-змінного струму та перевід на тягові асинхронні електродвигуни як тепловозів, так і електровозів.

Основними видами безколекторних електродвигунів є асинхронний, синхронний і вентиляний електродвигуни.

Короткозамкнений асинхронний тяговий електродвигун має просту конструкцію й найменші габарити та масу. При однакових обертовому моменті та потужності маса асинхронного електродвигуна на 25...30 % менше маси, ніж маса електродвигуна постійного струму.

Електрична передача змінного струму маневрового тепловоза ТЭМ21, складається з синхронного генератора змінного струму ГСТ1050-1000, двох статичних перетворювачів частоти (випрямляч і

інвертор) і чотирьох асинхронних тягових двигунів ДАТ-350. Схема передачі наведена на рис. 3.23.

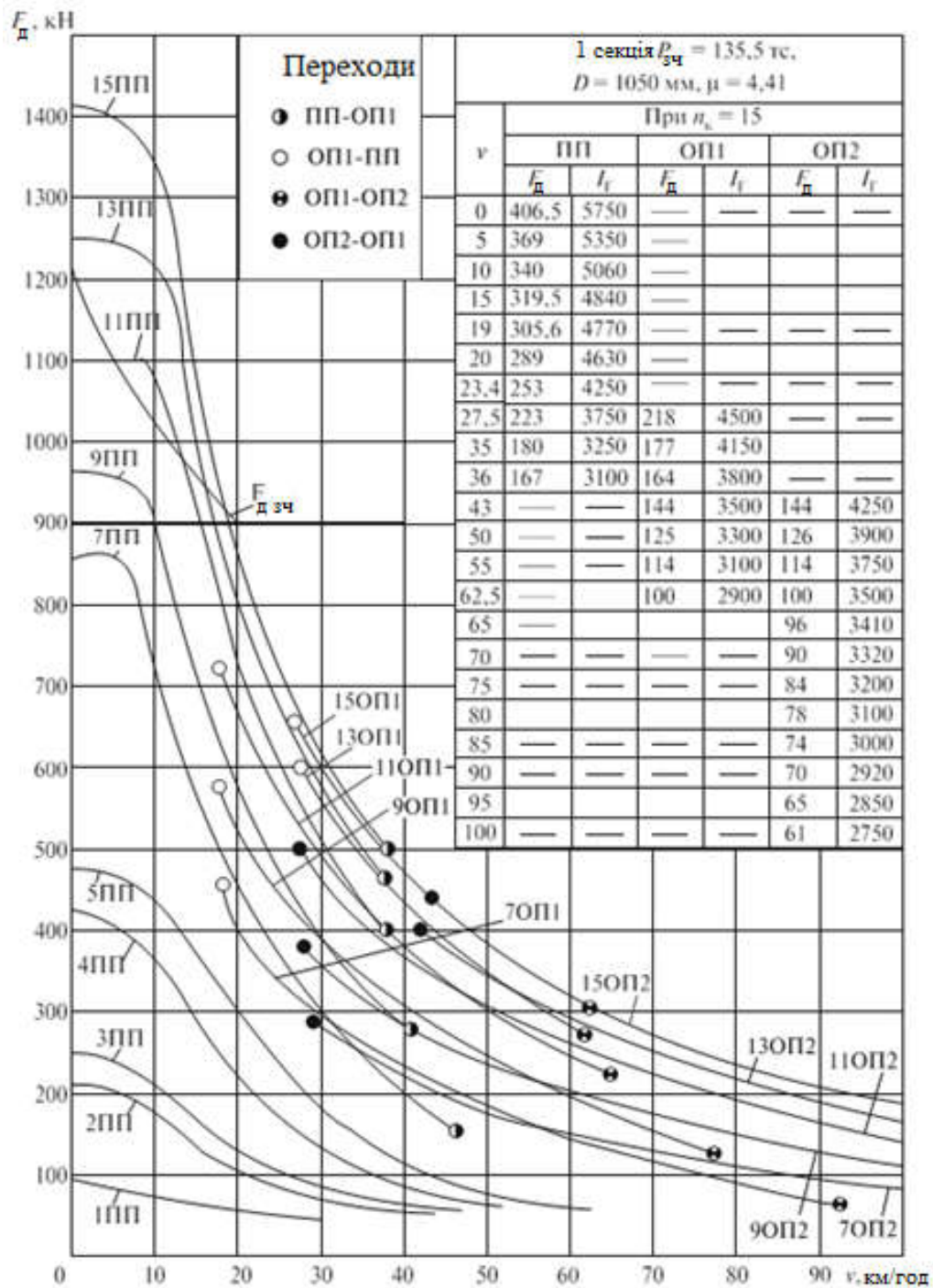


Рис. 3.21. Тягова характеристика тепловоза 3ТЭ10М

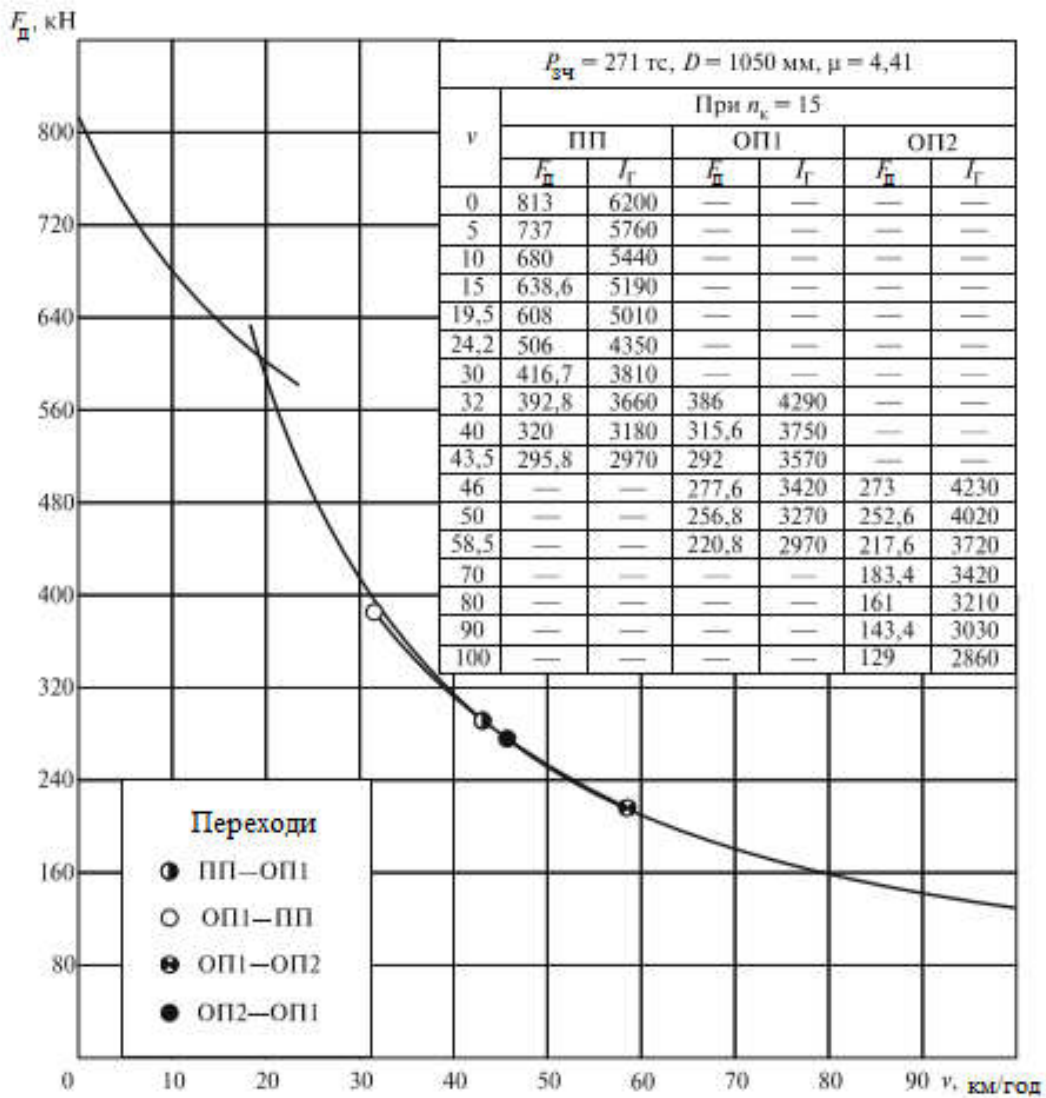


Рис. 3.22. Тягова характеристика тепловоза 2ТЭ116

Синхронний генератор має три трифазні обмотки (дві тягові та третя для живлення електроприводів допоміжних машин). З допомогою напівжорсткої муфти з'єднаний з колінчастим валом дизеля потужністю 1100 кВт. Кожен з статичних перетворювачів частоти складається з керованого випрямляча й автономного інвертора струму та призначений для регулювання частоти і амплітуди напруги живлення асинхронних тягових двигунів. Асинхронні тягові двигуни попарно підключені до статичних перетворювачів. Реверсування двигунів здійснюється шляхом зміни послідовності чергування фаз живильного струму.

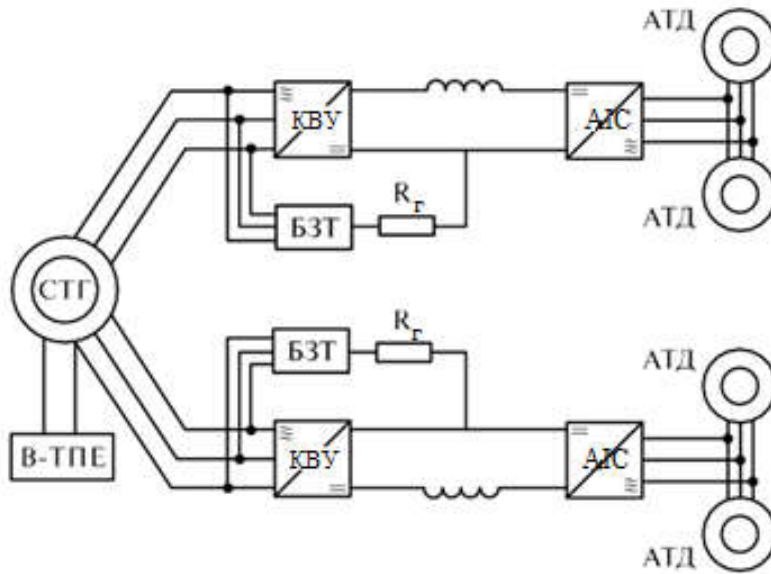


Рис. 3.23. Принципова схема електричної передачі змінного струму тепловоза ТЭМ21:

СТГ – синхронний тяговий генератор; КВУ – керована випрямна установка; АІС – автономний інвертор струму; БЗТ – блок замикаючих (гальмівних) тиристорів; В-ТПЕ – керований вентиль ланцюга збудження СТГ;  $R_r$  – опір гальмівних резисторів; АТД – асинхронний тяговий електродвигун

### Питання для самоконтролю

1. У чому полягає необхідність застосування передачі потужності?
2. Які основні вимоги пред'являються до передачі потужності?
3. Дайте визначення зовнішньої, часткової, швидкісної, універсальної та економічної характеристикам дизеля.
4. Поясніть пристрій і способи регулювання швидкості в механічній передачі потужності. У чому її основні недоліки?
5. Які типи гідравлічних передач існують? Чому гідростатична передача не знайшла застосування в тепловозах?
6. Дайте визначення гідромуфти та гідротрансформатора. У чому особливості їх конструкції і характеристик?
7. Навіщо в гідродинамічній передачі використовується кілька гідроапаратів? Перерахуйте основні переваги та недоліки гідропередач.



8. Пристрій та способи регулювання електричної передачі потужності постійного струму.

9. Чим пояснюється необхідність застосування передач змінно-постійного струму?

10. Перелічіть переваги та недоліки електричних передач потужності.

11. Назвіть особливості характеристики локомотива з механічною передачею.

12. Характеристика тепловоза з гідродинамічної передачею.

13. Характеристика тепловоза з електричною передачею.

## Сили опору руху поїзда

### 4.1. Класифікація сил опору руху

Рух поїзда супроводжується дією некерованих внутрішніх і зовнішніх сил, спрямованих проти його руху. Ці сили прийнято розрізняти за режимами та умовами руху, за видами та типами рухомого складу.

За режимами та умовами руху розрізняють: опір рушанню поїзда з місця; основний опір; додаткові опори.

Опором рушанню поїзда з місця називають опір, який виникає в процесі переходу частин поїзда зі стану спокою в стан руху, починаючи від локомотива та закінчуючи останнім вагоном. Цей опір обмежений за часом дії та суттєво відрізняється від сил основного опору. Тому він враховується окремо під час виконання тягових розрахунків.

Основним опором називають сукупність горизонтальних сил, постійно діючих проти поступального руху рухомого складу в процесі його руху.

Основний опір руху локомотива, в залежності від режимів ведення поїзда, підрозділяють на опір руху в режимі тяги та опір в режимі холостого ходу, тобто рух без тяги.

Основний опір відрізняється також за видами й типами рухомого складу: тепловозів, електровозів, електропоїздів та дизель-поїздів, вагонів з поділом за кількістю осей і типам буксових підшипників.

Некерованими додатковими опорами поступального руху називаються тимчасово діючі горизонтальні сили, що виникають від профілю і плану колії, від підвагонних електрогенераторів, вітру, низької температури повітря та інших причин.

За одиницями виміру всі опори можуть бути повні та питомі. Повний опір є опором руху для всього локомотива, вагона, состава, поїзда та позначається відповідно: для локомотива в режимі тяги  $W'_0$ , в режимі холостого ходу –  $W'_x$ , для состава –  $W''_0$ , поїзда –  $W_0 = W'_0 + W''_0$  в

режимі тяги або  $W_{0x} = W'_x + W''_0$  в режимі вибігу (холостого ходу) на прямій горизонтальній колії та вимірюється в ньютонах.

Питомий опір є опір руху, прикладений до одиниці ваги рухомого-составу і, відповідно позначається:  $\omega'_0 = \frac{W'_0}{P}$ ;  $\omega'_{xx} = \frac{W'_x}{P}$ ;  $\omega''_0 = \frac{W''_0}{Q}$ ;

$\omega_0 = \frac{W_0}{P+Q}$ ;  $\omega_{0x} = \frac{W_{0x}}{P+Q}$  і вимірюється Н/кН. В даному випадку роз-

мірність не скорочується, тому що вектори сили опору руху в Н (ньютонів) спрямовані паралельно до поступального руху, а вектори сили ваги в кН (кілоньютонів) спрямовані перпендикулярно.

## 4.2. Основний опір руху поїзда

Основний опір поступальному руху виникає в результаті: тертя в підшипниках букс; від опору кочення коліс по рейках; тертя ковзання коліс по рейках; опору від розсіювання енергії руху поїзда верхньою будовою колії та рухомим складом; повітряного опору; опору за рахунок роботи поглинаючих апаратів автотзчепів складу.

Опір від тертя підшипників букс колісних пар (рис. 4.1). Поступальний рух рухомого складу супроводжується коченням коліс по рейках, обертання яких можливе за рахунок зчеплення коліс з рейками та підшипників осей колісних пар. Від тертя в підшипниках букс виникає сила  $F_{\Pi}$ , яка створює опір обертанню колеса. Ця сила утворює момент  $M_{\Pi} = F_{\Pi} \frac{d}{2}$ , звідки  $K_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{R_k} = \frac{F_{\Pi} d}{D_k}$ , який в контактні колеса і рейки створює опір руху від підшипника букси. Відносно

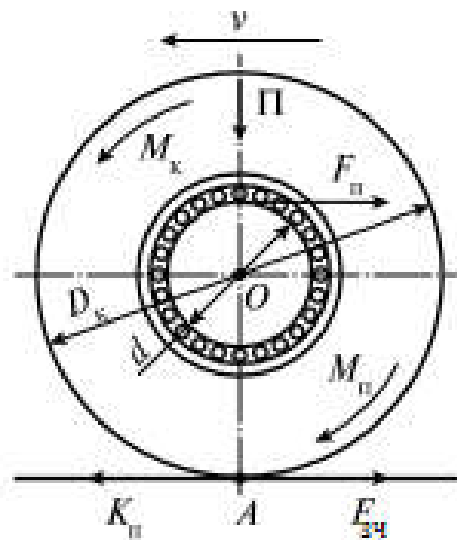


Рис. 4.1. Опір руху від тертя підшипників букс:

$M_k$  – момент кочення колеса при поступальному русі рухомого складу;  $M_{\Pi} = F_{\Pi} d / 2$  – момент опору коченню колеса від сили тертя кочення підшипника ( $F_{\Pi}$ ) букси;  $K_{\Pi} = K_1 = F_{3ч} = M_{\Pi} / 0,5D_k$  – сила опору руху від тертя в підшипнику букси

контакта  $A$  центр осі  $O$  отримує «обертальну» силу  $K_1 = K_{\text{п}}$ , спрямовану проти сил поступального руху. Ця сила виникає з моменту початку руху рухомого складу. Її величина залежить від: конструкції підшипника (ковзання або кочення); конструкції буксового вузла (щелепна, повідкова букса); якості складання під час монтажу буксового вузла; від масла – його чистоти, якості та кількості; температури буксового вузла та багатьох інших факторів.

*Опір від кочення коліс по рейках* (рис. 4.2). Від статичного навантаження рухомого складу кожне колесо прогинає рейку, а під час руху виникає «хвиля» перед колесами, яку колесо «намагається» подолати. З рис. 4.2 і співвідношення векторів сил визначається значення

$$K_2 = \frac{\Pi m}{R_{\text{к}}}$$

величині навантаження  $\Pi = 100$  кН  $K_2$  складатиме 0,4 Н/кН. Тому, чим твердіше ґрунт, чим потужніші рейки, тим менше їх вигин і «хвиля» перед колесами, тобто менше опір від кочення коліс по рейках, і навпаки. У зимовий час за низьких температурах ґрунт, рейки та колеса рухомого складу стають твердіше, тому ця складова основного опору руху менше, ніж в літній період експлуатації.

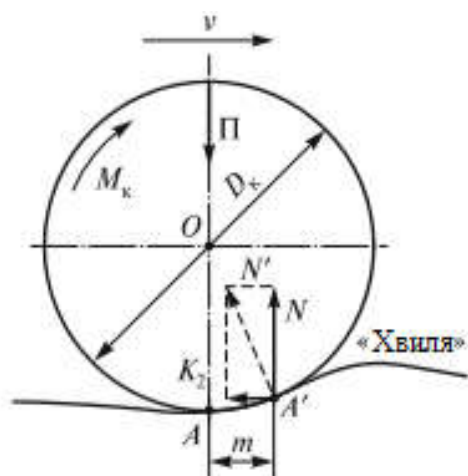


Рис. 4.2. Опір руху від кочення коліс по рейкам:

$K_2$  – сила опору поступальному руху від кочення колеса по рейкам;  $A'$  – зміщення центру  $A$  взаємодії при коченні колеса по рейкам

*Опір від тертя ковзання коліс по рейках* (рис. 4.3). Численними дослідженнями встановлено, що колеса рухомого складу взаємодіють з рейками не в точках дотику, а на *майданчиках* у вигляді еліпса (рис. 4.3, б). Причому, чим менше діаметр і твердіше колесо, тим менше пляма контакту. Пляма контакту залежить і від твердості рейки та ґрунту. Чим менше прогинається рейка від навантаження колеса, тим менше пляма контакту, і навпаки. У центрі плями контакту виникають найбільші напруги, значення яких можуть перевищити межу пластичності металу рейки та колеса. Це призводить до зносу рейок і коліс рухомого складу. Залежно від ступеня

знос рейки та колеса контактна площадка може приймати різну форму – не тільки еліпса, а й кола, смужки.

Пляма контакту значно впливає на опір руху, тому що під час поступального руху рухомого складу перекошування коліс будуть супроводжуватися тертям ковзанням частин взаємодії коліс в межах зони контакту з рейками через різні діаметри профілю поверхні кочення коліс. Крім того, колеса жорстко пов'язані віссю. Тому під час поступального руху виникає прослизання одного колеса відносно іншого, тому що шляхи кочення відносно поступального шляху через різницю діаметрів кіл катання будуть різними. Цей ефект посилюється за рахунок «виляння» колісної пари під час руху від однієї рейки до іншої навіть на прямих ділянках колії (рис. 4.4).

Під час кочення колеса по рейці дотична точка кола катання в момент взаємодії з рейкою абсолютно нерухома, тобто її швидкість дорівнює нулю за будь-якій поступальній швидкості рухомого складу. Таке характерне під час вільного кочення тільки в режимі холостого ходу (вибігу) (рис. 4.5).

Пружні властивості обода колеса та рейки в залежності від величини дотичної сили створюють зміщення центру взаємодії вперед ( $+\Delta\pi$ ) обода колеса щодо рейки в режимі тяги або назад ( $-\Delta\pi$ ) в режимі гальмування (рис. 4.6, *a*, *б*). Якщо дотична сила перевищує реактивну силу зчеплення в режимі тяги, колесо починає прослизати, збільшуючи оберти, що не відповідають частоті обертання під час поступального руху локомотива. Цей ефект називають *боксуванням*.

У режимі гальмування (див. рис. 4.6, *б*), у разі досягнення межі по зчепленню відбувається зменшення частоти обертання коліс відносно частоти обертання коліс у разі поступального руху рухомого складу на вибігу, аж до повного припинення обертання коліс по рейках. Припинення обертання коліс під час поступального руху рухомого складу

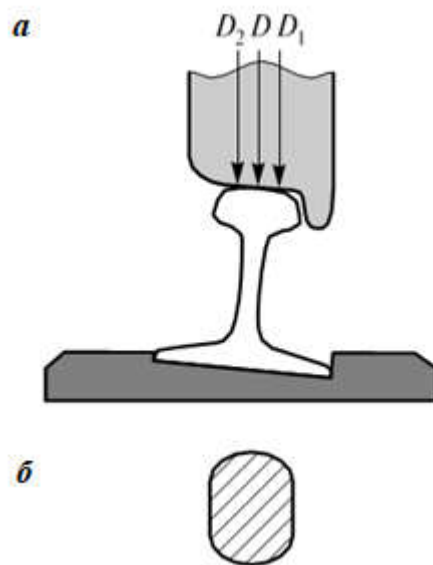


Рис. 4.3. Опір руху від тертя ковзання коліс по рейках:  
*a* – діаметри кіл катання  $D$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ;  
*б* – пляма контакту колеса з рейкою

(має назву юз), супроводжується ковзанням плями контакту коліс відносно поверхні рейок, утворюючи майданчики на поверхні кіл катання коліс, які називаються *повзунами*.

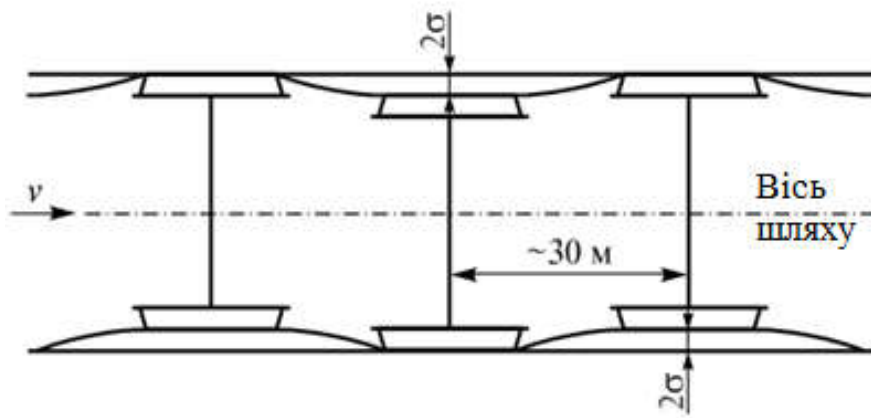


Рис. 4.4. Переміщення (виляння) колісних пар під час руху рухомого складу на прямій горизонтальній колії:

$2\sigma$  – сумарний зазор між гребенем колісної пари і внутрішньою кромкою головки рейки;  $\sim 30$  м – напівперіод «виляння» колісних пар при коченні по прямому горизонтальному шляху

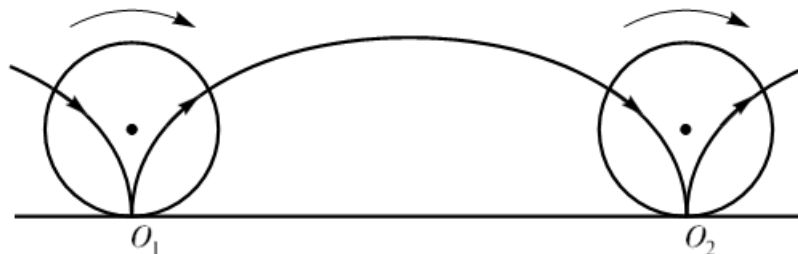


Рис. 4.5. Траєкторія (циклоїда) точки обода при коченні колеса по рейці:

$O_1, O_2$  – нерухомі положення точки обода в момент взаємодії з рейкою під час кочення колеса

Під час боксування та юзі в точках взаємодії коліс з рейками відсутнє зчеплення та відбувається ковзання. Характеристика взаємодії колеса і рейки в зазначених режимах представлена на рис. 4.7. По осі абсцис зазначається ковзання площин взаємодії колеса та рейки в залежності від режиму руху. У режимі вибігу ковзання площин взаємодії колеса і рейки  $S_{\text{ковз}}$  дорівнює 0.

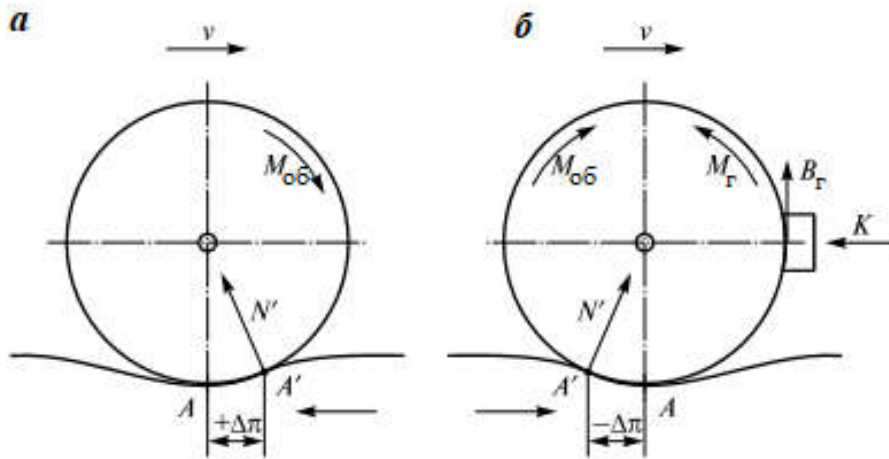


Рис. 4.6. Пружне переміщення точки (центру  $A$ ) взаємодії колеса і рейки:  
 а – в режимі тяги; б – в режимі гальмування

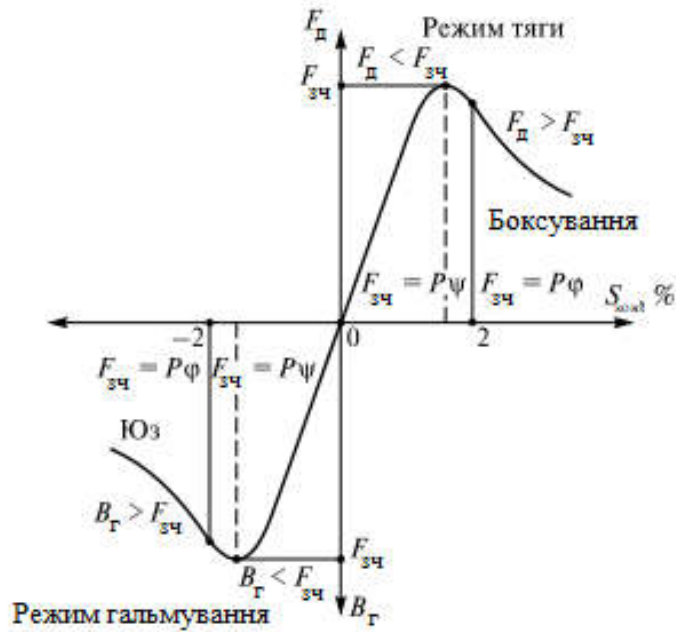


Рис. 4.7. Характеристика взаємодії (плями контакту) колеса та рейки локомотива в режимах тяги ( $+ S_{ковз}$ ), холостого ходу ( $S_{ковз} \approx 0$ ) і гальмування  $S_{ковз}$ );  $\psi$  – коефіцієнт зчеплення;  $\phi$  – коефіцієнт тертя ковзання

У режимі тяги (як відзначали багато дослідників) спочатку спостерігається пружне (лінійна залежність) ковзання площин взаємодії колеса та рейки, що становить  $S_{ковз} \approx 1$  %. При досягненні дотичної сили

$F_d$ , рівної сили зчеплення  $F_{зч}$ , в контактi спостерігається непружне прослизання колеса відносно рейки. За дотичну силу тяги  $F_d$ , близьку до максимальної сили зчеплення  $F_{зч}$ , виникає ковзання колеса відносно рейки  $S_{ковз} \approx 2\%$ . Якщо дотична сила тяги перевищить силу зчеплення, тобто  $F_d > F_{зч}$ , припиняється дія коефіцієнта зчеплення  $\psi$  і починає діяти коефіцієнт тертя ковзання  $\phi$ , який значно менше коефіцієнта  $\psi$ . Відбувається інтенсивне ковзання колеса відносно рейки, яке називають *боксуванням* колеса.

Фізична суть режиму гальмування аналогічна фізичній суті режиму тяги. Різниця полягає в тому, що ковзання колеса відносно рейки відбувається в зворотному напрямку в залежності від величини гальмівної сили аж до припинення обертання, тобто заклинювання колеса. У такому разі колесо ковзає навколо рейки (*юз*) зі швидкістю поступального руху поїзда. В результаті утворюється майданчик на поверхні кола катання колеса – повзун.

Діаметр гребенів колісної пари більше діаметра кола катання. Тому дотик гребеня внутрішньої площини голівки рейки завжди супроводжується тертям ковзанням, спрямованим проти поступального руху (рис. 4.8) і створює силу опору руху. Причому вектор сили тертя гребеня об рейку (див. рис. 4.8) спрямований проти поступального руху екіпажу. Таке явище спостерігається не тільки на колесах локомотива, а й колесах вагонів поїзда.

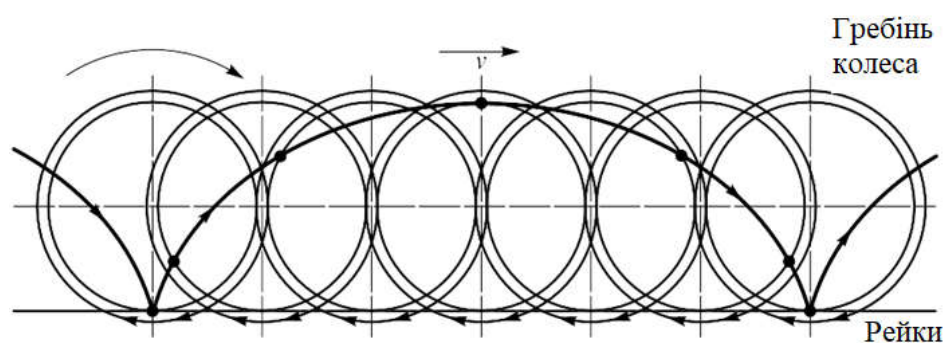


Рис. 4.8. Схема тертя гребеня колісної пари об голівку рейки під час руху поїзда

Переклад рейкової колії з 1524 мм на 1520 мм без зміни розмірів формування колісних пар значно зменшив свободу кочення коліс ( $2\sigma$ ; див. рис. 4.4) циліндричною частиною обода та частіше гребінь третється об внутрішню площину голівки рейки. Це призводить до інтенсивного



знос гребенів колісних пар і внутрішньої частини головок рейок (рис. 4.9), що супроводжується збільшенням витрат енергії.

*Опір руху від нерівності рейкової колії.* Він виникає від ударів під час проходження стиків і нерівностей колії як на перегонах, так і горловинах станцій, особливо під час руху по стрілочних переводах. Під час проходження стику момент скочування колеса з однієї рейки на іншу супроводжується ударом (рис. 4.10). Складова сили удару  $K'$  спрямована проти руху рухомого складу. Чим більше рейкових стиків під рухомим поїздом, тим сильніше опір руху. Крім того, рейки нерівномірно зношуються в вертикальній площині, особливо в місцях частого боксування колісних пар локомотивів і гальмування поїзда, наприклад, на станційних коліях, пунктах зупинки, на підйомах і крутих затяжних спусках. Ця нерівномірність зносу поверхні головки рейок, подібно стику, створює додатковий опір руху поїзда.

Безстикова («оксамитова») рейкова колія значно знижує опір руху поїзда.

*Опір руху від повітряного середовища* (рис. 4.11). Поїзд під час руху змушений долати аеродинамічний опір повітряного середовища. Перед лобовою частиною поїзда утворюється зона стисненого повітря, який чинить тиск на лобову частину локомотива. Бічні поверхні та дахи рухомого складу стикаються зі струменями повітря, що ковзає по ним, захоплюють частково його за собою, створюючи потік і тертя частини повітря об стінки рухомого складу. У міжвагонному просторі утворюються завихрення. Під рухомим складом частина повітря захоплюється

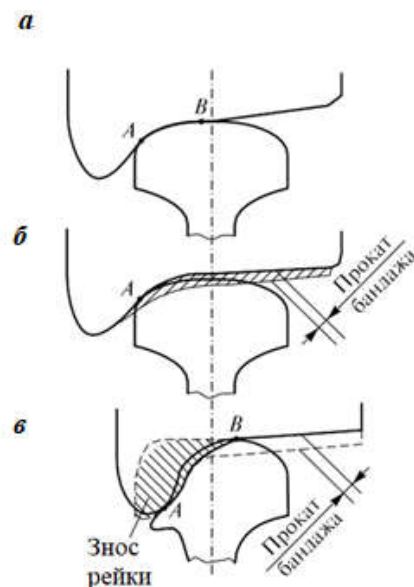


Рис. 4.9. Характерні зноси частин бандажа та рейки в процесі експлуатації

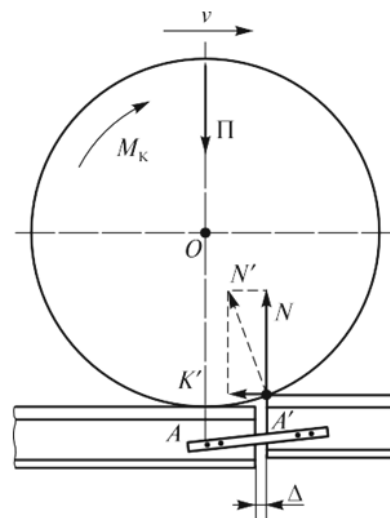


Рис. 4.10. Опір руху від нерівності рейкової колії:  $M_k$  – момент обертання колеса при поступальному русі;  $K'$  – сила опору поступальному руху від нерівності рейкової колії

поїздом, який, стикаючись з верхньою будовою колії, створює опір руху. За останнім вагоном поїзда утворюється розрідження. Ці явища створюють зовнішні сили, спрямовані проти руху поїзда, – силу опору повітряного середовища. Сила опору повітряного середовища змінюється пропорційно квадрату швидкості та має велике значення для організації швидкісного руху поїздів. Обтічна форма лобової та хвостовій частин складу значно знижує опір руху рухомого складу.

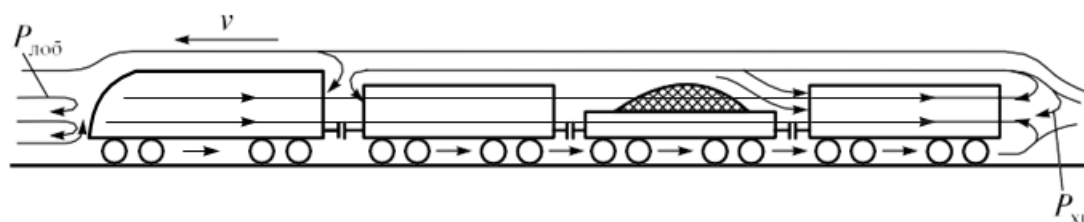


Рис. 4.11. Опір руху поїзда від повітряного середовища

*Опір руху від поглинаючих апаратів автоточень.* Під час руху поїзда виникають поздовжні динамічні сили, які призводять до ривків по довжині поїзда за рахунок пружних елементів зчеплення, великій різниці у вазі вагонів, зміни режиму ведення поїзда, зміни профілю колії та ряду інших причин. Ці ривки та поздовжні коливання по довжині поїзда частково поглинаються зчіпними пристроями, при цьому енергія розсіюється в навколишнє середовище та знижується кінетична енергія поїзда. На поповнення цих втрат витрачається робота сили тяги локомотива.

### 4.3. Розрахунок сил питомого основного опору руху

Розглянуті складові сил основного опору руху залежать від великого числа факторів, врахування яких сильно ускладнює розрахунки. Тому питомий основний опір руху кожного виду рухомого складу визначають за емпіричними формулами, отриманими на основі обробки результатів численних випробувань. Ці формули наводяться в ПТР окремо для ланкової (стикової) і безстикової колії (табл. 4.1).

## Розрахункові залежності питомого основного опору руху

Тип рухомого складу, режим роботи, тип колії	Розрахункова формула ( $\omega_0$ , Н/кН; $v$ , км/год; $q_0$ , кН/вісь)
1	2
<i>Тепловози і електровози</i>	
а) на ланковій колії в режимі: – тяги та електричного гальмування – холостого ходу (вибігу) та механічного гальмування  б) на безстиківій колії в режимі: – тяги та електричного гальмування – холостого ходу (вибігу) та механічного гальмування	$\omega'_0 = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2$ $\omega'_x = 2,4 + 0,01v + 0,00035v^2$ $\omega'_0 = 1,9 + 0,008v + 0,00025v^2$ $\omega'_x = 2,4 + 0,009v + 0,00035v^2$
<i>Дизель-поїзди Д, Д1, ДР1</i>	
а) на ланковій колії в режимі: – тяги  – холостого ходу та механічного гальмування – питомий опір у ланках механічної трансмісії  б) на безстиківій колії в режимі: – тяги  – холостого ходу та механічного гальмування – питомий опір у ланках механічної трансмісії	$\omega'_0 = 1,1 + 0,012v + \left( 0,000217 + \frac{0,000461}{n_B} \right) v^2$ $\omega'_x = \omega'_0 + \omega'_л$ $\omega'_л = \frac{(0,47 + 0,014v)n_M}{n_B}$ $\omega'_0 = 1,1 + 0,01v + \left( 0,000167 + \frac{0,000461}{n_B} \right) v^2$ $\omega'_x = \omega'_0 + \omega'_л$ $\omega'_л = \frac{(0,47 + 0,014v)n_M}{n_B}$
<i>Електропоїзди EP1, EP2, EP9</i>	
а) на ланковій колії в режимі: – тяги – вибігу  б) на безстиківій колії в режимі: – тяги – вибігу	$\omega'_0 = 1,1 + 0,12v + 0,000267v^2$ $\omega'_x = 1,24 + 0,02v + 0,000267v^2$ $\omega'_0 = 1,1 + 0,01v + 0,000267v^2$ $\omega'_x = 1,24 + 0,018v + 0,000267v^2$

Продовження табл. 4.1

1	2
<i>Електропоїзд EP22</i>	
а) на ланковій колії в режимі: – тяги – вибігу	$\omega'_0 = 1,1 + 0,12v + 0,000247v^2$ $\omega'_x = 1,22 + 0,018v + 0,000247v^2$
б) на безстиківій колії в режимі: – тяги – вибігу	$\omega'_0 = 1,1 + 0,01v + 0,000207v^2$ $\omega'_x = 1,22 + 0,016v + 0,000207v^2$
<i>Електропоїзди інших серій</i>	
а) на ланковій колії в режимі: – тяги – вибігу	$\omega'_0 = 0,6 + 0,3v + 0,00008v^2$ $\omega'_x = 1,1 + 0,02v + 0,00023v^2$
б) на безстиківій колії в режимі: – тяги – вибігу	$\omega'_0 = 0,6 + 0,027v + 0,00005v^2$ $\omega'_x = 1,1 + 0,017v + 0,0002v^2$
<i>Вантажні вагони</i>	
<i>чотиривісні навантажені (<math>q_0 &gt; 60</math> кН)</i>	
а) на ланковій колії: – з підшипниками ковзання*	$\omega''_0 = 0,7 + \frac{80 + v + 0,025v^2}{q_0}$
– з підшипниками кочення (зокрема вагони рефрижераторних поїздів)	$\omega''_0 = 0,7 + \frac{30 + v + 0,025v^2}{q_0}$
б) на безстиківій колії: – з підшипниками ковзання	$\omega''_0 = 0,7 + \frac{80 + 0,8v + 0,02v^2}{q_0}$
– з підшипниками кочення (зокрема вагони рефрижераторних поїздів)	$\omega''_0 = 0,7 + \frac{30 + 0,9v + 0,02v^2}{q_0}$
<i>чотиривісні порожні (<math>q_0 &lt; 60</math> кН)</i>	
а) на ланковій колії: – з підшипниками ковзання – з підшипниками кочення	$\omega''_0 = 1,5 + 0,045v + 0,00027v^2$ $\omega''_0 = 1,0 + 0,044v + 0,00024v^2$
б) на безстиківій колії: – з підшипниками ковзання – з підшипниками кочення	$\omega''_0 = 1,5 + 0,042v + 0,00018v^2$ $\omega''_0 = 1,0 + 0,044v + 0,00024v^2$

Продовження табл. 4.1

1	2
<i>шестивісні вагони</i>	
а) на ланковій колії: – навантажені ( $q_0 > 60$ кН)	$\omega_0'' = 0,7 + \frac{80 + v + 0,025v^2}{q_0}$
– порожні ( $q_0 < 60$ кН)	$\omega_0'' = 1,0 + 0,044v + 0,00024v^2$
б) на безстиківій колії: – навантажені ( $q_0 > 60$ кН)	$\omega_0'' = 0,7 + \frac{80 + 0,8v + 0,02v^2}{q_0}$
– порожні ( $q_0 < 60$ кН)	$\omega_0'' = 1,0 + 0,042v + 0,00016v^2$
<i>восьмивісні вагони</i>	
а) на ланковій колії	$\omega_0'' = 0,7 + \frac{50 + 0,38v + 0,021v^2}{q_0}$
б) на безстиківій колії	$\omega_0'' = 0,7 + \frac{60 + 0,26v + 0,017v^2}{q_0}$
<i>Пасажирські вагони для руху &lt; 160 км/год</i>	
а) на ланковій колії	$\omega_0'' = 0,7 + \frac{80 + v + 0,025v^2}{q_0}$
б) на безстиківій колії	$\omega_0'' = 0,7 + \frac{80 + 1,6v + 0,023v^2}{q_0}$

*Примітки.* \* в даний час рухомий склад з підшипниками ковзання в основному утилізовано.

1.  $n_m$  – число моторних вагонів;  $n_b$  – число вагонів у складі.
2.  $v$  – поступальна швидкість руху рухомого складу, км/год.
3.  $q_0$  – осьове навантаження рухомого складу, кН/вісь.
4. Наведені у таблиці формули періодично коригуються залежно від удосконалення залізничного транспорту та затверджуються у ПТР.

Питомий основний опір руху поїзда  $\omega_{0x}$ , н/кН, під час роботи локомотива в режимі холостого ходу (вибігу або гальмування) визначається за формулою:

$$\omega_{0x} = \frac{\omega'_x P + \omega''_0 Q}{P + Q}. \quad (4.1)$$

Якщо в складі поїзда знаходяться вагони різних типів і відома їх

вагова частка, то питомий основний опір руху вагонів

$$\omega_0'' = \alpha_{\text{ковз}} \omega_{04\text{ковз}}'' + \alpha_{\text{коч}} \omega_{04\text{коч}}'' + \beta \omega_{06}'' + \gamma \omega_{08}'' , \quad (4.2)$$

де  $\alpha_{\text{ковз}}$ ,  $\alpha_{\text{коч}}$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – частка ваги вагонів в складі: чотиривісних з підшипниками ковзання, чотиривісних з підшипниками кочення, шести- та восьмивісних, відповідно. При цьому повинна виконуватися рівність:

$$\alpha_{\text{ковз}} + \alpha_{\text{коч}} + \beta + \gamma = 1. \quad (4.3)$$

Питомий основний опір руху поїзда необхідно визначати як середньозважену величину питомих опорів різних типів одиниць рухомого складу.

**Приклад 1.** Визначити питомий основний опір руху по ланковій колії вантажного складу вагою  $Q = 30\,000$  кН з тепловозом 2М62У у голові вагою  $P = 2400$  кН, які працюють в режимі тяги зі швидкістю  $v = 50$  км/год.

Частки по вазі вагонів різних типів в складі поїзда складають:

–  $\alpha_{\text{ковз}} = 0,2$  – чотиривісні на підшипниках ковзання вагою 600 кН, отже, з осьовим навантаженням  $q_{0\text{ковз}} = 600/4 = 150$  кН/вісь;

–  $\alpha_{\text{коч}} = 0,3$  – чотиривісні на підшипниках кочення вагою 700 кН, тоді  $q_{0\text{коч}} = 700/4 = 175$  кН/вісь;

–  $\beta = 0,4$  – шестивісні вагою 1200 кН, тоді  $q_{06} = 1200/6 = 200$  кН/вісь;

–  $\gamma = 0,1$  – восьмивісні вагою 1600 кН, тоді  $q_{08} = 1600/8 = 200$  кН/вісь.

*Рішення.*

Для вирішення використовуємо розрахункові формули, наведені в табл. 4.1.

1. Перевіримо виконання умови (4.3):

$$\alpha_{\text{ковз}} + \alpha_{\text{коч}} + \beta + \gamma = 0,2 + 0,3 + 0,4 + 0,1 = 1.$$

2. Знайдемо питомий основний опір руху навантажених чотиривісних вагонів на підшипниках ковзання по ланковій колії

$$\omega_0'' = 0,7 + \frac{80 + v + 0,025v^2}{q_0} = 0,7 + \frac{80 + 50 + 0,025 \cdot 50^2}{150} = 1,98 \text{ Н/кН.}$$

3. Обчислимо питомий основний опір руху навантажених чотиривісних вагонів на підшипниках кочення по ланковій колії

$$\omega_0'' = 0,7 + \frac{30 + v + 0,025v^2}{q_0} = 0,7 + \frac{30 + 50 + 0,025 \cdot 50^2}{175} = 1,51 \text{ Н/кН.}$$

4. Знайдемо питомий основний опір руху навантажених шестивісних вагонів по ланковій колії

$$\omega_0'' = 0,7 + \frac{80 + v + 0,025v^2}{q_0} = 0,7 + \frac{80 + 50 + 0,025 \cdot 50^2}{200} = 1,66 \text{ Н/кН.}$$

5. Обчислимо питомий основний опір руху навантажених восьмивісних вагонів по ланковій колії

$$\begin{aligned} \omega_0'' &= 0,7 + \frac{60 + 0,38v + 0,021v^2}{q_0} = \\ &= 0,7 + \frac{60 + 0,38 \cdot 50 + 0,021 \cdot 50^2}{200} = 1,36 \text{ Н/кН.} \end{aligned}$$

6. Обчислимо питомий основний опір руху складу вагонів

$$\begin{aligned} \omega_0'' &= \alpha_{\text{ковз}} \omega_{04\text{ковз}}'' + \alpha_{\text{коч}} \omega_{04\text{коч}}'' + \beta \omega_{06}'' + \gamma \omega_{08}'' = \\ &= 0,2 \cdot 1,98 + 0,3 \cdot 1,51 + 0,4 \cdot 1,66 + 0,1 \cdot 1,36 = 1,649 \text{ Н/кН.} \end{aligned}$$

7. Знайдемо питомий основний опір руху тепловоза 2М62У по ланковій колії в режимі тяги

$$\omega_0' = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2 = 1,9 + 0,01 \cdot 50 + 0,0003 \cdot 50^2 = 3,15 \text{ Н/кН.}$$

8. Знайдемо питомий основний опір руху поїзда

$$\omega_{0x} = \frac{\omega'_x P + \omega''_0 Q}{P + Q} = \frac{3,15 \cdot 2400 + 1,649 \cdot 30000}{2400 + 30000} = 1,76 \text{ Н/кН.}$$

#### 4.4. Сили додаткових опорів руху

До сил додаткових опорів відносяться тимчасово діючі сили на поїзд, що рухається:

- від ухилу профілю колії;
- від кривизни плану колії;
- від вітру;
- від низької температури;
- від підвагонних генераторів пасажирських вагонів та інші тимчасово діючі сили.

*Сила опору від ухилу профілю колії.* Ця сила створюється складовою ваги поїзда, що діє на підйомі проти руху, а на спусках – у напрямку руху поїзда.

Крутизна підйому визначається кутом  $\alpha$  (рис. 4.12) відносно горизонтальної лінії рівня моря. На залізничному транспорті крутизну підйомів  $i$  вимірюють в тисячних частках ( $\text{‰}$ ), рівних відношенню висоти підйому  $BC$ , м, до його довжини  $AB$ , м, помноженому на 1000

$$i = \frac{1000BC}{AB} = 1000\sin\alpha. \quad (4.4)$$

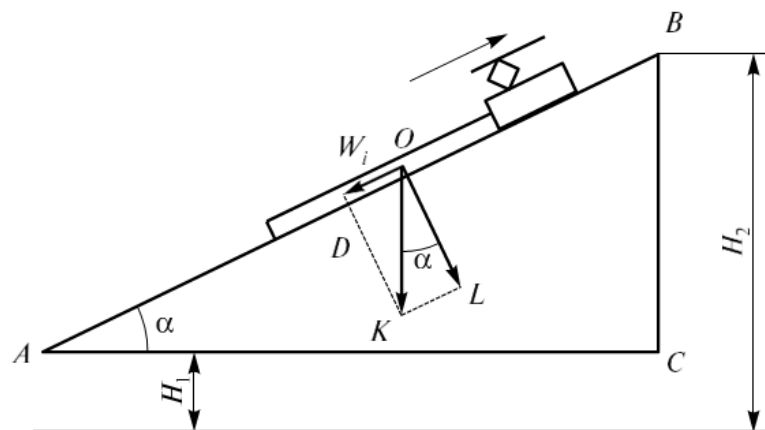


Рис. 4.12. Схема сил, які діють на поїзд, що знаходиться на ухилі профілю колії



Якщо відомі висоти точок  $A$  і  $B$  над рівнем моря  $H_1$  і  $H_2$ , то крутизна визначається за рівнянням:

$$i = \frac{1000(H_2 + H_1)}{S_{\text{ел}}}, \quad (4.5)$$

де  $S_{\text{ел}}$  – довжина елемента  $AB$  профілю колії, м.

Крутизна визначає висоту підйому в метрах на кожен кілометр колії. Наприклад, на підйомі  $i = 5\%$  поїзд піднімається на 5 м на кожному кілометрі колії, і значення підйому вказується позитивною величиною, а на спуску на кожному кілометрі поїзд спускається на 5 м, і перед значенням величини ухилу ставиться знак мінус, тобто  $i = -5\%$ .

Умовно поїзд розглядається як тверде тіло, і всі сили зосереджені в центрі ваги, тобто поїзд представляється матеріальною точкою. На рис. 4.12 показана схема сил, які діють на поїзд, що знаходиться на ухилі профілю колії. Вертикальний вектор  $OK$  відповідає в масштабі силі тяжіння поїзда  $(P + Q)$ . Його можна розкласти на два вектора:  $OL$  і  $OD$ . З побудови трикутника  $LOK$  і  $CAB$  подібні, а кути  $LOK$  і  $CAB$  рівні куту  $\alpha$ . Вектор  $OL$  відповідає силі  $(P + Q)\cos\alpha$  і не впливає на рух поїзда. Вектор  $OD$ , відповідний силі  $W_i = (P + Q)\sin\alpha$  або  $W_i = 1000(P + Q)\sin\alpha$  спрямований проти руху і є силою опору руху від підйому  $W_i$ .

Питома сила додаткового опору руху від ухилу  $\omega_i$ , Н/кН, визначається за формулою:

$$\omega_i = \frac{1000(P + Q)\sin\alpha}{P + Q} = 1000\sin\alpha. \quad (4.6)$$

Таким чином, питома сила додаткового опору від підйому  $\omega_i$ , Н/кН, чисельно дорівнює підйому в тисячних частках  $i$ ,  $\%$  (промиле), тобто

$$\omega_i = i. \quad (4.7)$$

Розглянемо приклад. Під час руху на підйом крутизною  $i = 9\%$  поїзд буде відчувати питомай додатковий опір руху  $\omega_i$ . Під час руху на

спуску крутизною  $i = -9\%$ , питомий опір руху поїзда від ухилу матиме те саме значення ( $\omega_i = -9$  Н/кН), але діяти воно буде за напрямком руху, збільшуючи швидкість поїзда.

#### 4.5. Додатковий опір руху поїзда від кривих ділянок плану колії

У кривих ділянках плану колії поїзд, що рухався гребенями коліс притискається до зовнішньої рейки. Сила реакції зовнішньої рейки змушує поїзд рухатися криволінійно. Між гребенями коліс і бічною поверхнею головки рейки виникає тертя, викликаючи опір руху. Крім того, при проході в кривих відбувається прослизання коліс колісної пари через різні шляхи руху по зовнішній і внутрішній рейках, збільшуючи опір руху. Поворот візків рухомого складу поїзда під час входу та виходу на кривих ділянках колії відносно кузова супроводжується тертям в опорах і опорно-повертаючих пристроях.

Перераховані сили тертя, приведені до дотичної силі, створюють сили додаткового опору руху від кривизни колії. Ці сили зростають зі зменшенням радіуса кривої та залежать від: швидкості руху, виду рухомого складу, стану колії та ступеня підвищення зовнішньої рейки, бічних зазорів між рейками і гребенями коліс, ступеня зносу колісних пар і їх розбігів та інших причин.

Через велику кількість факторів і складних залежностей сил опору руху в умовах експлуатації питомий додатковий опір руху від кривих  $\omega_r$ , Н/кН, визначають за емпіричними формулами в залежності тільки від основної складової – радіуса кривої:

$$\omega_r = \frac{700}{R}, \quad (4.8)$$

де  $R$  – радіус кривої ділянки колії, м, (рис. 4.13).

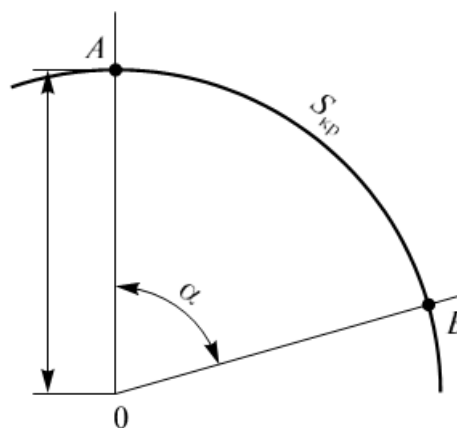


Рис. 4.13. Схема кривої ділянки колії

Криві ділянки колії, крім радіуса  $R$  і довжини  $S_{кр}$ , можуть бути задані центральним кутом  $\alpha$ . Тоді формулу (4.8) можна перетворити, виходячи з того, що коло має центральний кут  $360^\circ$ , а його довжина  $S_{кол} = 2\pi R$ . Довжину кривої в метрах з центральним кутом  $\alpha$  (в градусах) отримаємо з виразу

$$S_{кр} = S_{кол} \frac{\alpha}{360} = \frac{2\pi R \alpha}{360}.$$

Звідси

$$R = \frac{360 S_{кр}}{2\pi \alpha}. \quad (4.9)$$

Підставивши значення  $R$  в формулу (4.8), отримаємо

$$\omega_r = \frac{700 \cdot 2\pi \alpha}{360 S_{кр}} = \frac{12,2\alpha}{S_{кр}}. \quad (4.10)$$

У розрахунках, що потребують підвищеної точності, і при проектуванні залізниць питомий додатковий опір від кривої обчислюють за формулою:

$$\omega_r = \frac{200}{R + 1,5\tau},$$

де  $\tau$  – абсолютне значення незгашеного прискорення у кривій,  $\text{м/с}^2$ .

$$\tau = \frac{v^2}{13R} - \frac{hg}{S},$$

$h$  – підвищення зовнішньої рейки, мм;

$g$  – прискорення сили тяжіння,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$S$  – відстань між колами кочення колісної пари рухомого складу. Для ширини колії 1520 мм приймається  $S = 1600 \text{ мм}$ .

Якщо довжина кривої  $S_{кр}$  менше довжини поїзда  $l_{п}$ , вираз  $\omega_r$  множиться на відношення  $S_{кр}/l_{п}$ . Тоді формула (4.8) буде мати вигляд:

$$\omega_r = \frac{700S_{кр}}{Rl_{п}}, \quad (4.11)$$

а формула (4.10)

$$\omega_r = \frac{12,2\alpha}{l_{п}}. \quad (4.12)$$

Додатковий опір при русі в кривій замінюють рівним йому значенням опору від підйому і називають *фіктивним підйомом*. Наприклад, в кривій  $R = 700$  м поїзд відчуває додатковий питомий опір руху  $\omega_r = 700/700 = 1$  Н/кН. З огляду на вираз (4.7) його можна замінити прямолінійним рухом по фіктивному підйому з ухилом  $i = 1$  ‰.

Питомий додатковий опір від ухилів і кривих ділянок колії під час розрахунків замінюють так званим наведеним підйомом

$$i_r = \omega_r \pm i. \quad (4.13)$$

## 4.6. Спрявлення профілю та плану колії

Для підвищення точності тягових розрахунків проводиться спрявлення профілю та плану колії, на основі якого складається «Відомість розрахункового профілю колії» в обидві сторони руху. У розрахунках руху поїзда під час переходу з одного елемента профілю колії на інший передбачається, що зміна сил додаткового опору відбувається миттєво.

Насправді ж поїзд має певну довжину, і під час руху від одного елемента профілю до іншого його опір змінюється поступово в міру руху. Тому, зменшуючи число елементів профілю методами випрямлення, підвищують точність тягових розрахунків.

*Спрявлення є фіктивна заміна кількох дійсних елементів профілю одним – випрямленням.*

Скорочення числа елементів профілю зменшує обсяг і час розрахунку. Значення спрямлення ухилу  $i_c$  визначається за умови рівності виконуваної роботи локомотивом під час руху дійсним і випрямленим профілями колії. На кожному елементі профілю робота дорівнює добутку сил основного та додаткового опорів руху поїзда на довжину елемента. Ці сили рівні питомим силам (Н/кН), помноженим на вагу поїзда в кН. Наприклад, (рис. 4.14) під час руху по дійсному профілю колії  $LMN \dots P$ , що складається з  $n$  елементів, локомотив робить роботу, кДж, з подолання сил основного та додаткового опорів руху

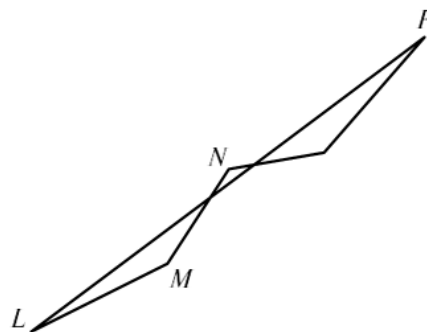


Рис. 4.14. Схема спрямлення профілю колії

$$A_p = (P + Q) [(\omega_{01} + i_1)S_1 + (\omega_{02} + i_2)S_2 + \dots + (\omega_{0n} + i_n)S_n]. \quad (4.14)$$

Робота, що здійснюється локомотивом під час руху по спрямленому профілю колії  $i'_c$  довжиною  $S_c = S_1 + S_2 + \dots + S_n$ , дорівнює

$$A_c = Mg(\omega_{0c} + i'_c)S_c. \quad (4.15)$$

Вважаючи, що  $A_p = A_c$  у виразах (4.14) і (4.15), і скоротивши обидві частини рівності на вагу поїзда  $Mg$ , отримаємо

$$[(\omega_{01} + i_1)S_1 + (\omega_{02} + i_2)S_2 + \dots + (\omega_{0n} + i_n)S_n] = (\omega_{0c} + i'_c)S_c. \quad (4.16)$$

Питомий основний опір руху поїзда  $\omega_0$  залежить від швидкості руху. На кожному елементі профілю швидкість відрізняється від швидкості руху по спрямленій ділянці. Якщо знехтувати різницею швидкостей руху по кожному елементу та вважати, що сили основного опору руху однакові, тобто  $\omega_{01} = \omega_{02} = \dots = \omega_{0n} = \omega_0 = \omega_{0c}$ , то отримаємо

$$\omega_0(S_1 + S_2 + \dots + S_n) = \omega_0 S_c.$$

Віднімаючи отримані значення з лівої і правої частин виразу (4.16)

отримаємо

$$i_1 S_1 + i_2 S_2 + \dots + i_n S_n = i'_c S_c,$$

і спрямлений ухил

$$i'_c = \frac{i_1 S_1 + i_2 S_2 + \dots + i_n S_n}{S_c} \quad (4.17)$$

або

$$i'_c = \frac{\sum_{i=1}^n i_i S_i}{S_c}. \quad (4.18)$$

Спрямлений ухил дорівнює відношенню сум добутків кожного елемента ухилу на його довжину до довжини спрямленої ділянки.

Значення  $i'_c$  можна визначити також виходячи з висоти точок кінця  $H_k$  і початку  $H_n$  спрямленої ділянки профілю колії

$$i'_c = \frac{1000(H_k - H_n)}{S_c}. \quad (4.19)$$

Припущення про рух з однією швидкістю по елементах різної крутизни спрямленої ділянки створює похибку в розрахунках, зростаючи зі збільшенням різниці в крутизні та довжинах елементів спрямленої ділянки. Щоб не допустити в розрахунках великих похибок під час визначення швидкості руху, спрямляти можна тільки близькі за значенням і знаком елементи профілю. Якість спрямлення вважається задовільною, якщо кожен елемент ділянки відповідає умові

$$S_i \leq \frac{2000}{\Delta i},$$

де  $S_i$  – довжина елемента профілю колії, м;

$\Delta i = |i_c - i_i|$  – абсолютна різниця між ухилами спрямленої ділянки та елемента, що перевіряється, ‰.

Більш точніші тягові розрахунки дає метод спрямлення профілю, розроблений вченими Н. І. Карташовим і Б. А. Павловим в першій по-

ловині минулого століття, які сформулювали наступні вимоги до спрямлення профілю колії:

- в межах станції спрямляти профіль не можна;
- розрахунковий підйом спрямляти не можна;
- необхідно спрямляти в межах «рівновеликості площ» (при графічному вирішенні завдання) – над лінією спрямлення і під лінією (рис. 4.14). Площі рівновеликості визначаються орієнтовно – «на око»;
- спрямляти тільки близькі за значенням і знаком елементи профілю. Різниця висоти ухилів спрямлюваних елементів не повинна перевищувати 2 м;
- спрямлення має задовольняти умові

$$S_{\text{ед}} = \frac{A}{|\pm i_{\text{кс}} - (\pm i_{\text{кд}})|}, \quad (4.20)$$

де  $S_{\text{ед}}$  – довжина дійсного елемента профілю, що входить в спрямляються профіль з урахуванням опору від кривої плану шляху, м;  
 $i_{\text{кс}}$  – ухил спрямлення ділянки з урахуванням опору від кривої плану, ‰;  
 $i_{\text{кд}}$  – ухил дійсного елемента профілю, що входить до спрямленої ділянки, з урахуванням опору від кривих плану, ‰.

Коефіцієнт  $A$  знаходять в залежності від довжини дійсного елемента профілю ( $S_{\text{ед}}$ ), що входить в спрямлений профіль колії, по табл. 4.2.

Таблиця 4.2

**Значення коефіцієнта  $A$  в залежності від довжини дійсного елемента профілю колії**

$S_{\text{ед}}, \text{ м}$	$\geq 450$	449...350	349...250	249...150	<150
$A$	2000	1600	1000	800	400

**Приклад 2.** Провести випрямлення заданого (рис. 4.15) профілю та плану колії методом Н. І. Карташова, Б. А. Павлова.

*Рішення.* На межах елементів профілю обчислюються червоні позначки і заносять їх на рис. 4.15.

Наприклад. Приймаємо, що нульовий кілометр розташований на

100 м над рівнем моря, тобто  $H_{\Pi} = 100$  м. Перший елемент ( $S_1 = 500$  м) розташований на підйомі  $i = 1,4$  ‰. Тоді в кінці елемента «червона» відмітка

$$H_{\text{к}} = 100 + \frac{1,4 \cdot 500}{1000} = 100,7 \text{ м і т.д.}$$

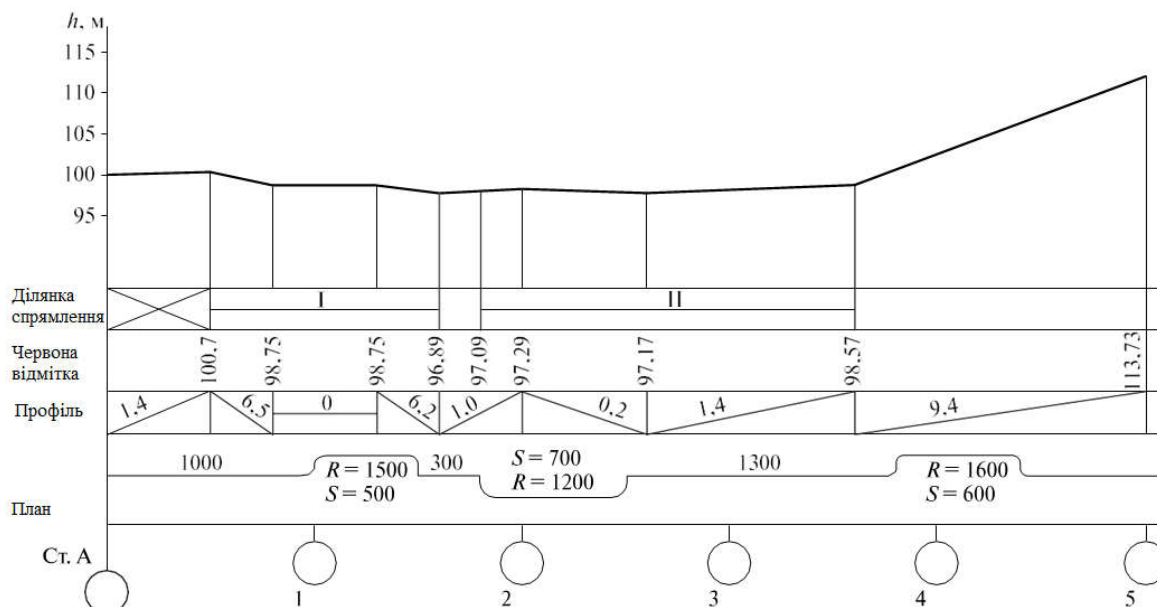


Рис. 4.15. Випрямлення профілю та плану ділянки колії

У масштабі по горизонталі  $u = 50$  мм/1 км, по вертикалі  $H = 2$  мм/1 м на рис. 4.15 будується профіль колії.

На рис. 4.15 відзначаються ділянки спрямлення (за принципом рівновеликості площ).

Складається «Журнал спрямлення».

Спрямлення I ділянки довжиною  $S_{c1} = 300 + 500 + 300 = 1100$  м

$$i_{c1} = \frac{1000(H_{\text{к}} - H_{\text{п}})}{S_{c1}} = \frac{1000(96,89 - 100,7)}{1100} = -3,46 \text{ ‰.}$$

з урахуванням кривизни ( $S_{1\text{к}} = 500$  м,  $R_{1\text{к}} = 1500$  м) профілю

$$i_{\text{кc1}} = i_{c1} + \omega_{r1} = i_{c1} + \frac{700}{S_{c1}} \left( \frac{S_{1\text{к}}}{R_{1\text{к}}} + \frac{S_{2\text{к}}}{R_{2\text{к}}} + \dots + \frac{S_{n\text{к}}}{R_{n\text{к}}} \right) =$$



$$= -3,46 + \frac{700 \cdot 500}{1100 \cdot 1500} = -3,25 \text{ ‰}.$$

Перевірка правомірності спрямлення I ділянки:

$$S_{\text{ед1}} = 300 \leq \frac{1000}{|-3,25 - (-6,5)|} = 307,7 \text{ м.}$$

Умова спрямлення виконується.

$$i_{\text{кд2}} = i_{\text{д2}} + \omega_{r2} = 0 + \frac{700 \cdot 300}{500 \cdot 1500} = 0,28 \text{ ‰},$$

$$S_{\text{ед2}} = 500 \leq \frac{1000}{|-3,25 - 0,28|} = 568 \text{ м.}$$

Умова спрямлення виконується.

$$i_{\text{кд3}} = i_{\text{д3}} + \omega_{r3} = -6,2 + \frac{700 \cdot 200}{300 \cdot 1500} = -5,89 \text{ ‰},$$

$$S_{\text{ед3}} = 300 \leq \frac{1000}{|-3,25 + 5,89|} = 379 \text{ м.}$$

Умова спрямлення виконується, отже, першу ділянку довжиною 1100 м можна спрямляти.

Спрямлення II ділянки довжиною  $S_{\text{с2}} = 200 + 600 + 1000 = 1800 \text{ м.}$

$$i_{\text{с2}} = \frac{1000(98,57 - 97,09)}{1800} = 0,82 \text{ ‰}.$$

Тому що на другій ділянці спрямлення є крива ( $S_{2\text{к}} = 700 \text{ м}$ ,  $R_{2\text{к}} = 1200 \text{ м}$ ), то

$$i_{\text{кс2}} = 0,82 + \frac{700 \cdot 700}{1800 \cdot 1200} = 1,047 \text{ ‰}.$$

Перевірка правомірності спрямлення

$$S_{ед1} = 200 \leq \frac{800}{|1,047 - 1,0|} = 17021 \text{ м,}$$

– умова виконується;

$$i_{кд2} = i_{д2} + \omega_{r1} = -0,2 + \frac{700 \cdot 600}{600 \cdot 1200} = 0,383 \text{ ‰,}$$

$$S_{ед2} = 600 \leq \frac{2000}{|1,047 - 0,383|} = 3012 \text{ м,}$$

– умова виконується;

$$i_{кд3} = i_{д3} + \omega_{r2} = 1,4 + \frac{700 \cdot 100}{1000 \cdot 1200} = 1,458 \text{ ‰,}$$

$$S_{ед3} = 1000 \leq \frac{2000}{|1,047 - 1,458|} = 4866 \text{ м}$$

– умова виконується.

Отже, спрямлення другої ділянки виконано правильно.

Далі складається «Відомість розрахункового профілю» в обох напрямках (табл. 4.3).

#### 4.7. Додаткові опору при рушанні поїзда з місця

Численними дослідженнями встановлено, що сили тертя в підшипниках букс під час зрушення поїзда виявляються більші, ніж під час руху. Це пояснюється тим, що під час зупинки падає гідродинамічний тиск масляного клина, який утворюється між підшипником і шийкою осі під час руху.

На стоянці поїзда тепле масло стікає з площин взаємодії підшипника та осі, а початок руху супроводжується напівсухим тертям в підшипниках букс. На в'язкість масла сильно впливає температура. У разі

зниженні температури в'язкість збільшується та зростає опір обертанню коліс рухомого складу. Крім того, під час стоянки відбуваються змінання металу та адгезія (зчеплення) взаємодіючих площин в зоні контакту коліс і рейок.

Таблиця 4.3

Відомість розрахункового профілю

Станція	$S_d, \text{ м}$	$i_d, \text{ ‰}$	$S_c, \text{ м}$	$\omega_d, \text{ Н/кН}$	$i_{\text{кв(кд)}}, \text{ ‰}$	
					туди	назад
А	500	1,4	500	—	1,4	-1,4
	300	-6,5		—		
	500	0	1100	$\frac{700 \cdot 500}{1100 \cdot 1500} = 0,21$	-3,25	3,67
	300	-6,2				
	200	1,0	200		1,0	-1,0
	200	1,0				
	600	-0,2	1800	$\frac{700 \cdot 700}{1800 \cdot 1200} = 0,227$	1,1	-0,6
	100	1,4				
	0	9,4	1400		9,6	-9,2
	140			$\frac{700 \cdot 600}{1400 \cdot 1600} = 0,2$		
	0					

Особливо велика сила опору під час зрушення виникає в підшипниках ковзання; в роликівих підшипниках вона значно менше. Сила опору зростає зі збільшенням часу стоянки поїзда.

В результаті цих причин опір зрушенню поїзда з місця значно перевищує основний опір руху. Тому він обов'язково повинен бути врахований під час організації руху поїздів.

Значення питомого опору рушанню поїзда з місця на майданчику визначаються за емпіричними формулами, рекомендованим ПТР.

Для рухомого складу на роликівих підшипниках

$$\omega_{\text{зруш}}^p = \frac{280}{q_0}, \quad (4.21)$$

а для рухомого складу на підшипниках ковзання

$$\omega_{\text{зруш}}^{\text{ковз}} = \frac{1420}{q_0 + 70}, \quad (4.22)$$

де  $q_0$  – навантаження, що припадає на одну вісь, кН.

Якщо в складі поїзда є різнотипні вагони, питомий опір поїзда під час зрушення з місця визначається як середньозважена величина:

$$\omega_{\text{зруш}} = \alpha \omega_{\text{зруш}}^{\text{р}} + \beta \omega_{\text{зруш}}^{\text{ковз}}, \quad (4.23)$$

де  $\alpha$  – частка вагонів з підшипниками кочення;

$\beta$  – частка вагонів з підшипниками ковзання.

**Приклад 3.** Визначити питомий додатковий опір під час зрушення з місця состава, що складається з 50 % чотиривісних вантажних вагонів на підшипниках ковзання і 50 % – на роликкових підшипниках та за середнє навантаження від колісної пари на рейки для всіх вагонів  $q_0 = 210$  кН.

*Рішення.*

1. Питомий опір під час зрушення з місця вагонів, обладнаних підшипниками ковзання

$$\omega_{\text{зруш}}^{\text{ковз}} = \frac{1420}{210 + 70} = 5,25 \text{ Н/кН.}$$

2. Питомий опір під час зрушення з місця вагонів, обладнаних підшипниками кочення

$$\omega_{\text{зруш}}^{\text{р}} = \frac{280}{210 + 70} = 1,0 \text{ Н/кН.}$$

3. Питомий опір під час зрушення з місця состава вагонів, обладнаних різнотипними буксовими підшипниками

$$\omega_{\text{зруш}} = 0,5 \cdot 1,0 + 0,5 \cdot 5,25 = 3,13 \text{ Н/кН.}$$

## 4.8. Опір від підвагонних генераторів пасажирського поїзда

За швидкості руху пасажирського поїзда більше 20 км/год слід враховувати в тягових розрахунках питомий додатковий опір від підвагонних електрогенераторів, які починають виробляти електроенергію для живлення електроспоживачів вагонів, за формулою:

$$\omega_{\text{пг}} = \frac{1360P'_{\text{пг}}}{q_0v}, \quad (4.24)$$

де  $P'_{\text{пг}}$  – середня умовна потужність підвагонного генератора, яка припадає на один вагон поїзда, кВт;

$q_0$  – навантаження від колісної пари на рейки, кН/вісь;

$v$  – швидкість руху, км/год.

Значення  $P'_{\text{пг}}$ , кВт, визначається за формулою:

$$P'_{\text{пг}} = \frac{P_{\text{пг}}n_{\text{бк}} + (P_{\text{пг}} + P_{\text{гк}})n_{\text{кп}}}{n}, \quad (4.25)$$

де  $P_{\text{пг}}$  – потужність підвагонного генератора, що витрачається на службові потреби, яка становить в середньому 2 кВт;

$n_{\text{бк}}$  – число пасажирських вагонів без кондиціонування;

$P_{\text{гк}}$  – потужність, що витрачається на кондиціонування повітря, яка становить в середньому 9 кВт;

$n_{\text{кп}}$  – число вагонів з кондиціонуванням повітря;

$n$  – загальне число вагонів в поїзді.

**Приклад 4.** Визначити питомий додатковий опір руху пасажирського поїзда від підвагонних генераторів, що складається з 20 вагонів, у тому числі 12 вагонів з установками для кондиціонування повітря. Швидкість руху – 50 км/год, величина навантаження на вісь  $q_0 = 151$  кН.

*Рішення.*

1. Умовна середня потужність підвагонного генератора, яка припадає на один вагон поїзда,

$$P'_{\text{пр}} = \frac{2 \cdot 8 + (2 + 9) \cdot 12}{20} = 7,4 \text{ кВт.}$$

2. Питомий додатковий опір руху пасажирського поїзда від підвагонних генераторів дорівнює

$$\omega_{\text{пр}} = \frac{1360 \cdot 7,4}{151 \cdot 50} = 1,34 \text{ Н/кН.}$$

#### 4.9. Додатковий опір руху поїзда від вітру

Вітер збільшує аеродинамічний опір поїзду. Якщо вітер спрямований назустріч, то швидкість поїзда знижується. У разі попутного вітру швидкість поїзда збільшується. Під дією бічного вітру відбувається зрушення екіпажу рухомого складу, і гребені коліс притискаються до бічної грані рейки. При цьому зростають сили тертя ковзання під час взаємодії колісних пар з рейками та загальний опір руху.

Управління АТ «Укрзалізниця» виділило залізничні ділянки, на яких за багаторічними даними метеослужб для кожного періоду року діють вітри певної швидкості та напрямку відносно колії.

Нормативами ПТР рекомендується враховувати питомий додатковий опір від вітру під час складання графіків руху поїздів. Додатковий опір руху вантажних поїздів у разі лобового та бічного вітру зі швидкістю 8...10 м/с у відсотках від основного опору, встановленому на підставі досліджень і дослідних поїздок, приведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

**Опір руху поїзда від вітру**

Швидкість руху поїзду км/год	Додатковий опір в % від основного при швидкості вітру, м/с		Швидкість руху поїзду км/год	Додатковий опір в % від основного при швидкості вітру, м/с	
	8	10		8	10
1	2	3	4	5	6

Продовження табл. 4.4

1	2	3	4	5	6
20	21	31	80	10	14
40	16	24	100	8	11
60	13	18	120	6	9

У передаваних метеозведеннях погоди прийняті наступні відмінності в швидкостях вітру: слабкий вітер – до 4 м/с; помірний – до 8 м/с; сильний – до 14 м/с; ураган – понад 14 м/с.

#### **4.10. Додатковий опір руху поїзда від низької температури**

За низьке значення температури підвищується густина повітря та збільшується аеродинамічний та основний опір руху, відбувається загущення масла, що призводить до підвищення сили тертя в буксових і моторно-осьових підшипниках. Це особливо проявляється після тривалих простоїв рухомого складу за низьких температурах. Зрушення поїзда з місця за цих умов супроводжується додатковими витратами сили тяги локомотива та витратами енергоресурсів. У зимовий період на залізницях для зниження тертя в буксових підшипниках рухомого складу застосовують сезонні масла.

На залізницях прийнято враховувати вплив температури зовнішнього повітря на опір руху поїзда нижче  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

У ПТР наводяться усереднені нормативи підвищення опору руху вантажних і пасажирських поїздів залежно від температури зовнішнього повітря та швидкості руху.

У табл. 4.5 наведені значення додаткового опору у відсотках від основного опору через низьку температуру зовнішнього повітря, які необхідно враховувати в тягових розрахунках.

#### **Питання для самоконтролю**

- 1. Назвіть сили опору руху поїзда.*
- 2. Що таке основний опір руху поїзда?*

3. Характеристика взаємодії колеса та рейки в режимах тяги, вибігу та гальмування.

4. Що відноситься до додаткових опорів руху поїзда?

5. Визначення додаткового опору від ухилу.

6. Визначення опору від кривих ділянок колії.

7. Основні вимоги до випрямлення профілю та плану колії.

Таблиця 4.5

**Опір руху поїзда від низької температури зовнішнього повітря**

Швидкість руху поїзда, км/год	Додатковий опір в % від основного опору за температурою, °С									
	вантажних вагонів					пасажирських вагонів				
	-30	-35	-40	-45	-50	-30	-35	-40	-45	-50
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
40	3	3	4	4	5	2	2	3	3	3
60	5	6	7	7	8	3	4	4	5	6
80	7	8	9	10	11	4	5	6	7	8
100	9	10	12	13	14	5	6	7	9	10
120	11	12	13	15	16	6	7	9	10	11
140	–	–	–	–	–	7	8	9	11	12
150	–	–	–	–	–	7	9	10	12	13



## Гальмівні сили поїзда

### 5.1. Загальні відомості

Гальмування здійснюється штучно створюваними додатковими зовнішніми силами, спрямованими проти поступального руху поїзда. Гальмівні сили створюються гальмівними пристроями рухомого складу, якими управляє машиніст з метою зниження швидкості за умовами ведення поїзда, зупинки його в певному місці колії або раптової зупинки поїзда в екстремальних ситуаціях. Від справності та ефективності гальмівних засобів рухомого складу та вмілого управління гальмами поїзда залежить безпека руху.

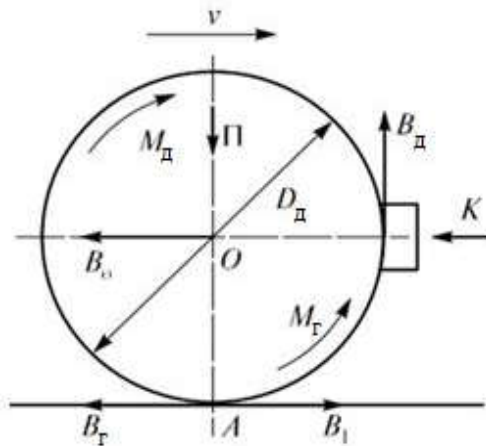


Рис. 5.1. Схема утворення гальмівної сили під час гальмування:  $M_r = B_d \cdot 0,5D_d$  – момент гальмування, що перешкоджає обертанню колеса під час поступального руху рухомого складу;  $K$  – сила притиснення гальмівної колодки до колеса;  $B_T = B_d = B_1 = B$  – сила гальмування поступального руху рухомого складу

У поїздах застосовуються різні гальмівні системи: фрикційні, електричні та магнітно-рейкові. Фрикційні пневматичні гальма рухомого складу створюють гальмування в результаті тертя притиснутих гальмівних колодок силою  $K$  о поверхні кочення коліс або об гальмівні диски, укріплені на колісних парах деяких типів пасажирських вагонів, вагонів електропоїздів та дизель-поїздів. Від тертя притиснутою силою  $K$  колодки об колесо утворюється сила  $B_d$  (рис. 5.1). В результаті створюється гальмівний момент  $M_r = B_d (D_d/2)$ , що перешкоджає вільному обертанню коліс моментом  $M_d$  на вибігу, а виникаюча реактивна сила

$B_r$  зчеплення коліс з рейками (зовнішня сила) утворює гальмівну силу  $B_0 = B_1 = B_r$ , спрямовану від центру обертання колеса проти поступального руху поїзда.

Пневматичне управління гальмами характеризується тимчасовою затримкою спрацьовування гальмівних пристроїв вагонів по довжині поїзда, що створює несприятливу динаміку гальмування.

Система управління електропневматичними гальмами (ЕПГ) забезпечує одночасне спрацьовування гальм всіх вагонів поїзда, що покращує керованість гальмами та підвищує безпеку руху. ЕПГ обладнуються тільки пасажирські поїзди.

В системі електричного гальмування локомотивів або моторвагонного рухомого складу кінетична енергія перетворюється в електричну енергію під час роботи тягових електродвигунів в генераторному режимі. Реактивний момент, створюваний ТЕД в режимі генератора, діє в напрямку руху, перешкоджаючи обертанню колісних пар локомотива під час поступального руху. В результаті взаємодії коліс і рейок утворюється гальмівна сила, вектор якої спрямований від центру обертання колеса проти поступального руху поїзда. Застосовуються дві системи електричного гальмування: *реостатна* та *рекуперативна*.

У разі реостатного гальмування електроенергія, що виробляється, згасає в резисторах локомотива. У разі рекуперативного гальмування електроенергія, що виробляється ТЕД надходить в контактну мережу та використовується іншими електровозами, що працюють в режимі тяги. Ефективність електричного гальмування полягає в зменшенні зносу бандажів колісних пар і гальмівних колодок локомотива та електрорухомого складу, в економії електроенергії під час рекуперативного гальмування. Електричні гальма застосовують в основному для регульовального гальмування.

На швидкісному електрорухомому складі застосовувалось *магнітно-рейкові гальма*. У такій системі використовуються спеціальні гальмові башмаки із секціонованими магнітопроводами, на яких встановлені котушки, що створюють магнітний потік, що замикається через рейку. Сила гальмування залежить від сили тяжіння башмака до рейки та площі полюсного башмака. Ця сила від башмака передається на раму візка. Електромагнітна сила, що притискає башмак до рейки, не зменшує навантаження осей електрорухомого складу на рейки та не викликає розвантаження колісних пар. Тому магнітно-рейкове гальмо може бути використане додатково до механічних і до електричних

гальм.

Гальмівні сили магнітно-рейкового гальма не обмежені зчепленням коліс з рейками та можуть створювати великі гальмівні сили, які неможливо отримати за інші системи гальмування. Тому ці гальма застосовуються на швидкісному рухомому складі.

*Фрикційні гальма* на рухомому складі є основними. Режим їх роботи залежить від мети гальмування. Розрізняють такі режими гальмування: екстрене, повне службове, службове зупиночне та регульовальне.

*Екстрене гальмування* застосовують для зупинки поїзда в надзвичайних випадках. При цьому повністю використовується гальмівна сила поїзда. Екстрене гальмування не рекомендується без особливої потреби застосовувати в поїздах, особливо в поїздах підвищеної маси та довжини, тому що при цьому виникають різкі динамічні впливи на рухомий склад і небезпека виникнення юза.

*Повне службове гальмування* виконується для визначення довжини ділянок розміщення постійних сигналів. Гальмівна сила при цьому використовується на 80 %.

*Службове гальмування* застосовується для зупинки поїзда. Гальмівна сила при цьому використовується на 50 %.

*Регульовальне гальмування* застосовують для підтримки швидкості руху поїзда на заданому рівні.

Гальмуванням гасять накопичену кінетичну енергію поїзда, яка дорівнює половині добутку приведеної маси поїзда на квадрат швидкості на початку гальмування.

За допомогою гальмівних розрахунків визначають:

1) допустиму швидкість руху при заданому гальмівному шляху, відомих гальмівних засобах і профілі колії;

2) потрібну силу натискання гальмівних колодок при заданій максимально допустимій швидкості руху, довжині гальмівного шляху та крутизні ухилу;

3) довжину гальмівного шляху в залежності від заданої максимальної (початкової) швидкості руху, сили натискання гальмівних колодок і профілю колії.

Ці завдання вирішуються окремо для вантажних та пасажирських поїздів.

*Гальмівний шлях* – це відстань, яку проходить поїзд від моменту повороту ручки крана в гальмівне положення до повної зупинки поїзда.

За нормативами гальмівний шлях не повинен перевищувати:  
– 1000 м – для пасажирських поїздів, що рухаються зі швидкостями до 140, і вантажних – до 100 км/год;  
– 1200 м – для пасажирських поїздів, що рухаються зі швидкостями до 160, і вантажних – до 120 км/год.

Виходячи з цих нормативів, виконують розташування сигналів і огорожу місць перешкоди, що забезпечує безпеку руху поїздів.

## 5.2. Визначення гальмівної сили поїзда

Гальмівна сила  $B_{\Gamma}$ , Н, поїзда визначається сумою сил, утворених всіма гальмівними колодками рухомого складу за формулою

$$B_{\Gamma} = 1000 \sum_1^{n_o} \varphi_k K_o, \quad (5.1)$$

де  $n_o$  – число гальмівних осей у поїзді;

$\varphi_k$  – дійсний коефіцієнт тертя колодок;

$K_o$  – дійсна сила натискання гальмівних колодок на колісну пару (на вісь), кН.

Якщо прийняти середнє значення коефіцієнта тертя для всіх колодок однаковим, то формула (5.1) набуде вигляду

$$B_{\Gamma} = 1000 \varphi_k \sum_1^{n_o} K_o. \quad (5.2)$$

Питома гальмівна сила пасажирського поїзда, Н/кН,

$$b_{\Gamma} = \frac{B_{\Gamma}}{P + Q}. \quad (5.3)$$

Для вантажного поїзда

$$b_r = \frac{B_r}{Q}. \quad (5.4)$$

Відношення суми сил натиснення гальмівних колодок до ваги поїзда називається дійсним гальмівним коефіцієнтом

$$\vartheta = \frac{\sum K_o}{P + Q}. \quad (5.5)$$

У цьому випадку рівняння (5.3) приймає вигляд

$$b_r = 1000\varphi_k \vartheta.$$

Якщо в поїзді є вагони з різним натисканням гальмівних колодок на колесо, гальмівні розрахунки за формулою (5.6) стають громіздкими, тому що значення  $\varphi_k$  і  $K$  потрібно визначати для кожної колодки окремо. У цих випадках зазвичай використовують більш простий метод – *метод приведення*. Він базується на заміні дійсного коефіцієнта тертя колодок об колесо, що залежить від сили натискання  $K$ , іншим значенням – розрахунковим коефіцієнтом тертя  $\varphi_{кр}$ , який не залежить від сили  $K$ .

Дійсний коефіцієнт тертя  $\varphi_k$  для стандартних чавунних колодок визначається за емпіричною формулою:

$$\varphi_k = 0,6 \cdot \frac{1,63K + 100}{8,15K + 100} \cdot \frac{v + 100}{5v + 100}, \quad (5.7)$$

а для чавунних колодок з підвищеним вмістом фосфору за формулою:

$$\varphi_k = 0,5 \cdot \frac{1,63K + 100}{5,3K + 100} \cdot \frac{v + 100}{5v + 100}. \quad (5.8)$$

Дійсний коефіцієнт тертя  $\varphi_k$  для композиційних колодок визначається за формулою:

$$\varphi_k = 0,44 \cdot \frac{0,1K + 20}{0,41K + 100} \cdot \frac{v + 150}{2v + 150}. \quad (5.9)$$

Для визначення  $\varphi_{кр}$  приймаються умовні середні сили натиснення колодок на колісну пару: чавунних –  $K_ч = 26,5$  кН (2,7 т), композиційних –  $K_к = 15,7$  кН (1,6 т). Підставивши значення  $K_ч$  і  $K_к$  в формули (5.7), (5.8) і (5.9), отримаємо:

– для чавунних колодок

$$\varphi_{кр} = 0,27 \frac{v+100}{5v+100}; \quad (5.10)$$

– для чавунних колодок з підвищеним вмістом фосфору

$$\varphi_{кр} = 0,3 \frac{v+100}{5v+100}; \quad (5.11)$$

– для композиційних колодок

$$\varphi_{кр} = 0,36 \frac{v+150}{2v+150}. \quad (5.12)$$

Значення розрахункових коефіцієнтів тертя колодок об колесо, обчислені за формулами (5.10) – (5.12), наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

**Значення розрахункового коефіцієнта тертя  $\varphi_{кр}$  гальмівних колодок**

Швидкість $v$ , км/год	Гальмівні колодки		
	чавунні стандартні	чавунні з фосфором	композиційні
1	2	3	4
0	0,270	0,3	0,360
10	0,198	0,218	0,339
20	0,162	0,178	0,332
30	0,140	0,154	0,297
40	0,126	0,138	0,309
50	0,116	0,127	0,288
60	0,108	0,119	0,280
70	0,102	0,112	0,273
80	0,097	0,107	0,267
90	0,093	0,102	0,262
100	0,090	0,099	0,257
110	0,087	0,096	0,253

Закінчення табл. 5.1

1	2	3	4
120	0,085	0,093	0,249
130	0,083	0,091	0,246
140	0,081	0,090	0,242
150	0,079	0,087	0,240
160	0,077	0,086	0,237

Для збереження під час гальмування тієї ж гальмівної сили необхідно дійсну силу натиснення колодок на колісну пару замінити розрахунковою силою натискання. Розрахункова сила натискання визначається за умови рівності гальмівних сил

$$K\varphi_k = K_p\varphi_{kp}. \quad (5.13)$$

Звідси

$$K_p = K \frac{\varphi_k}{\varphi_{kp}}. \quad (5.14)$$

Після підстановки значень  $\varphi_k$  і  $\varphi_{kp}$  в рівняння (5.14), отримуємо вирази:

– для стандартних чавунних колодок

$$K_p = 2,22K \frac{1,63K + 100}{8,15K + 100}; \quad (5.15)$$

– для чавунних колодок з підвищеним вмістом фосфору

$$K_p = 1,85K \frac{1,63K + 100}{5,3K + 100}; \quad (5.16)$$

– для композиційних колодок

$$K_p = 1,22K \frac{0,1K + 20}{0,41K + 20}. \quad (5.17)$$

Розрахункові сили натиснення колодок на колеса обчислюються

для кожного типу рухомого складу та наводяться у вигляді норм, установлених в інструкціях з експлуатації гальм (табл. 5.2 і 5.3).

Таблиця 5.2

**Розрахункові сили натиснення на одну чавунну гальмівну колодку локомотивів**

Серія локомотива	Число гальмівних колодок	Число гальмівних циліндрів	Сила натиснення на одну колодку, кН
<i>Тепловози</i>			
2М62У	24	8	64
2ТЭ10 (всі індекси)	24	8	85
2ТЭ116	48	24	30
ТЭП60, ТЭП70	24	8	30
ТЭМ2	12	8	64
ЧМЭЗ	24	8	29
<i>Дизель-поїзди (всі серії)</i>			
моторний вагон	16	8	80
причіпний вагон	16	8	50
<i>Електровози</i>			
ВЛ10, ВЛ10У, ВЛ82, ВЛ80 (всі індекси)	32	8	41
ВЛ60 (всі індекси)	24	4	30
<i>Електропоїзди (всі серії)</i>			
моторний вагон	16	1	26
причіпний вагон	16	1	18

Таблиця 5.3

**Розрахункові сили натиснення на одну гальмівну колодку вантажних та пасажирських вагонів**

Тип вагона	Число композиційних гальмівних колодок	Сила натиснення на колодку, кН		
		завантажений вагон	середній вагон	порожній вагон
1	2	3	4	5
<i>Вантажні</i>				
чотиривісні напіввагони	8	24	14,8	8,2
чотиривісні платформи, криті вагони, цистерни	8	25	15,4	8,5



Закінчення табл. 5.3

1	2	3	4	5
шестивісні напіввагони	12	17	10	6
восьмивісні напіввагони	16	22	13,5	7,5
восьмивісні цистерни	16	22	13,5	7,5
рефрижераторні	16	25	15	8,6
<i>Пасажирські</i>				
ціліснометалічні вагою, кН	16	11,6	7,4	4,3
– 530–620				
– 480–520				
з дисковим гальмом	16	10,3	–	–
з регулятором швидкості	16	8,8	–	–

Якщо в одному поїзді будуть наявні вагони з чавунними та композиційними колодками, то силу натискання колодок на вісь перераховують на один вид колодок (зазвичай чавунних) з урахуванням рівної ефективності гальм (табл. 5.4).

Таблиця 5.4

**Розрахункові сили натиснення гальмівних колодок вагонів в перерахунку на чавунні**

Тип вагона	Розрахункове натискання гальмівних колодок, $K_p$ , кН/вісь
1	2
Цільнометалеві пасажирські вагони з вагою тари:	
– 53 т і більше	100
– 45 т і більше, але менше 53 т	90
– 42 т і більше, але менше 48 т	80
Цільнометалеві пасажирські вагони ВЛ-РЩ з гальмом КЕ та чавунними гальмівними колодками:	
– пасажирський режим	100
– швидкісний режим	150
Цільнометалеві пасажирські вагони габариту РЩ на візках ТВЗ-ЦНДІ «М» з гальмом КЕ та композиційними гальмівними колодками (у перерахунку на чавунні колодки):	
– пасажирський режим	100
– швидкісний режим	130
Пасажирські вагони довжиною 20,2 м і менше	90

Закінчення табл. 5.4

1	2
Інші вагони пасажирського парку	65
Вантажні вагони, обладнані чавунними колодками, в режимі:	
– завантаженому	70
– середньому	50
– порожньому	35
Вантажні вагони, обладнані композиційними колодками (у перерахунку на чавунні колодки), в режимі:	
– завантаженому	85
– середньому	70
– порожньому	35
Чотиривісні ізотермічні та багажні цільнометалеві вагони з одностороннім гальмуванням	60
Вагони рухомого рефрижераторного складу з чавунними гальмівними колодками в режимі:	
– завантаженому	90
– середньому	60
– порожньому	35
Вагони рухомого рефрижераторного складу з композиційними гальмівними колодками (в перерахунку на чавунні колодки) в режимі:	
– середньому	70
– порожньому	45

Сумарне розрахункове натиснення гальмівних колодок обчислюється за кількістю вагонів кожного виду ( $n_4, n_6, n_8$ ), що входять до складу поїзда, числу осей локомотива заданої серії ( $n_{\text{л}}$ ) і розрахунковому натисканні на одну гальмівну вісь для кожного виду вагонів і локомотива

$$\sum K_p = n_{\text{л}} K_{\text{рл}} + 4n_4 K_{\text{р4}} + 6n_6 K_{\text{р6}} + 8n_8 K_{\text{р8}}. \quad (5.18)$$

Якщо не всі осі в складі є гальмівними, це слід враховувати під час обчислення сумарного натискання гальмівних колодок.

З цією метою сумарне гальмівне натискання для складу ( $4n_4 K_{\text{р4}} + 6n_6 K_{\text{р6}} + 8n_8 K_{\text{р8}}$ ) множиться на коефіцієнт, що дорівнює частці гальмівних осей у складі. Якщо частка гальмівних осей задана для кожного типу вагонів, то відповідні коефіцієнти множать на кожне з доданків у

виразі (5.18).

Після обчислення сумарного розрахункового натиснення гальмівних колодок поїзда, визначається значення розрахункового гальмівного коефіцієнта

$$\vartheta_p = \frac{\sum K_p}{P + Q}. \quad (5.19)$$

Розрахунковий гальмівний коефіцієнт характеризує ступінь забезпечення поїзда гальмівними засобами. Чим він більший, тим більший гальмівний ефект створять гальмівні сили, тим швидше зупиниться поїзд і на більш короткій відстані. Для забезпечення безпеки руху поїздів встановлено мінімальні значення розрахункових гальмівних коефіцієнтів:

– 0,33 для складів вантажних поїздів у разі швидкості руху до 90 км/год;

– 0,6 для рефрижераторних і дизель-поїздів у разі швидкості руху до 120 км/год;

– для пасажирських поїздів:

– 0,6 у разі швидкості руху до 120 км/год;

– 0,78 у разі швидкості руху до 140 км/год;

– 0,8 у разі швидкості руху до 160 км/год.

Повне значення розрахункового гальмівного коефіцієнта та відповідна йому питома гальмівна сила реалізуються тільки у разі екстреного гальмування.

У розрахунках гальмування для зупинки на станціях і роздільних пунктах, передбачених графіком руху поїздів, а також у разі зниження швидкості перед задалегідь відомим місцем застосовують службове гальмування з розрахунковим гальмівним коефіцієнтом:

– 0,5 для вантажних поїздів;

– 0,6 для пасажирських, електро- та дизель-поїздів.

Якщо застосовується повне службове гальмування, значення  $\vartheta_p$  приймають рівним 0,8.

Коли за допомогою гальмівних розрахунків визначають мінімальну відстань між підлоговими постійними сигналами, значення розрахункового гальмівного коефіцієнта приймають рівним 0,8.

Правилами тягових розрахунків рекомендується не брати в розрахунок пневматичні гальма локомотива та його вагу під час визначення

гальмівної сили *вантажного* поїзда, що рухається на ділянках зі спусками до  $-20\%$ . Тобто у формулі (5.19) можна виключити  $P$ , а в формулі (5.18) – доданок  $n_{\text{л}}K_{\text{рл}}$ .

**Приклад 1.** Визначити повну та питому гальмівну силу состава вантажного поїзда вагою 40000 кН, сформованого з 60 чотиривісних піввагонів, обладнаних композиційними колодками. Швидкість поїзда на початку гальмування становить 60 км/год, число гальмівних осей – 80 %.

*Рішення.*

1. Розрахункова сила натискання на одну гальмівну вісь чотиривісних піввагонів у завантаженому режимі (див. табл. 5.3)

$$K_o = n_k K,$$

де  $n_k$  – число гальмівних колодок на вісь.

$$K_o = 2 \cdot 24 = 48 \text{ кН.}$$

2. Число гальмівних осей у складі поїзда

$$n_o = a_r \cdot 4n_v,$$

де  $a_r$  – частка гальмівних осей у складі поїзда,  $a_r = 80\% = 0,8$ .

$$n_o = 0,8 \cdot 4 \cdot 60 = 192 \text{ осі.}$$

3. Сумарна сила натискання гальмівних колодок на осі состава поїзда

$$\sum K_o = K_o \cdot n_o = 48 \cdot 192 = 9216 \text{ кН.}$$

4. Коефіцієнт тертя композиційних колодок (за формулою (5.9))

$$\varphi_k = 0,44 \cdot \frac{0,1 \cdot 48 + 20}{0,41 \cdot 48 + 100} \cdot \frac{60 + 150}{2 \cdot 60 + 150} = 0,214.$$

5. Повна гальмівна сила складу поїзда (за формулою (5.2))

$$B_r = 1000 \cdot 0,24 \cdot 9216 = 1971200 \text{ Н.}$$

6. Питома гальмівна сила  $b_r$ , Н/кН, за вагою поїзда  $P+Q$  (за формулою (5.3))

$$b_r = \frac{1971200}{40000} = 49,28 \text{ Н/кН.}$$

### 5.3. Принципи розрахунків гальмівних сил у разі пневматичному управлінні гальмами

Під час гальмування поїзда гальмівна сила виникає не відразу після переведення рукоятки крана машиніста в гальмівне положення. Потрібен час на поширення повітряної хвилі по гальмівній магістралі складу, спрацьовування розподільників повітря, переміщення гальмівної важільної передачі до зіткнення гальмівних колодок з колесами та на збільшення натискання колодок до сталого значення.

Розв'язуючі гальмівні завдання аналітичним способом за інтервалами швидкості, повний гальмівний шлях  $S_r$  визначається як сума двох складових

$$S_r = S_n + S_d,$$

де  $S_n$  – підготовчий гальмівний шлях, м;

$S_d$  – дійсний гальмівний шлях, м.

Гальмівний шлях розділений на підготовчий  $S_n$  і дійсний  $S_d$  умовно. Діаграма наповнення гальмівних циліндрів у вантажному поїзді під час екстреного гальмування приведена на рис. 5.2.

З метою спрощення гальмівних розрахунків в області несталого режиму дії гальмівної сили у разі її зростання дійсні діаграми наповнення гальмівних циліндрів (лінії 1–3) замінюються умовною стрибкоподібною лінією  $OCDB$ , прийнятою однаковою для всіх гальмівних циліндрів. При цьому передбачається, що під час проходження поїздом шляху підготовки гальм до дії  $t_n$  (лінія 0–C) тиск у всіх гальмівних

циліндрах поїзда дорівнює нулю, а швидкість поїзда не змінюється. Після цього тиск в гальмівних циліндрах зростає стрибком (лінія  $C-D$ ) і далі залишається постійним.

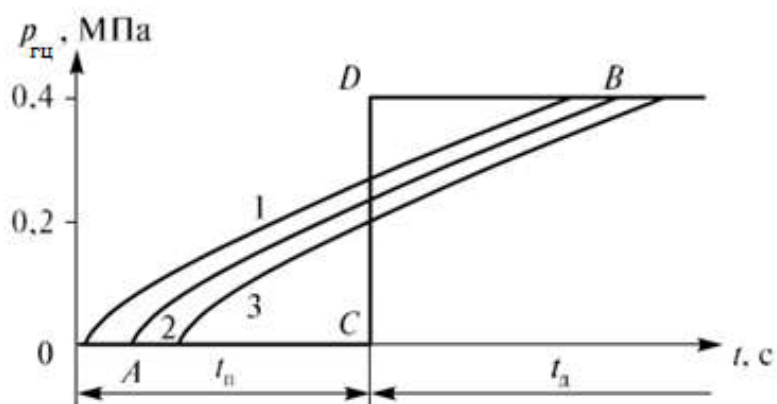


Рис. 5.2. Діаграма наповнення гальмівних циліндрів стисненим повітрям у вантажному поїзді під час екстреного гальмування:

1 – головного вагона; 2 – середнього вагона; 3 – хвостового вагона

Час підготовки гальм до дії залежить від довжини поїзда, типу гальм, типу розподільника повітря та режиму його роботи, тому що від цього залежить характер і нахил діаграми наповнення, а також від гальмівної сили та ухилу, на якому відбувається підготовка гальм до дії. У розрахунках під час підготовки гальм до дії швидкість руху приймається постійною, хоча фактично вона збільшується або зменшується в залежності від ухилу та гальмівної сили. Час  $t_n$  називають часом підготовки гальм до дії. За цей час поїзд пройде шлях  $S_n$  з рівномірною початковою швидкістю  $v_n$ . Цей шлях  $S_n$ , м, називають підготовчим до гальмування, який визначається за формулою:

$$S_n = \frac{v_n t_n}{3,6} = 0,278 v_n t_n. \quad (5.20)$$

Час підготовки гальм до дії визначається за формулою:

$$t_n = a - \frac{ci}{b_r}, \quad (5.21)$$

де коефіцієнти  $a$  і  $c$  визначаються з табл. 5.5;  $i$  – ухил (%), на якому

відбувається гальмування поїзда.

Таблиця 5.5

**Коефіцієнти до формули (5.21)**

Категорія рухомого складу	Тип управління гальмами	Кількість осей	<i>a</i>	<i>c</i>
Вантажний	пневматичне	< 200	7	10
Вантажний	пневматичне	201...300	10	15
Вантажний	пневматичне	>300	12	18
Пасажирський	пневматичне		4	5
Пасажирський	електропневматичне		2	3
Локомотив	пневматичне		4	5
Пасажирський	ручні гальма $t_{\text{п}} = 60$ с			

Повний гальмівний шлях

$$S_{\Gamma} = S_{\text{п}} + S_{\text{д}}, \quad (5.22)$$

де  $S_{\text{д}}$  – дійсний шлях гальмування, м.

$$S_{\text{д}} = \sum \frac{4,17(v_{\text{п}}^2 - v_{\text{к}}^2)}{1000\vartheta_{\text{р}}\varphi_{\text{кр}} + \omega_{0\text{x}} + i_{\text{с}}} = \sum \frac{4,17(v_{\text{п}}^2 - v_{\text{к}}^2)}{b_{\Gamma} + \omega_{0\text{x}} + i_{\text{с}}}, \quad (5.23)$$

де  $v_{\text{к}}$ ,  $v_{\text{п}}$  – кінцева та початкова швидкості в розрахунковому інтервалі, км/год;

$\vartheta_{\text{р}}$  – розрахунковий гальмівний коефіцієнт поїзда;

$\varphi_{\text{кр}}$  – розрахунковий коефіцієнт тертя колодок для середньої швидкості  $v_{\text{ср}}$ ;

$\omega_{0\text{x}}$  – питомий опір поїзда під час руху локомотива без тяги зі швидкістю  $v_{\text{ср}} = (v_{\text{п}} + v_{\text{к}}) / 2$  для прийнятого інтервалу швидкостей, Н/кН;

$i_{\text{с}}$  – спрямований (в профілі і плані) спуск, на якому відбувається гальмування поїзда, ‰;

$b_{\Gamma}$  – середня питома гальмівна сила в інтервалі зміни швидкості, Н/кН.

**Приклад 2.** Визначити повний шлях та час гальмування вантажного поїзда, що складається з 60 чотиривісних напіввагонів, при повному службовому гальмуванні, середнє навантаження від колісної пари на рейки  $q_0 = 200$  кН. Швидкість руху на площадці ( $i_c = 0$  ‰) на початку гальмування  $v_{пi} = 50$  км/год, всі осі гальмівні, повний гальмівний коефіцієнт  $\vartheta'_p = 0,33$ .

Рішення.

1. Кількість гальмівних осей у складі поїзда

$$n_o = 4n_b = 4 \cdot 60 = 240.$$

2. Вага состава поїзда

$$Q = n_o q_0 = 240 \cdot 200 = 48000 \text{ кН.}$$

3. Розрахунковий гальмівний коефіцієнт поїзда при повному службовому гальмуванні

$$\vartheta_p = 0,8\vartheta'_p = 0,8 \cdot 0,33 = 0,26.$$

4. Розрахунковий коефіцієнт тертя чавунних колодок визначаємо за формулою:

$$\varphi_{кр} = 0,27 \frac{v_{срi} + 100}{5v_{срi} + 100},$$

де  $v_{срi}$  – середня швидкість в  $i$ -му інтервалі  $v_{пi} \dots v_{ки}$ , км/год.

$$v_{срi} = \frac{v_{пi} + v_{ки}}{2}.$$

Величина  $\Delta v_i = v_{пi} - v_{ки}$  задовольняє умові  $\Delta v_i \leq 10$  км/год.

У прикладі заданий діапазон зміни швидкості руху вантажного поїзда 50...0 км/год треба розбити (від  $i = 1$  до  $n$ ) на п'ять інтервалів швидкостей: 50–40; 40–30; 30–20; 20–10; 10–0 км/год.

Для першого інтервалу середня швидкість руху дорівнює



$$v_{\text{ср1}} = \frac{50 + 40}{2} = 45 \text{ км/год.}$$

Розрахунковий коефіцієнт тертя за  $v_{\text{ср1}} = 45$  км/год

$$\varphi_{\text{кр1}} = 0,27 \frac{45 + 100}{5 \cdot 45 + 100} = 0,121.$$

5. Питома гальмівна сила поїзда за  $v_{\text{ср1}} = 45$  км/год визначається за формулою:

$$b_{\text{г1}} = 1000 \cdot 0,121 \cdot 0,26 = 31,46 \text{ Н/кН.}$$

6. Питомий основний опір руху навантажених чотиривісних напіввагонів за швидкістю  $v_{\text{ср1}} = 45$  км/год

$$\omega_0'' = 0,7 + \frac{30 + v + 0,025v^2}{q_0} = 0,7 + \frac{30 + 45 + 0,025 \cdot 45^2}{200} = 1,328 \text{ Н/кН.}$$

Результати розрахунку величин  $\varphi_{\text{кр1}}$ ,  $b_{\text{г1}}$ ,  $\omega_0''$  для решти інтервалів зміни швидкостей наведено в табл. 5.6.

Таблиця 5.6

**Результати розрахунку гальмівної сили та питомого основного опору руху  
состава вантажного поїзда**

Параметр	Величина параметру за для значення швидкості					
	50	45	35	25	15	5
$\vartheta_p$	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
$\varphi_{\text{кр}}$	0,116	0,121	0,131	0,15	0,177	0,227
$b_{\text{г}}, \text{Н/кН}$	30,16	31,46	34,06	39,0	46,02	59,02
$\omega_0'', \text{Н/кН}$	1,41	1,328	1,18	1,05	0,95	0,88

*Примітка.* Відповідно до ПТР на спусках не крутіше  $-20,0\%$  вага локомотива вантажного поїзда під час гальмівних розрахунків не враховується, оскільки його частка у вазі поїзда становить не більше  $10\%$  і майже не впливає на точність тягових розрахунків.

**7. Час підготовки гальм до дії**

$$t_{\Pi} = 10 - \frac{15 \cdot 0}{30,16} = 10 \text{ с.}$$

8. Шлях підготовки гальм до дії за швидкістю на початок гальмування  $v_{\Pi}$

$$S_{\Pi} = 0,278 \cdot 50 \cdot 10 = 139 \text{ м.}$$

9. Дійсний гальмівний шлях  $S_{\text{д}}$  визначається за формулою (5.4) для кожного інтервалу зміни швидкостей окремо:

– для першого інтервалу  $v_{\text{п1}} = 50$  км/год та  $v_{\text{к1}} = 40$  км/год, середньої швидкості  $v_{\text{ср1}} = 45$  км/год

$$S_{\text{д1}} = \frac{4,17(50^2 - 40^2)}{31,46 + 1,328 + 0} = 114,5 \text{ м;}$$

– для другого інтервалу  $v_{\text{п2}} = 40$  км/год та  $v_{\text{к2}} = 30$  км/год, середньої швидкості  $v_{\text{ср2}} = 35$  км/год

$$S_{\text{д2}} = \frac{4,17(40^2 - 30^2)}{34,06 + 1,18 + 0} = 82,8 \text{ м;}$$

– для третього інтервалу  $v_{\text{п3}} = 30$  км/год та  $v_{\text{к3}} = 20$  км/год, середньої швидкості  $v_{\text{ср3}} = 25$  км/год

$$S_{\text{д3}} = \frac{4,17(30^2 - 20^2)}{39,0 + 1,18 + 0} = 52,1 \text{ м;}$$

– для четвертого інтервалу  $v_{\text{п4}} = 20$  км/год та  $v_{\text{к4}} = 10$  км/год, середньої швидкості  $v_{\text{ср4}} = 15$  км/год

$$S_{\text{д4}} = \frac{4,17(20^2 - 10^2)}{46,02 + 0,95 + 0} = 16,6 \text{ м;}$$

– для п'ятого інтервалу  $v_{п5} = 10$  км/год та  $v_{к5} = 0$  км/год, середньої швидкості  $v_{ср5} = 5$  км/год

$$S_{д5} = \frac{4,17(10^2 - 0^2)}{59,02 + 0,88 + 0} = 7, \text{ м};$$

$$S_{д} = S_{д1} + S_{д2} + S_{д3} + S_{д4} + S_{д5} = 114,5 + 82,8 + 52,1 + 26,6 + 7,0 = 238 \text{ м.}$$

10. Час дійсного гальмування

$$t_{д} = \sum 3,6 \frac{S_{дi}}{v_{срi}} = \frac{3,6 \cdot 114,5}{45} + \frac{3,6 \cdot 82,8}{35} + \frac{3,6 \cdot 52,1}{25} + \frac{3,6 \cdot 26,6}{15} + \frac{3,6 \cdot 7,0}{5} = 36,6 \text{ с.}$$

11. Повний шлях гальмування вантажного поїзда до зупинки

$$S_{г} = 139 + 283 = 422 \text{ м.}$$

12. Час повного гальмування до зупинки поїзда складе

$$t_{г} = 10 + 36,6 = 46,6 \text{ с.}$$

## 5.4. Системи електричного гальмування

Електричне гальмування поділяється на електродинамічне та електромагнітне рейкове.

*Електродинамічне гальмування* базується на принципі оборотності електричних машин, тобто на переводі тягового електродвигуна в режим генератора. В цьому випадку машиніст пропускає електричний струм по обмоткам збудження тягових електродвигунів. Під час поступального руху локомотива колісна пара через редуктор обертає якор

в магнітному полі системи збудження статора. У якорі наводиться електричний струм, який направляє на реостат (реостатне гальмування) або перетворювач для передачі струму в контактну мережу (рекуперативного гальмування). Так механічна енергія рухомого локомотива перетворюється в електричну енергію та одночасно створюється гальмівна сила.

Електродинамічне гальмування локомотивів дозволяє:

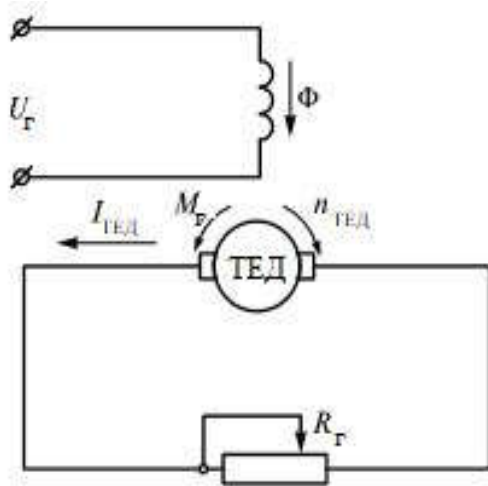
- зменшити знос гальмівних колодок і бандажів колісних пар;
- підвищити безпеку руху поїздів завдяки додатково котельної системі гальмування на локомотивах;
- підвищити швидкості руху поїздів на затяжних спусках;
- зменшити витрати на утримання механічної системи гальмування;
- застосувати автоматичне регулювання гальмування для підтримки певної швидкості руху за програмою автоведення, наприклад, в поїздах метрополітену та особливо в поїздах високошвидкісного руху.

Основними недоліками електродинамічного гальмування є:

- отримання гальмівного ефекту тільки в процесі руху локомотива і тільки тих осей рухомого складу, які мають тягові електродвигуни;
- зростання температури нагріву обмоток тягових електродвигунів;
- збільшення ваги локомотива через застосування спеціальних гальмівних реостатів;
- ускладнення системи управління роботою силового обладнання електрорухомого складу.

Електродинамічне гальмування локомотивів і електрорухомого складу є допоміжним гальмом. Воно застосовується поряд з колісно-колодковими та іншими системами гальмування.

На тепловозах (ТЭМ2, 2ТЭ116, ТЭП70 і ін.), обладнаних електродинамічним гальмом, застосовують системи незалежного збудження ТЕД під час їхньої роботи в генераторному режимі. Живлення обмоток збудження двигунів під час електродинамічного гальмування здійснюється від тягового генератора тепловоза. Гальмівну силу регулюють шляхом зміни напруги (тягового генератора) на обмотці збудження ТЕД і відповідно величини магнітного потоку двигунів. За постійною



частотою обертання колінчастого вала дизеля напруга тягового генератора регулюється струмом обмотки збудження самого генератора. На маневрових тепловозах ТЭМ2 і ЧМЭЗ, обладнаних електричним гальмом, гальмівну силу регулюють змінюючи загальний опір  $R_r$  гальмівних резисторів (рис. 5.3).

Рівняння електричної рівноваги при реостатному гальмуванні

Рис. 5.3. Принципова схема реостатного гальмування у разі незалежного збудження ТЭД тепловоза

$$cv\Phi = \left(\sum r_{\text{я}} + R_r\right) I_{\text{тед}}, \quad (5.24)$$

де  $c$  – електрична стала, що відображає конструкційні параметри двигуна;

- $v$  – швидкість руху локомотива, км/год;
- $\Phi$  – магнітний потік в обмотках збудження ТЭД, Вб;
- $\sum r_{\text{я}}$  – опір обмоток якорів тягових електродвигунів, Ом;
- $R_r$  – опір гальмівного резистора, Ом;
- $I_{\text{тед}}$  – сила струму в колі якоря ТЭД, А.

Швидкість руху локомотива під час електричного реостатного гальмування, км/год,

$$v = \frac{\left(\sum r_{\text{я}} + R_r\right) I_{\text{тед}}}{c\Phi}. \quad (5.25)$$

Гальмівна сила  $B_r$ , кН, створювана електродвигунами в режимі генератора під час взаємодії коліс з рейками,

$$B_r = n_{\text{тед}} (3,6c\Phi I_{\text{тед}} + \Delta B), \quad (5.26)$$

де  $n_{\text{тед}}$  – число тягових електродвигунів;

$\Delta B$  – механічні та магнітні втрати в електричній передачі, кН.

$$\Delta B = \frac{3,6(\Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{тп}})}{v}, \quad (5.27)$$

де  $\Delta P_{\text{мех}}$  – механічні втрати потужності в тягових електричних машинах локомотива, кВт;

$\Delta P_{\text{магн}}$  – втрати в магнітній системі тягових електродвигунів, кВт;

$\Delta P_{\text{тп}}$  – втрати потужності в тяговому приводі колісних пар локомотива, кВт;

$v$  – швидкість руху локомотива в режимі гальмування, км/год.

Реостатне гальмування у разі послідовного збудження тягових електродвигунів широко використовується на електрорухомому складі постійного струму (рис. 5.4, а). Під час гальмування тягові електродвигуни відключаються від контактної мережі та замикаються на гальмівні резистори  $R_r$ . Перехід тягових електродвигунів електровоза в генераторний режим відбувається завдяки збереженому в них магнітному потоку (залишковому магнетизму). Під час реостатного гальмування електрорухомого складу із самозбудженням тягові електродвигуни перемикають кінці або обмоток якорів Я та ЯЯ (рис. 5.4, б), або обмоток збудження К та КК (рис. 5.4, в).

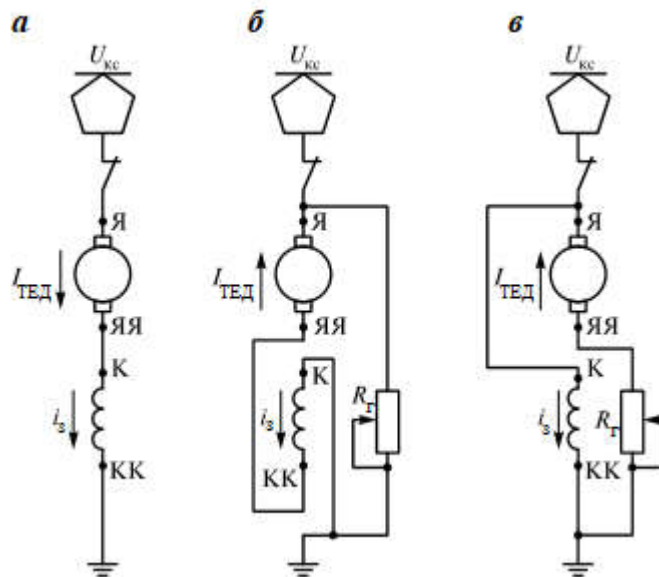


Рис. 5.4. Принципові схеми з'єднань кінців обмоток якорів Я-ЯЯ і обмоток збудження К-КК двигунів електровоза у режимі роботи:

а – тяговому; б, в – реостатного гальмування у разі самозбудження ТЕД

Перевага такого гальмування – відносна простота устрою та незалежність від роботи контактної мережі. До недоліків слід віднести помітну затримку ефективного гальмування, тому що в початковий період роботи (1...2 с) залишковий магнетизм в магнітній системі електродвигуна невеликий. На рис. 5.5 наведені струмові характеристики реостатного гальмування з самозбудженням ТЕД за різних опорів гальмівного реостата  $R_r$ . Змінюючи опір реостата, регулюють силу струму ТЕД і відповідно гальмівну силу  $B_r$ . Штрихованими лініями показані обмеження гальмівної сили: 1 – по силі зчеплення коліс з рейками; 2 – по максимальній силі струму ТЕД; 3 – по допустимій напрузі ТЕД; 4 – по максимальній швидкості руху.

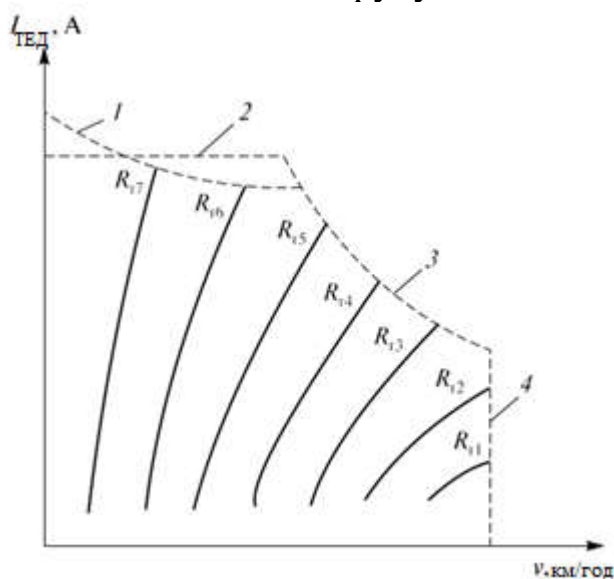


Рис. 5.5. Струмові характеристики реостатного гальмування

Залежність гальмівної сили  $B_r$  від сили струму  $I_{\text{тед}}$  приведена на рис. 5.6. На цьому ж рисунку показана характеристика зміни електромагнітної сили  $f_{\text{тед}}$ , яка в залежності від напрямку струму забезпечує створення або гальмівного моменту, або сили тяги під час взаємодії колісних пар з рейками. Різниця між характеристиками  $B_r = f(I_{\text{тед}})$  і  $f_{\text{тед}} = f(I_{\text{тед}})$  складають механічні та магнітні втрати  $\Delta B$  в електричній передачі локомотива.

Слід зазначити, що на локомотиві не допускається одночасне застосування електричного та пневматичного гальмування через велику ймовірність заклинювання колісних пар і виникнення юза.

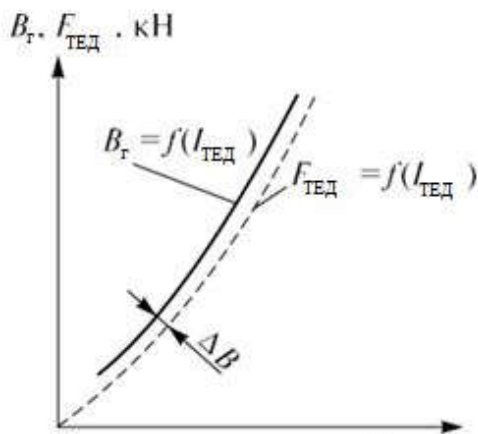


Рис. 5.6. Залежності гальмівної сили  $B_r$  і електромагнітної сили  $F_{ТЕД}$  двигунів електровоза від сили струму  $I_{ТЕД}$

**Електромагнітні гальма.** Гальмівний ефект досягається завдяки силі електромагнітного тяжіння до рейок спеціальних сталевих гальмових башмаків (рис. 5.7), підвішених на пружинах до бічних балок рами візка локомотива. Гальмівні башмаки мають напрямні, що забезпечують їх вертикальне переміщення відносно боковин рами візка. Під час живлення струмом обмоток збудження башмаків від акумуляторної батареї створюється магнітний потік, що охоплює сердечник гальмівного башмака та рейки. При цьому башмаки притягуються до рейок і виникає гальмівна сила, яка не обмежена зчепленням коліс з рейками.

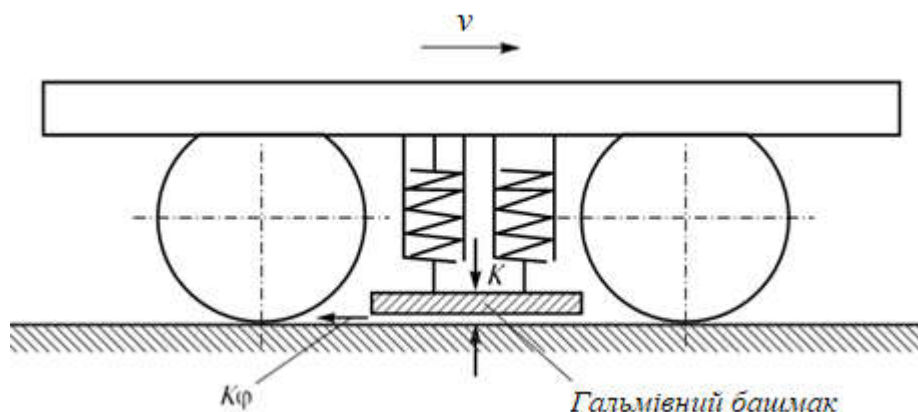


Рис. 5.7. Схема рейкового гальма

У швидкісному поїзді, крім електромагнітного гальма, додатково є кілька систем гальмування, які в поєднанні з електромагнітним гальмом забезпечують найбільшу ефективність гальмування в певному діапазоні швидкостей руху. Наприклад, швидкісний електропоїзд ЕР200 був обладнаний: колісно-колодковим пневматичним гальмом; електричним реостатним гальмом зі самозбудженням; електропневматичним колісно-колодковим гальмом; дисковим гальмом; магнітно-рейковим гальмом; ручним гальмом для утримання поїзда на місці. Для керування швидкістю руху поїзда контролер машиніста додатково мав



чотири гальмівних положення, які забезпечували безпечне поєднання різних систем гальмування.

На рис. 5.8 представлені дослідні залежності гальмівного шляху  $S_r$  від початкової швидкості руху  $v$  електропоїзда EP200 одиночними гальмами і в поєднанні з різними системами гальмування: 1 – електромагнітні рейкові гальма; 2 – дискові гальма; 3 – спільна дія дискового та електромагнітного рейкового гальмівних систем.

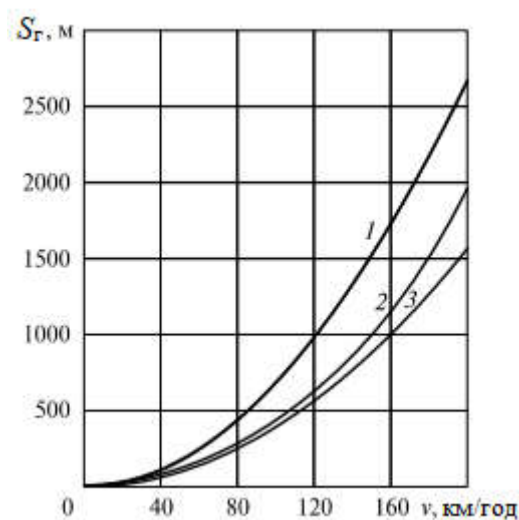


Рис. 5.8. Залежність гальмівного шляху від швидкості руху та системи гальмування електропоїзда EP200

Аналіз представлених залежностей переконливо доводить високу ефективність застосування комбінованих гальм в швидкісному русі поїздів.

### Питання для самоконтролю

1. Які гальмівні системи застосовуються на залізничному транспорті?
2. Які режими гальмування застосовують під час ведення поїзда?
3. Які параметри визначаються гальмівними розрахунками?
4. Що таке гальмівна сила поїзда та як вона визначається?
5. Що таке дійсний гальмівний коефіцієнт?
6. Що таке дійсний коефіцієнт тертя?
7. З якою метою переходять на розрахункову силу натиснення колодок на колесо?

8. Як визначити шлях і час гальмування поїзда?
9. Що означає електричне гальмування та де воно застосовується?
10. У чому суть електродинамічного гальмування та де воно застосовується?
11. Назвіть переваги та недоліки електродинамічного гальмування.
12. У чому суть електромагнітного гальмування?
13. Які гальмівні системи застосовуються для високошвидкісного рухомого складу?

## Рівняння руху поїзда

### 6.1. Виведення рівняння руху поїзда

Рух поїзда розглядається як рух маси, сконцентрованої в одній точці – центрі ваги, для якої застосуємо другий закон Ньютона: модуль сили, що діє на матеріальну точку, дорівнює добутку маси точки на модуль її прискорення, а напрямок сили збігається з напрямком прискорення.

Позначивши масу поїзда через  $M$ , т, його прискорення  $a$ , км/год<sup>2</sup>, і силу, що діє на поїзд, через  $F_{\text{п}}$ , Н, отримаємо

$$a = k \frac{F_{\text{п}}}{M}, \quad (6.1)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності;

$F_{\text{п}} = (F_{\text{д}} \pm W_{\text{д}})$  – прискорююча сила в режимі тяги;  $F_{\text{п}} = \pm W_{\text{д}}$  в режимі вибігу;  $F_{\text{п}} = (\pm W_{\text{д}} - B_{\text{г}})$  в режимі гальмування, Н;

$F_{\text{д}}$  – дотична сила тяги на ободі рушійних коліс локомотива, Н;

$B_{\text{г}}$  – гальмівна сила поїзда, Н;

$W_{\text{д}}$  – сумарна сила основного та додаткових опорів руху, Н;

$M = \frac{(Q+P)}{g} = M_Q + M_P$  – маса поїзда, т;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2 = \frac{9,81 \cdot 60^2 \cdot 60^2}{1000} \text{ км/год}^2 \approx 127000 \text{ км/год}^2$  – прискорення сили тяжіння;

$$a = \frac{dv}{dt} \quad - \text{ прискорення поїзда, км/год}^2.$$

Під час поступального руху колісні пари, якорі тягових двигунів локомотива, колісні пари вагонів, що складають частину маси поїзда, здійснюють обертальні рухи й тим самим накопичують кінетичну енергію. На обертальні рухи елементів поїзда витрачається частина рушійної сили локомотива. Накопичена кінетична енергія обертальних частин значно впливає на поступальний рух поїзда, особливо під час зміни швидкості руху: у разі прискорення руху вона перешкоджає збільшенню швидкості, а у разі уповільнення перешкоджає зменшенню швидкості.

Для виключення з розгляду обертових мас, *умовно* збільшують масу поїзда на  $(1 + \gamma)$ , де  $\gamma$  коефіцієнт (частка) обертових мас в загальній масі поїзда. В результаті виходить одне рухоме поступальне тіло масою

$$M = 1000(M_Q + M_P)(1 + \gamma),$$

де  $(1 + \gamma)$  – коефіцієнт приведеної маси поїзда (з урахуванням інерції обертових частин рухомого складу).

Розміри поїзда не мають значення для аналізу, тому поїзд, що знаходиться в русі, розглядається як матеріальна точка, в якій зосереджена його маса і до якої включені діючі сили

$$F_{\Pi} = (F_{\text{д}} \pm W_{\text{д}}) = \frac{dv}{dt} 1000(M_Q + M_P)(1 + \gamma).$$

Розділивши ліву і праву частини цього рівняння на вагу поїзда  $(P + Q)$  і помноживши в правій частині чисельник і знаменник на  $g$ , одержимо рівняння руху поїзда у вигляді:

$$\frac{F_{\Pi}}{P + Q} = \frac{F_{\text{д}} \pm W_{\text{д}}}{P + Q} = \frac{dv}{dt} \frac{(M_Q + M_P)g \cdot 1000(1 + \gamma)}{g(P + Q)} =$$

$$= \frac{dv}{dt} \frac{1000(1+\gamma)}{127000} = \frac{dv}{dt} \frac{1+\gamma}{127},$$

де  $\frac{F_{\text{п}}}{P+Q} = \frac{F_{\text{д}} \pm W_{\text{д}}}{P+Q} = f_{\text{п}} = f_{\text{д}} \pm \omega_{\text{д}}$  – питомі поздовжні сили поїзда,

Н/кН;

$$\frac{1+\gamma}{127} = \frac{1}{\zeta}$$

– наведена з урахуванням частин, що

обертаються, питома маса поїзда,  
Н·год<sup>2</sup>/кН·км.

В остаточній формі рівняння руху поїзда (в режимі тяги) записується у вигляді:

$$f_{\text{п}} = f_{\text{д}} \pm \omega_{\text{д}} = \frac{dv}{dt} \cdot \frac{1}{\zeta}, \text{ Н, або } \frac{dv}{dt} = \zeta(f_{\text{д}} \pm \omega_{\text{д}}) = \zeta f_{\text{п}}, \text{ км/год}^2, \quad (6.2)$$

де  $\zeta$  – («дзета») прискорення поїзда в км/год<sup>2</sup> у разі дії питомої прискорюючої сили, рівної 1 Н/кН – (одичне прискорення поїзда).

Рівняння руху поїзда в режимі вибігу (локомотив в режимі холостого ходу)

$$\frac{dv}{dt} = \zeta(\pm\omega_{\text{д}}). \quad (6.3)$$

Для режиму службового гальмування

$$\frac{dv}{dt} = -\zeta(0,5b_{\text{г}} \pm \omega_{\text{д}}), \quad (6.4)$$

де  $b_{\text{г}}$  – питома гальмівна сила у разі екстреного гальмування, Н/кН;

$0,5b_{\text{г}}$  – питома гальмівна сила у разі службового гальмування вантажного поїзда, Н/кН. У разі повного службового гальмування величина питомої гальмівної сили становить  $0,8b_{\text{г}}$ .

Значення коефіцієнтів приведеної маси  $(1 + \gamma)$  різні для різних видів

рухомого складу (табл. 6.1). Вони також залежать від маси рухомого складу. Так, для навантажених вагонів коефіцієнт  $(1 + \gamma)$  менше в порівнянні з коефіцієнтом для порожніх вагонів через менший вплив одних і тих же частин, що обертаються (колісних пар) на загальну масу вагона. Для локомотивів коефіцієнт приведеної маси значно більше, ніж для вагонів, тому що до колісних пар локомотива додається інерція якорів тягових двигунів і зубчастих коліс осьових редукторів.

Таблиця 6.1

**Значення коефіцієнтів  $(1 + \gamma)$  і  $\zeta$  для деяких видів рухомого складу**

Вид рухомого складу	$(1 + \gamma)$	$\zeta, \frac{\text{км/год}^2}{\text{Н/кН}}$
Тепловози	1,07...1,13	112...118
Дизель-поїзди	1,09...1,10	115...116
Електровози (всіх серій)	1,15...1,30	97...110
Електровоз ВЛ80 <sup>к</sup> ( $\mu=4,19$ )*	1,275	99,6
Електровоз ВЛ10, ВЛ60 <sup>к</sup> ( $\mu=4,19$ )*	1,265	100,4
Електропоїзд	1,06...1,07	118...120
Пасажи́рські вагони	1,04...1,05	121...122
Вантажні вагони:		
– завантажені	1,03...1,4	1,07...1,08
– порожні	122...123	117...119

*Примітка.\** $\mu$  – передавальне число осьових редукторів електровозів

Коефіцієнт  $\gamma$  для поїзда, що складається з вагонів і локомотивів різного типу, визначають як середньозважену величину за формулою:

$$\gamma = \frac{m_1\gamma_1 + m_2\gamma_2 + \dots + m_n\gamma_n + M_P\gamma_L}{M_Q + M_P}, \quad (6.5)$$

де  $m_1, m_2, \dots, m_n$  – маси окремих вагонів складу в тонах, що мають відповідно коефіцієнти  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ ;

$M_P$  – маса локомотива в тонах, що має коефіцієнт  $\gamma_{\text{лок}} = \gamma_L$ ;

$M_Q$  – маса состава, т.

Коефіцієнт  $\gamma_{\text{лок}}$ , що враховує інерційні властивості локомотивів різних серій в режимі холостого ходу, наведено в табл. 6.2.

Значення коефіцієнта  $\gamma_{\text{лок}}$  для локомотивів

Серія локомотива	ТЭ10, 2ТЭ116	ТЭП60	ТЭП70	ТЭМ 1	ТЭМ 2	ЧМЭ2	ВЛ10	ВЛ60
$\gamma_{\text{лок}}$	0,17	0,14	0,14	0,13	0,13	0,14	0,19	0,19
Серія локомотива	ЧС1	ЧС2	ЧС3	Тип локомотива	Пасажирський тепловоз	Вантажний тепловоз	Пасажирський електровоз	Вантажний електровоз
$\gamma_{\text{лок}}$	0,11	0,17	0,1	$\gamma_{\text{лок}}$	0,09...0,11	0,13...0,21	0,08...0,16	0,2...0,4

Коефіцієнт  $\gamma_{\text{поїзд}}$  визначається за емпіричною формулою:

$$\gamma_{\text{поїзд}} = \frac{25\gamma_{\text{лок}}P + 21Q \left( \frac{\alpha_2}{q_2} + \frac{2\alpha_4}{q_4} + \frac{3\alpha_6}{q_6} + \frac{4\alpha_8}{q_8} \right)}{25(P + Q)}, \quad (6.6)$$

де  $\gamma_{\text{лок}}$  – коефіцієнт, що враховує інерційні властивості обертючих частин локомотива;

$\alpha_2, \alpha_4, \alpha_6, \alpha_8$  – частка дво-, чотири-, шестивісних і восьмивісних вагонів у вазі складу відповідно;

$q_2, q_4, q_6, q_8$  – вага дво-, чотири-, шестивісних і восьмивісних вагонів відповідно, кН.

Для різних вантажних і пасажирських поїздів коефіцієнт  $\gamma$  виявляється близьким до 0,06; тоді коефіцієнт

$$\zeta = \frac{127}{1,06} \cong 120 \frac{\text{км/Год}^2}{\text{Н/кН}}.$$

Ці значення коефіцієнтів  $\gamma$  і  $\zeta$  приймаються в розрахунках для всіх вантажних і пасажирських поїздів. Для електропоїздів і дизель-поїздів, а також у разі руху локомотивів резервом значення  $\zeta$  вибирають з табл. 6.1 і 6.2.

Залежно від вибору зручної одиниці вимірювання прискорення можна отримати три форми рівняння руху поїзда:

– форма I, в км/год·год

– в режимі тяги

$$\frac{dv}{dt} = 120(f_d \pm \omega_d);$$

– в режимі вибігу

$$\frac{dv}{dt} = 120(\pm\omega_d);$$

– в режимі гальмування

$$\frac{dv}{dt} = -120(b_r \pm \omega_d); \quad (6.7)$$

– форма II, в км/год·хв

– в режимі тяги

$$\frac{dv}{dt} = 2(f_d \pm \omega_d);$$

– в режимі вибігу

$$\frac{dv}{dt} = 2(\pm\omega_d);$$

– в режимі гальмування



$$\frac{dv}{dt} = -2(b_r \pm \omega_d); \quad (6.8)$$

– форма III, в км/год·с  
– в режимі тяги

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{30}(f_d \pm \omega_d);$$

– в режимі вибігу

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{30}(\pm \omega_d);$$

– в режимі гальмування

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{30}(b_r \pm \omega_d); \quad (6.9)$$

Третя форма (III) рівнянь (вираз (6.9)) зручна для аналізу коротких, швидкоплинних процесів зміни швидкості (км/год в 1 с) руху поїзда, наприклад у разі екстреного гальмування.

У практиці тягових розрахунків частіше використовується друга форма (II) рівнянь руху (вираз (6.8)), в якій одиницею часу зміни швидкості руху км/год служить 1 хв.

Перша форма (I) рівнянь (вираз (6.7)) через одиниці виміру прискорення та швидкості (км/год в 1 год) в розрахунках застосовується значно рідше.

Відповідно до ПТР інтервали швидкостей  $\Delta v$  не повинні перевищувати:

– в режимі тяги (за швидкості від  $v_1$  до виходу на ходову характеристику за  $v_2$ )  $\Delta v$  повинен бути не більше 10 км/год; у пазі роботи на ходових характеристиках інтервал швидкості повинен бути  $\Delta v = 5$  км/год;

– в режимі вибігу інтервал приймають рівним  $\Delta v = 10$  км/год у всьому діапазоні швидкостей;

– в режимі гальмування від  $v_{п} = 50$  км/год до  $v_{к} = 0$  км/год приймають  $\Delta v = 5$  км/год, а в зоні більш високих швидкостей –

$\Delta v = 10$  км/год.

Питомі прискорюючі або сповільнюючі сили, що діють на поїзд за різних швидкостях і представлені у вигляді графіків  $F_{\pi}(v)$  у разі руху по прямолінійній горизонтальній колії *без урахування додаткових опорів руху*, називаються діаграмою *прискорюючих (уповільнюючих) сил*.

Нижче наведена приблизна послідовність виконання тягових розрахунків, а приклад розрахунку наведено в додатку А.

1. Аналіз профілю та плану колії розглянутої ділянки та підготовка її до тягових розрахунків.

2. Вибір або завдання типу/серії локомотива та його тягової характеристики.

3. Вказаний або обраний тип рухомого складу.

4. Визначення маси складу.

5. Перевірка та коригування маси поїзда:

– за довжиною приймально-відправних колій станцій заданої ділянки;

– по зрушенню поїзда з місця;

– по нагріванню тягових електродвигунів локомотива;

6. Для виконання тягових розрахунків графічним методом розрахунків і побудова діаграми (в масштабі) характеристик питомих сил, що діють на поїзд у різних режимах руху (тяги, вибігу, гальмуванні).

7. Визначення швидкості та часу руху поїзда в залежності від наведеного (спрямленого) профілю колії.

8. Перевірка на перегрів тягових електричних машин.

9. Визначення витрати електроенергії (для електрорухомого складу та електровоза) або палива тепловозом на рух поїзда.

Всі розрахунки виконуються з урахуванням повного використання потужності локомотива та кінетичної енергії поїзда.

Значення, що застосовуються в тягових розрахунках, рекомендується приймати з точністю:

– ухили – до 0,1 ‰ (тисячних);

– відстані для елементів профілю колії – до 1,0 м, а для перегонів – до 0,1 км;

– сили тяги, опору та гальмування – з округленням до 5 Н;

– питомі сили – з точністю до 0,01 Н/кН;

– швидкість – до 0,1 км/год;

– маса вантажного складу – з округленням до 50 т, пасажирського – до 25 т;

- перегінні часи ходу: розрахункові – з точністю 0,1 хв, для графіка руху – 1,0 хв, у приміській зоні – 0,25 хв;
- струм з округленням до 5 А;
- питома витрата електричної енергії – до 0,1 кВт·год/(т·км);
- питома витрата палива – до 0,1 кг/(т·км·10<sup>4</sup>);
- витрата електричної енергії – до 10 кВт·год;
- витрата палива – до 10 кг;
- температура у разі розрахунку нагрівання по окремих елементах до 0,01 °С, для кінцевих результатів – до 1,0 °С (в системі СІ температуру обчислюють в градусах Кельвіна).

## 6.2. Розрахунок прискорюючих сил в режимі тяги

Для розв'язання рівняння руху поїзда, необхідно знайти питомі прискорюючі та сповільнюючі сили, які визначаються з питомих сил тяги локомотива, питомих сил опору руху та питомих гальмівних сил у всьому діапазоні швидкостей руху. Обчислення виконуються для трьох режимів ведення поїзда: режиму тяги, режиму холостого ходу (вибігу) та режиму гальмування (службового та екстреного). Всі обчислення зводяться в таблицю аналогічною за формою табл. 6.3.

**Приклад 1.** Побудувати діаграму прискорюючих сил поїзда в режимі тяги, холостого ходу та режимах гальмування – службовому та екстреному. Маса складу  $M_Q = 4040$  т, локомотив поїзда – тепловоз 2ТЭ116 масою  $M_P = 274$  т; в складі: частка чотиривісних вагонів  $\alpha_4 = 0,75$  масою  $m_4 = 88$  т; частка шести осьових вагонів  $\alpha_6 = 0,10$  масою  $m_6 = 126$  т і частка восьми осьових вагонів  $\alpha_8 = 0,15$  масою  $m_8 = 168$  т. Вага складу  $Q = 39650$  кН; вага локомотива  $P = 2690$  кН.

*Рішення.* У перший та другий стовпець табл. 6.3 записуються значення швидкості та сили тяги для 15-й позиції контролера тепловоза 2ТЭ116 (див. ПТР с. 236, рис. 5.14). Тому що в ПТР сили тяги  $F_d$  вказані в кгс, то для перекладу сил в систему СІ значення сили тяги необхідно помножити на  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> і отримуємо силу тяги  $F_d$  в ньютоніях.

Таблиця 6.3

## Результати розрахунку прискорюючих сил в режимі тяги

$v$ , км/год	$F_d$ , Н	$\omega'_0$ , Н/кН	$W'_0$ , Н	$\omega''_{04}$ , Н/кН	$\omega''_{06}$ , Н/кН	$\omega''_{08}$ , Н/кН	$\omega''_0$ , Н/кН	$W''_0$ , Н	$W_0$ , Н	$F_d - W_0$ , Н	$f_d - \omega_0$ , Н/кН
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	797 553	2,03	5454	0,84	1,07	0,99	0,89	35 092	40 546	757 007	17,88
5	723 095	2,03	5454	0,87	1,10	1,00	0,91	36 041	41 495	681 600	16,10
10	667 276	2,03	5454	0,90	1,13	1,02	0,94	37 215	42 669	624 607	14,75
15	626 467	2,12	5700	0,93	1,17	1,04	0,97	38 614	44 314	582 153	13,75
19,5	596 448	2,21	5935	0,97	1,21	1,07	1,01	40 067	46 002	550 446	13,00
24,2	496 386	2,32	6239	1,02	1,25	1,10	1,05	41 779	48 018	448 368	10,59
30	408 783	2,47	6641	1,08	1,31	1,14	1,11	44 166	50 807	357 976	8,45
32	382 001	2,53	6798	1,11	1,34	1,15	1,14	45 060	51 858	330 143	7,80
40	311 762	2,78	7475	1,21	1,44	1,23	1,24	48 995	56 470	255 292	6,03
43,5	288 316	2,9	7799	1,26	1,49	1,26	1,28	50 898	58 697	229 619	5,42
46	270 069	2,99	8050	1,30	1,53	1,29	1,32	52 325	60 375	209 694	4,95
50	249 861	3,15	8467	1,36	1,59	1,34	1,38	54 726	63 193	186 668	4,41
58,5	215 035	3,51	9439	1,51	1,74	1,45	1,52	60 306	69 745	145 290	3,43
70	179 915	4,07	10 940	1,73	1,96	1,62	1,74	68 894	79 834	100 081	2,36
80	157 941	4,62	12418	1,95	2,18	1,79	1,95	77 331	89 749	68 192	1,61
90	140 675	5,23	14 058	2,19	2,43	1,98	2,19	86 670	100 728	39 947	0,94
100	126 549	5,9	15 859	2,46	2,69	2,20	2,44	96 911	112 770	13 779	0,33

Для тих значень швидкості, за яких можлива робота на двох режимах роботи тягових електродвигунів, приймається середнє значення сили тяги. Наприклад, на 15-й позиції контролера машиніста за швидкості руху 40 км/год можлива робота тягових електродвигунів в системі збудження ПП або ОП1. При ПП сила тяги  $F_d = 313920$  Н, а на ОП1  $F_d = 309604$  Н. У таблицю слід записати середню величину  $F_d = 311762$  Н.

Нижче наведено порядок заповнення табл. 6.3.

У перші два стовпці записують параметри тягової характеристики локомотива з ПТР. Крок зміни швидкості не повинен перевищувати 10 км/год. Крім того, в таблицю необхідно внести значення, відповідні характерним точкам тягової характеристики. Такими точками є:

- швидкість переходу від обмеження по зчепленню (або по струму) на автоматичну характеристику;
- розрахункова швидкість;
- швидкості переходу режиму роботи тягових електродвигунів.

У третій і четвертий стовпці вписують значення питомого і повного основного опорів руху локомотива в режимі тяги. Питомий основний опір руху локомотива обчислюють за емпіричними формулами, наведеними в табл. 4.1.

Повний основний опір руху локомотива визначається за формулою:

$$W'_0 = \omega'_0 P. \quad (6.10)$$

Для обчислення питомого основного опору руху складу попередньо розраховують питомий основний опір руху кожної з вхідних до состава груп вагонів. Обчислення виконують за формулами, наведеними в табл. 4.1.

Якщо склад містить вагони різних типів, то питомий основний опір руху вагонів складу визначають як середньозважений

$$\omega''_0 = \alpha_4 \omega''_{04} + \alpha_6 \omega''_{06} + \alpha_8 \omega''_{08}, \quad (6.11)$$

де  $\alpha_4, \alpha_6, \alpha_8$  – відповідно частка чотири-, шести- та восьмивісних вагонів в загальній вазі состава.

Вагони, з яких сформовано состав поїзда, можна розділити на групи не тільки за кількістю осей у вагоні, а й за іншими ознаками, наприклад

за осьовому навантаженні. Тоді число доданків у формулі (6.11) збільшиться, але завжди при цьому  $\sum \alpha_i = 1$  (тут  $i$  – номер групи однотипних вагонів). Вагу, що припадає на вісь, для кожного типу вагонів приймають як середню величину. Наприклад, для чотиривісних вагонів

$$q_{04} = \frac{Q_4}{4n_4}, \quad (6.12)$$

де  $Q_4$  – сумарна вага всіх чотиривісних вагонів у складі, кН;  
 $4n_4$  – загальна кількість осей всіх чотиривісних вагонів ( $n_4$ ), що входять до состава.

Результати розрахунків питомого основного опору руху вагонів складу наведені в 5, 6, 7, 8-у стовпцях табл. 6.3. Повний основний опір руху вагонів складу визначають за формулою:

$$W_0'' = \omega_0'' Q, \quad (6.13)$$

і вписують в дев'ятий стовпчик табл. 6.3.

Десятий стовпець заповнюють обчисленнями суми повних основних опорів руху локомотива і вагонів для кожної швидкості

$$W_0 = W_0' + W_0''.$$

Одинадцятий стовпець заповнюють обчисленнями повної прискорюючої сили

$$F_{\Pi} = F_{\Delta} - W_0.$$

У 12-й стовпець (див. табл. 6.3) записують значення питомої прискорюючої сили поїзда в режимі тяги на максимальній позиції контролера машиніста

$$f_{\Pi} = f_{\Delta} - \omega_0 = \frac{F_{\Delta} - W_0}{P + Q}.$$

### 6.3. Розрахунок прискорюють сил, що діють на поїзд в режимі холостого ходу

Продовжимо проводити розрахунки в табличній формі.

Режим холостого ходу (вибігу). У 13-му стовпці (табл. 6.4) поміщаємо значення питомої основного опору руху локомотива на холостому ході, що обчислюється за формулами, наведеними в табл. 4.1.

У 14-му стовпці табл. 6.4 записуються значення повного основного опору руху локомотива на вибігу

$$W'_x = \omega'_x P.$$

У 15-му стовпці значення повного основного опору руху поїзда на холостому ході визначається сумою основного опору руху локомотива та состава

$$W_{0x} = W'_x + W''_0.$$

У 16-му стовпці обчислюється значення питомої основного опору руху поїзда на вибігу за формулою:

$$\omega_{0x} = \frac{W_{0x}}{P + Q}. \quad (6.14)$$

Перш ніж перейти до розрахунку та заповнення стовпців 17–20 табл. 6.4, відповідних режиму гальмування, визначають значення розрахункового гальмівного коефіцієнта

$$\vartheta_p = \frac{\sum K_p}{P + Q}. \quad (6.15)$$

Сумарне розрахункове натиснення гальмівних колодок обчислюють за кількістю вагонів кожного виду ( $n_4, n_6, n_8$ ), що входять до состава поїзда, числу осей локомотива заданої серії та розрахунковому гальмівному натисканню колодок на одну вісь для кожного виду вагонів і локомотива за формулою (5.18):

$$\sum K_p = n_l K_{pl} + 4n_4 K_{p4} + 6n_6 K_{p6} + 8n_8 K_{p8}.$$

**Результати розрахунку прискорюючих сил в режимах холостого ходу та гальмування**

Режим холостого ходу					Режим гальмування			
$v$ , км/год	$\omega'_x$ , Н/кН	$W'_x$ , Н	$W_x + W''$ , Н	$\omega_{0x}$ , Н/кН	$\varphi_{кр}$	$b_\Gamma$ , Н/кН	$b_\Gamma + \omega_{0x}$ , Н/кН	$b_\Gamma + 0,5\omega_{0x}$ , Н/кН
1	13	14	15	16	17	18	19	20
0	2,4	6451,20	41544	0,98	0,270	89,1	90,08	45,53
5	2,46	6612,48	42653	1,01	0,227	74,84	75,85	38,43
10	2,55	6854,40	44069	1,04	0,198	65,34	66,38	33,71
15	2,64	7096,32	45711	1,08	0,177	58,55	59,63	30,36
19,5	2,75	7392,00	47459	1,12	0,163	53,91	55,03	28,08
24,2	2,87	7714,56	49493	1,17	0,152	50,07	51,24	26,21
30	3,05	8198,40	52364	1,24	0,140	46,33	47,57	24,40
32	3,11	8359,68	53419	1,26	0,137	45,24	46,50	23,88
40	3,4	9139,20	58134	1,37	0,126	41,58	42,95	22,16
43,5	3,54	9515,52	60413	1,43	0,122	40,27	41,70	21,56
46	3,65	9811,20	62136	1,47	0,119	39,42	40,89	21,18
50	3,83	10295,04	65021	1,54	0,116	38,19	39,72	20,63
58,5	4,24	11397,12	71703	1,69	0,109	35,98	37,67	19,68
70	4,89	13144,32	82038	1,94	0,102	33,66	35,60	18,77
80	5,52	14837,76	92168	2,18	0,097	32,08	34,25	18,21
90	6,23	16746,24	103416	2,44	0,093	30,78	33,22	17,83
100	7	18816,00	115727	2,73	0,090	29,70	32,43	17,58

В реальних умовах без регулювання гальмівного натискання гальмівних колодок складно використувувати максимальне зчеплення коліс з рейками в процесі гальмування, тому що коефіцієнти тертя ковзання та ковзання взаємодіючих контактів залежать в основному від швидкості руху, навантаження на колесо та сили натискання гальмівних колодок. Тому на рухомому складі прагнуть встановити відповідні регулятори: швидкісні, авторежимні та протитюзні. На вантажному рухомому складі впроваджують авторежими (№ 265), що коригують тиск в гальмівних циліндрах під час гальмування в залежності від завантаження вагона. На швидкісному пасажирському рухомому складі застосовують авторежими, швидкісні регулятори та протитюзні пристрої з метою найкращого використання сил зчеплення коліс з рейками в залежності від завантаження вагонів і швидкості руху в процесі гальмування. У розрахунках гальмівних завдань перераховані вдосконалення гальмівних засобів рухомого складу враховуються тільки в рішеннях експертного аналізу конкретного рухомого складу.



В тягових розрахунках значення розрахункового натиснення на одну гальмівну вісь для окремих груп вагонів приймають по табл. 5.4 (див. р. 5) і 6.5, а для локомотивів по табл. 6.6.

Таблиця 6.5

**Розрахункові сили натиснення композиційних гальмівних колодок вагонів**

Тип вагона	Розрахункове натиснення гальмівних колодок, кН/вісь
Пасажирські вагони з масою тари:	
– 53 т і більше	45
– 48 т і більше, але менше 53 т	40
– 42 т і більше, але менше 48 т	35
Вантажні вагони в режимі:	
– навантаженому	42,5
– середньому	30
– порожньому	17,5
Рефрижераторні вагони-холодильники:	
– з передавальним числом важільної передачі 5,3 в режимі:	
– навантаженому	45
– середньому	35
– порожньому	20
– з передавальним числом важільної передачі 10 в режимі:	
– середньому	47,5
– порожньому	30

Таблиця 6.6

**Розрахункові сили натиснення чавунних гальмівних колодок локомотивів, дизель- і електропоїздів**

Серія локомотивів	Розрахункове натиснення гальмівних колодок, кН/вісь	
	вантажний режим	порожній режим
1	2	3
<b>Тепловози</b>		
ТЭП60, 2ТЭП60, 2ТЭ10В(М,У), 3ТЭ10М,	120	50
4ТЭ10С, 2ТЭ116, ТЭП70, 2М62, 2М62У, 3М62У	130	55
ТЭМ7, ТЭМ7А		

Закінчення табл. 6.6

1	2	3
ЧМЭЗ, ЧМЭЗТ, ЧМЭЗЭ, ТЭМ2УМ, ТЭМ2У, ТЭМ16, ТЭМ17, ТЭМ18, ТЭМ2А	110	50
ТГ21, ТГ22	140	50
ТГМЗА	80	40
Інші серії тепловозів	100	50
<i><b>Електровози</b></i>		
ЧС1, ЧС3	140	
ЧС2, ЧС2Т, ЧС4, ЧС4Т, ЧС6, ЧС7, ЧС8, ЧС200:		
– на швидкісному режимі	160	–
– на швидкості не менше 60км/год, та пасажирський режим	120	–
ВЛ80, ВЛ80К, ВЛ80Т, ВЛ80С, ВЛ80П, ВЛ80Р, ВЛ82, ВЛ82М	140	60
ВЛ85, ВЛ10, ВЛ10У, ВЛ11, ВЛ11М, ВЛ15, ВЛ65, Э13	110	50
ВЛ60 всіх індексів	180	–
ЭП1		
– на швидкості не менше 55км/год	140	–
– пасажирський режим	100	50
Інші серії електровозів	120	–
<i><b>Дизель-поїзди</b></i>		
Серії Д, моторний вагон	90	–
Серії Д, причіпний вагон	100	–
Серії ДР1, Д1, ДР1П, ДР1А, моторний вагон	80	–
Серії ДР1, Д1, ДР1П, ДР1А, причіпний вагон	150	–
Серії ДЛ2, тягова секція	90	–
Серії ДЛ2, причіпний вагон	90	–
<i><b>Електропоїзди</b></i>		
Моторні вагони (крім ЕД9Т)	100	–
Моторні вагони ЕД9Т	120	
Причіпні та головні вагони	90	
Моторний та головний вагони ЕР200	150	

У разі чавунних гальмівних колодках гальма вантажних вагонів включаються на порожній режим, якщо корисне завантаження на одну вісь не перевищує 30 кН, на середній режим, якщо корисна завантаження на одну вісь не перевищує 60 кН, на вантажний режим включаються у разі корисного завантаження понад 60 кН.

Гальма рефрижераторних вагонів, обладнані чавунними колодками, включаються на середній режим у разі корисного завантаження до 30 кН/вісь, а на вантажний режим – у разі більшого корисного завантаження.

#### 6.4. Розрахунок уповільнюючих сил, що діють на поїзд

У 17-му стовпці табл. 6.4 записуються значення розрахункового коефіцієнта тертя стандартної чавунної колодки  $\varphi_{кр}$ , які розраховують для значень швидкості, наведених в першому стовпці за такою формулою:

$$\varphi_{кр} = 0,27 \cdot \frac{v + 100}{5v + 100}. \quad (6.16)$$

Якщо в поїзді застосовані гальмівні колодки з інших матеріалів, то розрахунковий коефіцієнт тертя повинен визначатися за такими формулами:

– для чавунних колодок з підвищеним вмістом фосфору

$$\varphi_{кр} = 0,27 \cdot \frac{v + 100}{5v + 100}. \quad (6.17)$$

– для чавунних колодок з високофосфористого чавуну (3%)

$$\varphi_{кр} = 0,675 \cdot \frac{v + 100}{5v + 100}; \quad (6.18)$$

– для композиційних колодок з матеріалу 8-1-66

$$\varphi_{кр} = 0,36 \cdot \frac{v + 150}{2v + 150}; \quad (6.19)$$

– для композиційних колодок з матеріалу 328-303

$$\varphi_{кр} = 0,36 \cdot \frac{v+150}{2,6v+150}. \quad (6.20)$$

У 18-му стовпці табл. 6.4 записують значення питомої гальмівної сили, обчислені за формулою:

$$b_r = 1000 \vartheta_p \varphi_{кр}. \quad (6.21)$$

У 19-му стовпці табл. 6.4 записують значення питомих рівнодіючих ( $f_{п}$ ) сил, прикладених до поїзда в режимі екстреного гальмування для вантажних поїздів  $f_{п} = -(b_r + \omega_{ок})$ .

В 20-м стовпці табл. 6.4 записують значення питомих рівнодіючих сил, прикладених до поїзда в режимі службового гальмування для вантажних поїздів  $f_{п} = -(0,5b_r + \omega_{ок})$ , а для пасажирських поїздів рівнодіюча у разі службового гальмування визначається за формулою:

$$f_{п} = -(0,6b_r + \omega_{ок}). \quad (6.22)$$

За результатами обчислень, наведеними в табл. 6.3 і 6.4, будують діаграму прискорюючих і уповільнюючих сил, що діють на поїзд (рис. 6.1).

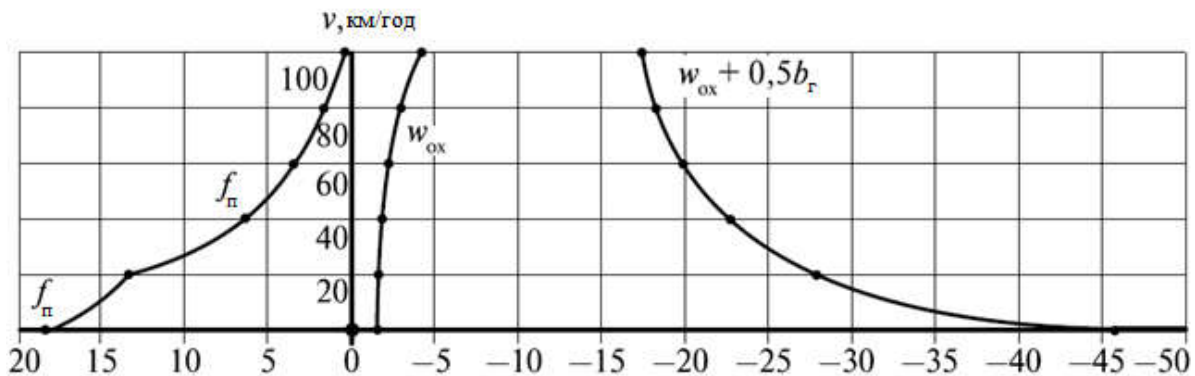


Рис. 6.1. Діаграма питомих прискорюючих і уповільнюючих сил поїзда масою 4040 т з тепловозом 2ТЭ116

### Побудова діаграми прискорюючих і уповільнюючих сил

На планшеті (як правило) міліметрового паперу, в масштабі (табл. 6.7), будують криві прискорюючих сил у режимі:

- тяги – за даними 1-го і 12-го стовпців табл. 6.3;
- вибігу – за даними 1-го і 16-го стовпців табл. 6.4;
- службового гальмування – за даними 1-го і 20-го стовпців табл. 6.4;
- екстреного гальмування<sup>1</sup> (за необхідністю) – за даними 1-го і 19-го стовпців табл. 6.4;

На ординаті в масштабі відмічаються швидкості руху поїзда. По осі абсцис в масштабі наносять значення прискорюючих сил: зліва від ординати – додатні сили, а справа від ординати – від’ємні сили.

Отримана діаграма вірна тільки для вихідних даних, прийнятих в прикладі у разі її розрахунку та побудові. У разі зміни характеристик состава або у разі побудови діаграми для руху в режимі тяги на проміжних позиціях контролера машиніста необхідно виконати розрахунки для нових вихідних даних і побудувати іншу діаграму для нових отриманих розрахунком даних.

Для використання отриманої діаграми під час руху на елементах профілю колії з ухилами, відмінними від нуля, досить перенести початок координат вліво для підйомів або вправо для спусків на число одиниць, рівне ухилу в проміле, тому що  $1\text{ ‰} = 1\text{ Н/кН}$ .

Діаграма прискорюючих і сповільнюючих сил дозволяє аналізувати характер руху поїзда, для якого вона побудована. Знаючи, що швидкість руху поїзда завжди прагне до рівноважної, досить по ухилу профілю колії та режиму руху знайти значення рівноважної швидкості та порівняти його з поточним значенням швидкості руху.

## **6.5. Аналітичний метод розв’язання рівняння руху поїзда**

Аналітичний метод розв’язання рівняння руху поїзда умовно можна виконати двома способами.

**I-й спосіб.** Передбачається, що поїзд рухається з рівномірною ста-

---

<sup>1</sup> На рис. 6.1 крива уповільнювальних сил екстреного гальмування поїзда будується аналогічно кривій службового гальмування. На рис. 6.1 вона не показана.

лою швидкістю. Тоді з рівняння руху поїзда  $\frac{dv}{dt} = \zeta f_{\pi} = 0$  можна визначити:

а) вагу состава, який може вести локомотив певної серії за заданої рівномірної швидкості руху;

б) рівномірну швидкість, яку може розвинути локомотив даної серії за заданої маси поїзда за певним профілем колії;

в) гальмівну силу поїзда на певному спуску за рухом з рівномірною допустимою швидкістю під час гальмування.

**II-й спосіб.** Передбачається, що поїзд рухається з незмінною прискорюючою силою  $f_{\pi}$  у будь-якому інтервалі швидкостей. Це дозволяє визначити:

а) час руху поїзда на прийнятому інтервалі швидкостей за незмінної прискорюючої сили  $f_{\pi}$ ;

б) пройдений шлях поїздом на прийнятому інтервалі швидкостей за незмінної прискорюючої сили  $f_{\pi}$ .

Розглянемо 1-й спосіб вирішення рівняння руху поїзда.

Визначимо вагу состава, яку може вести даний тип локомотива по заданому зтяжному підйому  $i_p$  рівномірно з розрахунковою швидкістю  $v_p$ .

За умови рівномірності руху по зтяжному підйому –  $i_p$  повинна виконуватися рівність

$$F_{др} = W_d,$$

де опір руху поїзда за заданих умовах

$$W_d = (\omega'_0 + i_p)P + (\omega''_0 + i_p)Q.$$

Отже, отримуємо нову рівність

$$F_{др} = (\omega'_0 + i_p)P + (\omega''_0 + i_p)Q.$$

З отриманої рівності знаходимо шукану величину  $Q$

$$Q = \frac{F_{др} - (\omega'_0 + i_p)P}{\omega''_0 + i_p}.$$

Розглянемо II-й спосіб вирішення рівняння руху поїзда. Приймаємо незмінною прискорюючу силу  $f_{\text{п}}$  для  $v_{\text{ср}}$  в інтервалі  $\Delta v = v_2 - v_1$  швидкостей руху поїзда.

В результаті отримуємо рівноприскорений рух поїзда, для якого справедлива рівність

$$v_2 = v_1 + a\Delta t,$$

де  $v_2$  – швидкість поїзда в кінці відрізка часу  $\Delta t$ , км/год;  
 $v_1$  – швидкість поїзда у початковий час ( $t_1 = 0$ ), км/год;  
 $a$  – прискорення руху поїзда, км/год<sup>2</sup>;  
 $\Delta t = t_2 - t_1$  – відрізок часу, протягом якого визначається зміна швидкості поїзда, год.

Звідси визначається відрізок часу

$$\Delta t = \frac{v_2 - v_1}{a} = \frac{\Delta v}{a},$$

де  $\Delta v$  – збільшення швидкості за час  $\Delta t$ , км/год.

Якщо в цей вираз підставити значення  $a$  з формули рівняння руху

$$a = \mathcal{G}f_{\text{п}}$$

з урахуванням дії питомої прискорюючої сили в інтервалі швидкостей  $\Delta v$ , то отримаємо в годинах:

$$\Delta t = \frac{\Delta v}{\zeta f_{\text{ср}}}, \quad (6.24)$$

або в хвилинах

$$\Delta t = \frac{60\Delta v}{\zeta f_{\text{ср}}}.$$

З формули (6.24) визначаємо час, протягом якого швидкість поїзда

під час дії заданої питомої прискорюючої (уповільнюючої) сили зміниться в інтервалі  $\Delta v$ . За постійній питомій прискорюючій силі проміжок часу  $\Delta t$  пропорційний швидкості в межах  $\Delta v$ .

У разі постійної питомої прискорюючої сили  $f_{\text{пер}}$  визначаємо шлях  $\Delta S$ , який проходить поїзд під час зміни швидкості від  $v_1$  до  $v_2$ :

$$\Delta S = \frac{v_1 + v_2}{2} \Delta t = v_{\text{ср}} \Delta t \quad \text{або} \quad v_{\text{ср}} = \frac{\Delta S}{\Delta t}. \quad (6.25)$$

Значення  $\Delta t$  з виразу (6.24) підставимо в рівняння  $\Delta S$  і отримуємо

$$\Delta S = \frac{v_{\text{ср}} \Delta v}{\zeta f_{\text{пер}}}. \quad (6.26)$$

Тому що  $\Delta v = v_2 - v_1$ ,  $v_{\text{ср}} = \frac{v_1 + v_2}{2}$ , тоді рівняння (6.26) приймає вигляд (в км)

$$\Delta S = \frac{(v_2 + v_1)(v_2 - v_1)}{2\zeta f_{\text{пер}}} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2\zeta f_{\text{пер}}}.$$

Враховуючи, що 1 км = 1000 м, тоді (в м)

$$\Delta S = \frac{500(v_2^2 - v_1^2)}{\zeta f_{\text{пер}}}. \quad (6.27)$$

З отриманих формул можна знайти час і шлях руху поїзда в кожному інтервалі швидкостей. Загальна довжина шляху та час руху визначаються сумою значень часу та шляху, розрахованих для кожного інтервалу швидкостей за постійну питому прискорюючу силу. Використовуючи формули (6.24) і (6.27) для розрахунку часу  $\Delta t$  і шляху  $\Delta S$

руху вантажного або пасажирського поїздів, для яких  $\zeta = 120 \frac{\text{км/год}^2}{\text{Н/кН}}$ ,

отримаємо



$$\Delta t = \frac{\Delta v}{2f_{\text{пер}}} \Delta S, \quad \Delta S = \frac{4,17(v_2^2 - v_1^2)}{f_{\text{пер}}}. \quad (6.28)$$

Аналітичний метод широко використовують під час розрахунків на ЕОМ заздалегідь розробленими програмами.

**Приклад 2.** Визначити шлях, що проходить вантажний поїзд, питомі прискорюючі сили для якого наведені на рис. 6.1 і в табл. 6.4 у період розгону на станції за  $i = 0 \text{ ‰}$  від 0 до 30 км/год і необхідний для цього час.

*Рішення.*

1. Інтервали швидкості  $\Delta v$  приймаємо рівними 10 км/год.

1.1. У разі зміни швидкості в межах 0...10 км/год середнє значення питомої прискорюючої сили

$$f_{\text{пер1}} = \frac{(f_d - \omega_0)_{v=0} + (f_d - \omega_0)_{v=10}}{2} = \frac{17,88 + 14,75}{2} = 16,315 \text{ Н/кН.}$$

За формулами (6.27) отримаємо

$$\Delta t_1 = \frac{10}{2 \cdot 16,315} = 0,30 \text{ хв;}$$

$$\Delta S_1 = \frac{4,17 \cdot (10^2 - 0)}{16,315} = 25,6 \text{ м.}$$

1.2. У разі зміни швидкості від 10 до 19,5 км/год ( $\Delta v_2$ )

$$f_{\text{пер2}} = \frac{14,75 + 13,00}{2} = 13,875 \text{ Н/кН;}$$

$$\Delta t_2 = \frac{9,5}{2 \cdot 13,875} = 0,34 \text{ хв;}$$

$$\Delta S_2 = \frac{4,17 \cdot (19,5^2 - 10)}{13,875} = 84,2 \text{ м.}$$

1.3. У разі зміни швидкості від 19,5 до 24,2 км/год ( $\Delta v_3$ )

$$f_{\text{пер3}} = \frac{13,00 + 10,59}{2} = 11,795 \text{ Н/кН;}$$

$$\Delta t_3 = \frac{4,7}{2 \cdot 11,795} = 0,20 \text{ хв;}$$

$$\Delta S_3 = \frac{4,17 \cdot (24,2^2 - 19,5)}{11,795} = 72,5 \text{ м.}$$

1.4. У разі зміни швидкості від 24,2 до 30 км/год ( $\Delta v_4$ )

$$f_{\text{пер4}} = \frac{10,59 + 8,45}{2} = 9,52 \text{ Н/кН;}$$

$$\Delta t_4 = \frac{5,8}{2 \cdot 9,52} = 0,30 \text{ хв;}$$

$$\Delta S_4 = \frac{4,17 \cdot (30^2 - 24,2^2)}{9,52} = 137,7 \text{ м.}$$

1.5. Час розгону поїзда до  $v = 30$  км/год буде

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 = 0,30 + 0,34 + 0,20 + 0,30 = 1,14 \text{ хв.}$$

1.6. Шлях, який пройде поїзд при розгоні до 30 км/год

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 + \Delta S_4 = 25,6 + 84,2 + 72,5 + 137,7 = 320 \text{ м.}$$

## 6.6. Графічний метод розв'язання рівняння руху поїзда

Розглянуті аналітичні методи вирішення рівняння руху поїзда вимагають великих витрат часу на розрахунки. На практиці частіше використовують графічний метод, за яким по отриманій діаграмі питомих прискорюючих або уповільнюючих сил будують за допомогою лінійки та косинця криву залежності швидкості руху від пройденого шляху. Ця крива дозволяє наочно уявити рух поїзда по ділянці. Побудова швидкості руху  $v(S)$  поїзда з певною масою на спрямленій ділянці колії заснована на графічній залежності швидкості від питомої прискорюючої сили, отриманої аналітичним розрахунком на діаграмі. На рис. 6.2 показано принцип побудови кривої швидкості графічним методом. Під час побудови кривої швидкості використані масштаби, рекомендовані ПТР і наведені в табл. 6.7.

Таблиця 6.7

Рекомендовані ПТР масштаби для графічного рішення задач

Показник	Позначення масштабу	Масштаб, мм							
		для вантажних і пасажирських поїздів			для електропоїздів		для розрахунків гальмівних і спеціальних		
Сила 1 Н/кН	$k$	12	6	10	2	3	2	1	
Швидкість 1 км/год	$m$	2	1	2	1	1,5	1	1	
Шлях 1 км	$y$	40	20	48	60	90	240	120	
Стала	$\Delta$	30	30	25	50	50	–	–	
Час 1 хв	$x$	10	10	10	50	50	–	–	
Час 1 год	$X$	600	600	600	–	–	–	–	

На графіку довільний інтервал швидкостей  $\Delta v = v_2 - v_1$  відкладений в масштабі  $m$ . У цьому інтервалі швидкостей точка  $A$  за середню швидкість руху  $v_{cp} = \frac{v_1 + v_2}{2}$  показує середнє значення питомої прискорюючої сили  $f_{п.ср}$ , відкладене на графіку в масштабі  $k$ . За формулою (6.28) визначається шлях  $\Delta S$ , який пройде поїзд в межах  $\Delta v$ . Отримане значення  $\Delta S$  показане на рис. 6.2 в масштабі шляху в функції  $y$  (мм/км). Лінія  $BC$  показує зміну швидкості по шляху в інтервалі  $\Delta v$ .

Розглянемо, за яких умов можна отримати лінію  $BC$  без розрахунку, а тільки в результаті геометричних побудов. Для цього потрібно на діаграмі точку  $A$  з'єднати з точкою  $O$  ( $f_{\Pi} = 0, v = 0$ ) прямою  $AO$  і з'ясувати, за яких умов шукана лінія  $BC$  опиниться перпендикулярною до лінії  $AO$ . Це можливо при рівності кутів  $\alpha$  і  $\alpha'$  чи їх тангенсів.

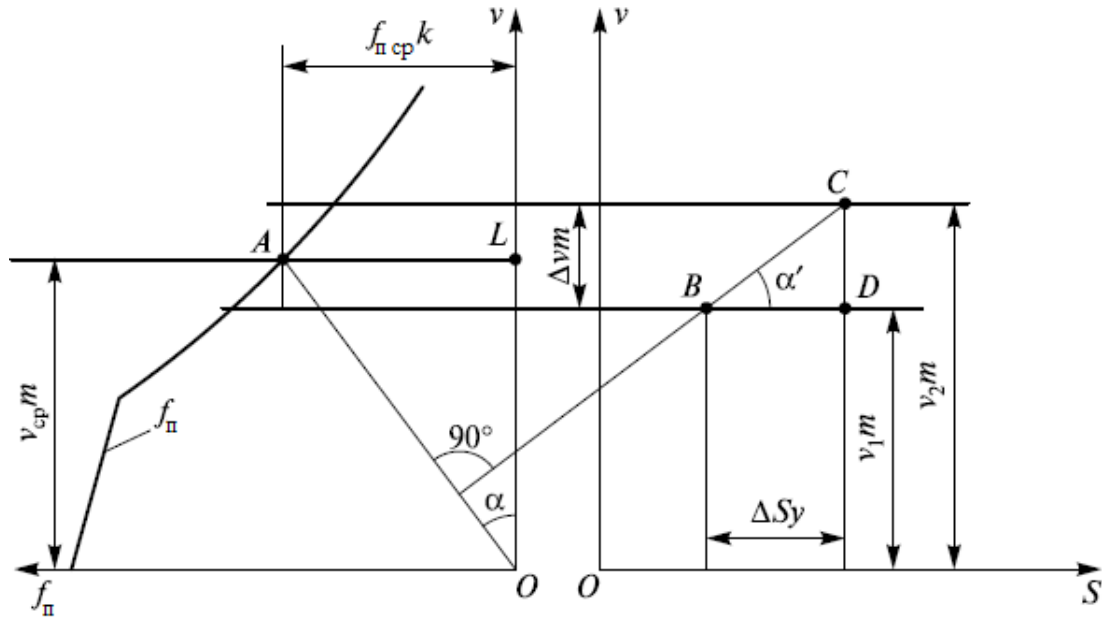


Рис. 6.2. Принцип графічної побудови кривої швидкості

З трикутників  $AOL$  і  $CBD$  отримаємо

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{AL}{OL} = \frac{f_{\Pi \text{cp}} k}{v_{\text{cp}} m};$$

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{CD}{BD} = \frac{\Delta v m}{\Delta S y}.$$

Якщо  $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha'$  тоді

$$\frac{f_{\Pi \text{cp}} k}{v_{\text{cp}} m} = \frac{\Delta v m}{\Delta S y}. \quad (6.29)$$

Із рівняння (6.24) отримаємо

$$f_{\text{ср}} = \frac{\Delta S}{\Delta t \zeta},$$

а із рівняння (6.25)

$$v_{\text{ср}} = \frac{\Delta S}{\Delta t}.$$

Підставивши ці вирази в рівняння (6.28) і виконавши скорочення, знайдемо умову перпендикулярності лінії  $BC$  до  $AO$

$$\frac{k}{\zeta m} = \frac{m}{y}. \quad (6.30)$$

Отже, лінію  $BC$ , що відображає зміну швидкості в функції шляху, можна побудувати як перпендикуляр до лінії  $AO$  у разі дотримання рівності (6.30), в яку входять відомі значення  $\zeta$  і три масштаби побудов. Якщо задати два масштаби, то, використовуючи рівність (6.30), можна визначити третій масштаб.

Графік часу  $t(S)$  руху поїзда будують на планшеті на основі побудованого графіка швидкості  $v(S)$  в залежності від шляху. На рис. 6.3 показаний відрізок  $BC$  графіка швидкості в інтервалах швидкостей  $\Delta v$  і шлях  $\Delta S$ , побудованих в масштабах  $m$  і  $y$ . Час руху поїзда на відстані  $\Delta S$  з середньою швидкістю  $v_{\text{ср}}$  можна визначити аналітично за допомогою формули (6.26).

Отримане значення  $\Delta t$  відкладене в масштабі часу  $x$  (мм/хв) (лінія  $LN$ ). Зміна часу у функції їх шляху виразиться відрізком  $MN$ .

Графічним методом можна побудувати  $\Delta t$ , використовуючи лінійку і косинець. Для цього зліва від початку координат відкладають відрізок (постійну величину)  $\Delta$ . Через отриману точку  $A$  проводять ординату  $AR$ . На неї зносять середнє значення швидкості в інтервалі  $\Delta v$  і отримують точку  $D$ , яку лінією  $DO$  з'єднують з початком координат.

Визначимо, за яких умов шукана лінія  $t(S) - MN$  може бути побудована як перпендикуляр до лінії  $OD$ . Перпендикулярність цих ліній визначається рівністю кутів  $\beta$  і  $\beta'$  або їх тангенсів. З трикутників  $ODE$  та  $MNL$  отримаємо:

$$\text{tg}\beta = \frac{OE}{ED} = \frac{v_{\text{ср}} m}{\Delta};$$

$$\operatorname{tg}\beta' = \frac{LM}{LN} = \frac{\Delta S y}{\Delta t x}.$$

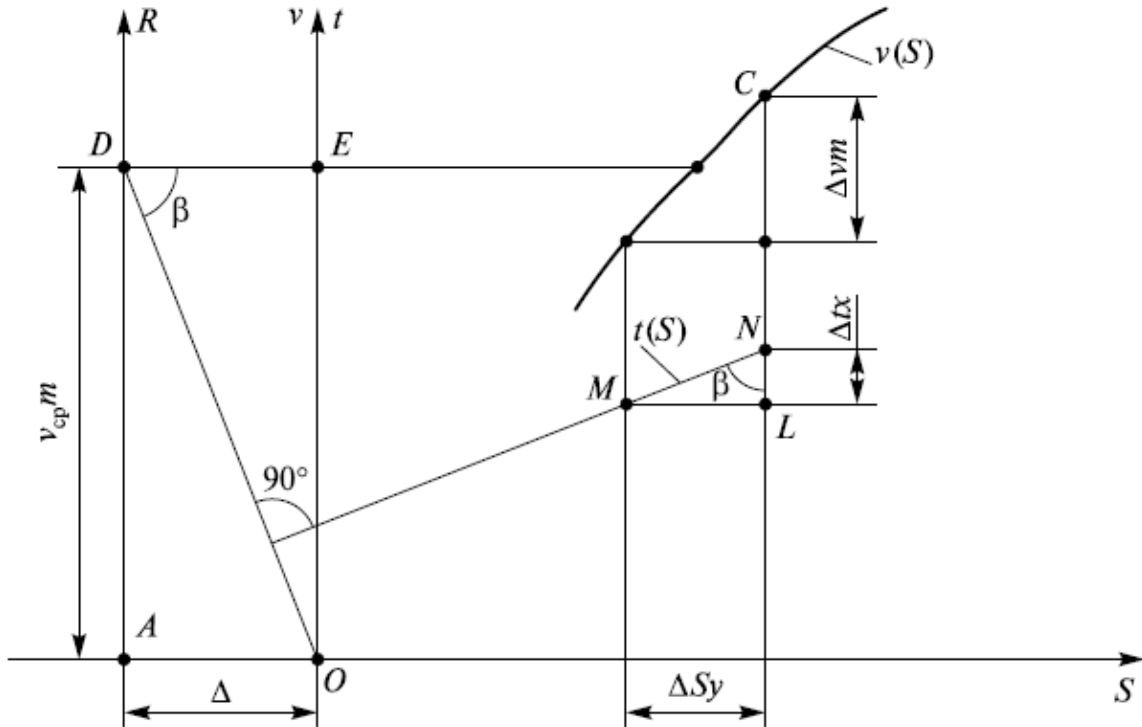


Рис. 6.3. Принцип графічної побудови кривої часу

Шукана лінія  $MN$  буде перпендикулярна до лінії  $OD$ , коли  $\operatorname{tg}\beta = \operatorname{tg}\beta'$  або при рівності правих складових отриманих вище виразів:

$$\frac{v_{cp} m}{\Delta} = \frac{\Delta S y}{\Delta t x}.$$

Тому що

$$v_{cp} = \frac{\Delta S}{\Delta t},$$

отримаємо

$$\frac{m}{\Delta} = \frac{y}{x}. \quad (6.31)$$

Якщо рівність (6.31), в яку входять масштаби побудови та обраний відрізок  $\Delta$ , буде виконано, то лінія  $MN$ , побудована як перпендикуляр до лінії  $OD$ , покаже зміну часу у функції шляху. Для вирішення рівняння руху поїзда графічним методом, крім діаграми питомих прискорюючих і уповільнюючих сил за всі режими руху, необхідно знати сили додаткових опорів руху. З метою визначення додаткових опорів руху від профілю та плану колії виконують спрямлення та приведення до розрахунку профіля колію. Спрямлення та приведення до розрахунку профіля та плану колії розглянуто в гл. 4.

### **Питання для самоконтролю**

- 1. Що таке "приведена питома маса поїзда"?*
- 2. Що є основою для виведення рівняння руху поїзда?*
- 3. Як враховуються вплив обертових частин рухомого складу під час поступального руху поїзда у рівнянні руху?*
- 4. Як отримати діаграму питомих прискорюючих (уповільнюючих) сил поїзда?*
- 5. Назвіть переваги та недоліки аналітичного методу розв'язання рівняння руху поїзда.*
- 6. Які способи аналітичного методу застосовуються для вирішення рівняння руху поїзда?*
- 7. Які принципи використовують для графічного рішення рівняння руху поїзда?*

## Розрахунок та визначення ваги состава

### 7.1. Загальні відомості

Одним з найважливіших якісних показників, який впливає на ефективність роботи залізниці, є вага состава. Вага состава визначає провізну та пропускну спроможність ділянок і ліній залізниці. Збільшення ваги состава, в допустимих межах, знижує собівартість, підвищує економічність перевезень, покращує використання потужності локомотива, знижує витрату електроенергії або палива на тягу поїздів. Однак, збільшення ваги состава вище допустимої норми може викликати передчасне руйнування локомотива. Тому вагу вантажного состава розраховують виходячи з повного використання сили тяги локомотива у разі руху з розрахунковою швидкістю по найбільш важкому підйому. Отриману розрахунком вагу вантажного состава перевіряють:

- за умовою зрушення поїзда з місця на роздільних пунктах;
- за можливості розташування поїзда в межах довжини прийомна-відправних колій на станціях;
- на нагрівання тягових електродвигунів або генераторів локомотивів.

Вагу состава пасажирських поїздів з урахуванням категорій (швидкий, пасажирський, високошвидкісний), а також прискорених вантажних і вантажопасажирських поїздів у разі руху по декількох залізницях встановлює АТ «Укрзалізниця».

Розрахунок ваги вантажного состава починають з аналізу профілю та плану колії на ділянці. В процесі аналізу обирають найбільш важкий за крутизною та довжиною для руху підйом.

*Розрахунковим підйомом називають найбільш важкий для подолання підйом розглянутої ділянки, на якому в процесі руху поїзда встановлюється рівноважна швидкість.*



*Швидкості усталеного рівномірного руху на ухилах елементів позадвужнього профілю називаються рівноважними.*

Вагу вантажного поїзда визначають за умови руху з рівноважною швидкістю по розрахунковому підйому. Найбільша вага вантажного состава визначається за умови руху з рівноважною розрахунковою швидкістю заданим локомотивом по розрахунковому підйому. Тоді рівняння руху поїзда за рівноважній швидкості приймає вигляд

$$F_{\text{др}} - W_{\text{д}} = 0, \quad (7.1)$$

де  $F_{\text{др}}$  – розрахункова сила тяги локомотива за розрахункову швидкість  $v_p$ , Н;

$W_{\text{д}}$  – повний опір руху поїзда, Н.

$$W_{\text{д}} = (\omega'_0 + i_p)P + (\omega''_0 + i_p)Q.$$

Підставивши повний опір руху поїзда при рівноважній швидкості, рівний  $v_p$ , у рівняння (7.1), знайдемо шукану вагу состава  $Q$ , кН, за формулою:

$$Q = \frac{F_{\text{др}} - P(\omega'_0 + i_p)}{\omega''_0 + i_p}. \quad (7.2)$$

Тривалий рух локомотива за максимальне навантаження у режимі тяги зі швидкістю нижче розрахункової швидкості  $v_p$  може привести до перегріву тягових електричних машин і їх руйнування.

Значення розрахункової швидкості  $v_p$  і відповідної їй розрахунковій силі тяги  $F_{\text{др}}$  є паспортними характеристиками та наводяться для кожної серії локомотива в ПТР.

Розрахункові вага, сила тяги та швидкість тепловозів представлені в табл. 7.1.

**Приклад 1.** Визначити, яку вагу состава може провести тепловоз 2ТЭ116 ( $P = 2760$  кН) по ланковій ділянці колії та підйому  $i = 9$  ‰ в кривій радіусом  $R = 1400$  м. Состав сформований з чотиривісних вагонів, кожен з яких важить  $q = 800$  кН.

*Рішення.* Розрахункова сила тяги тепловоза 2ТЭ116 дорівнює  $F_{\text{др}} = 506000$  Н за розрахункову швидкість  $v_p = 24,2$  км/год.

## Розрахункова вага, сила тяги і швидкість тепловозів

Серія тепловоза	Розрахункова вага $P$ , кН	Розрахункова швидкість $v_p$ , км/год	Розрахункова сила тяги $F_{др}$ , Н
ТЭМ1	1200	9,0	200 000
ТЭМ2	1200	11,0	210 000
ЧМЭЗ	1230	11,4	230 000
М62	2400	20,0	200 000
2М62	2400	20,0	400 000
2ТЭ10Л	2600	23,4	506 000
2ТЭ10В, М	2760	23,4	506 000
3ТЭ10М	4140	23,4	759 000
2ТЭ116	2760	24,2	506 000
ТЭП60	1290	47,0	127 000
ТЭП70	1310	48,3	170 000

Питомий основний опір руху тепловоза за розрахункову швидкість

$$\omega'_0 = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2 = 1,9 + 0,01 \cdot 24,2 + 0,0003 \cdot 24,2^2 = 2,32 \text{ Н/кН.}$$

Осьове навантаження вагонів поїзда

$$q_o = \frac{800}{4} = 200 \text{ кН/вісь.}$$

Питомий основний опір руху навантажених чотиривісних вагонів на підшипниках кочення по ланковій колії

$$\omega''_{04} = 0,7 + \frac{(30 + 24,2 + 0,025 \cdot 24,2^2)}{200} = 1,04 \text{ Н/кН.}$$

Розрахунковий підйом з урахуванням кривої

$$i_p = 9 + \frac{700}{1400} = 9,5 \text{ ‰.}$$

Тоді відповідно до виразу (7.2) розрахункова вага складу

$$Q_p = \frac{506000 - 2760 \cdot (2,32 + 9,5)}{1,04 + 9,5} = 44912 \text{ кН},$$

або, округлюючи, відповідно до вимог ПТР до 500 кН, отримаємо:

$$Q_p = 45000 \text{ кН}.$$

## 7.2. Визначення ваги состава з урахуванням запасу кінетичної енергії

Вагу состава з урахуванням використання кінетичної енергії визначають в тих випадках, коли характер профілю колії та розташування зупиночних пунктів не дозволяють правильно встановити який з важких елементів профілю потрібно прийняти за розрахунковий. В цьому випадку використовують метод підбору.

Спочатку за розрахунковий підйом вибирають підйом, який має меншу крутизну, але більшу протяжність і для нього визначають вагу состава. Отриману вагу состава перевіряють на можливість подолання підйому більшої крутизни з використанням накопиченої поїздом кінетичної енергії, тобто подолання підйому за рахунок можливості розігнатися до найбільшої швидкості перед підйомом і за рахунок цієї швидкості та сили тяги локомотива вийти на вершину підйому зі швидкістю не меншою за розрахункову. Перевірку виконують, вирішуючи рівняння руху поїзда аналітичним або графічним методом.

**Аналітичний метод.** Аналізуючи профіль колії, припускають, що состав розрахованої ваги наблизиться до елемента профілю більшої крутизни, ніж розрахунковий підйом зі швидкістю  $v_{п}$ . Під час руху поїзда розрахункової ваги состава по елементу більшої крутизни, ніж розрахунковий, буде знижуватися швидкість  $v_{пi} - 10 \text{ км/год} = v_{ki}$ , отже,  $(v_{пi} + v_{ki}) / 2 = v_{срi}$ , км/год.

У ПТР для підвищення точності розрахунків, рекомендується приймати інтервали зміни швидкості не більше 10 км/год.

Для отриманої середньої швидкості прийнятого інтервалу визначається значення питомої сповільнюючої сили  $f_{\text{ср}i}$ , Н/кН,

$$f_{\text{ср}i} = \frac{F_{\text{дср}i} - W_{\text{дср}i}}{P + Q}. \quad (7.3)$$

Відстань, пройдена поїздом при зміні швидкості руху від  $v_{\text{п}i}$  до  $v_{\text{к}i}$ , обчислюється за формулою:

$$\Delta S_i = \frac{v_{\text{к}i}^2 - v_{\text{п}i}^2}{2\zeta f_{\text{ср}i}}, \quad (7.4)$$

де  $\zeta$  («дзета») – питома прискорення під дією одиниці сили на одиницю наведеної маси поїзда.

$$\zeta = \frac{g}{1000(1 + \gamma)}. \quad (7.5)$$

Тут  $\gamma$  – коефіцієнт інерції обертових мас під час поступального руху. Його значення для різних типів рухомого складу наведені в табл. 7.2.

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2 = 9,81 \frac{60^2 \cdot 60^2}{1000} = 127138 \text{ км/год}^2 \approx 127000 \text{ км/год}^2.$$

Тоді

$$\zeta = \frac{127}{1 + \gamma}.$$

Таблиця 7.2

#### Значення коефіцієнта інерції обертових мас

Тип рухомого складу	$\gamma$
Електровози	0,24–0,28
Тепловози	0,11–0,12
Вантажні вагони:	
– порожні	0,08–0,09
– навантажені	0,03–0,04
Пасажирські вагони	0,04–0,05

Якщо уявити  $\frac{1}{\zeta} = \frac{1+\gamma}{127}$ , то отримаємо питому наведену (з урахуванням інерційних обертових мас) масу поїзда. Тоді "традиційне" в тязі поїздів рівняння руху поїзда буде відповідати другому закону Ньютона

$$\frac{dv}{dt} \cdot \frac{1}{\zeta} = f_d \pm \omega_d,$$

де  $\frac{dv}{dt} \cdot \frac{1}{\zeta} = f_d$  – питома прискорююча сила, що діє на швидкість руху поїзда та залежна від питомих сил  $f_d \pm \omega_d$ .

Якщо  $f_d \pm \omega_d = 0$ , рух поїзда буде рівномірним із постійною швидкістю.

Якщо  $f_d \pm \omega_d > 0$ , швидкість поїзда збільшується.

Якщо  $f_d \pm \omega_d < 0$ , швидкість поїзда зменшується.

У ПТР для  $\zeta$  прийнято такі значення:

Вантажні та пасажирські поїзди .....	120
Поодинокі прямуючі:	
– електровози .....	107
– пасажирські тепловози .....	118
– вантажні тепловози.....	112
– електропоїзди.....	119
– дизель-поїзди .....	116

Якщо швидкість руху поїзда в кінці підйому, що перевіряється, виявляється рівною або більшою, ніж розрахункова швидкість для прийнятого локомотива, можна вважати вагу состава прийнятою.

Якщо ж швидкість наприкінці елемента, що перевіряється, менша за розрахункову, вагу состава слід зменшити та повторити розрахунок.

**Приклад 2.** Розрахувати вагу состава, з яким локомотив 2ТЭ116 може подолати ділянку колії з профілем, наведеним у табл. 7.3.

*Рішення.* В якості розрахункового приймаємо підйом крутизною 9‰ і довжиною 2000 м. Для тепловоза 2ТЭ116 ( $P = 2760$  кН)  $v_p = 24,2$  км/год,  $F_{др} = 506000$  Н.

## Профіль колії

№ елемента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$i, ‰$	0	-3	-7	-8	0	9	0	7	0	6	0
$S, м$	1500	800	6000	1500	600	2000	500	5500	400	300	1900

Питомий основний опір руху тепловоза за розрахункову швидкість (з прикладу 1)  $\omega'_0 = 2,32$  Н/кН для состава  $\omega''_0 = 1,04$  Н/кН.

Вага состава

$$Q_p = \frac{506000 - 2760 \cdot (2,32 + 9)}{1,04 + 9} \doteq 47500 \text{ кН.}$$

Аналізуючи профіль колії, встановлюємо, що до підйому, прийнятому за розрахунковий, поїзд може підійти з гранично допустимою швидкістю, тому що йому передують затяжні спуски. Приймаємо початкову швидкість до моменту вступу на розрахунковий підйом  $v_{п} = 80$  км/год. Для визначення відстані, яке пройде поїзд у разі зниження швидкості від 80 до 70 км/год, обчислимо значення питомої сповільнюючої сили  $f_{сп}$  за середню швидкість  $v_{сп} = 75$  км/год на розрахунковому підйомі за формулою (7.3). Попередньо визначивши для тепловоза 2ТЭ116 для швидкості  $v_{сп} = 75$  км/год дотичну силу тяги  $F_{д} = 172\ 000$  Н та питомий основний опір руху тепловоза

$$\omega'_0 = 1,9 + 0,01 \cdot 75 + 0,0003 \cdot 75^2 = 4,34 \text{ Н/кН.}$$

Питомий основний опір руху навантажених чотиривісних вагонів на підшипниках кочення по ланковій колії для осьового навантаження  $q_0 = 200$  кН/вісь

$$\omega''_{04} = 0,7 + \frac{(30 + 75 + 0,025 \cdot 75^2)}{200} = 1,93 \text{ Н/кН.}$$

Питома уповільнююча сила на підйомі крутизною 9 ‰

$$f_{сп1} = \frac{172\ 000 - 2760 \cdot 4,34 - 47\ 500 \cdot 1,9}{2760 + 47\ 500} - 9 = -7,61 \text{ Н/кН.}$$

Якщо прийняти в якості умовного середньозваженого значення коефіцієнта інерції обертових мас всього поїзда  $\gamma = 0,06$ , то отримаємо  $\zeta = 127 / (1 + 0,06) \doteq 120 \text{ км/год}^2$ . Тоді відстань, пройдена поїздом у разі зміни швидкості руху від 80 до 70 км/год, дорівнюватиме

$$\Delta S_{80-70} = \frac{1000 \cdot (80^2 - 70^2)}{2 \cdot 120 \cdot (-7,61)} \approx 822 \text{ м.}$$

Для наступних інтервалів швидкості розрахунки наведені в табл. 7.4.

Перевіримо правильність вибору розрахункового підйому. Тому що  $2378 > 2000$  м швидкість поїзда більше 50 км/год після подолання підйому  $i = 9 \text{ ‰}$ , *отже, розрахунковий підйом для визначення ваги складу на даній ділянці вибрали невірно.*

Переважно для визначення ваги состава слід прийняти підйом крутизною  $i = 7,0 \text{ ‰}$  і протяжністю  $S = 5500$  м, тоді

$$Q_p = \frac{506\,000 - 2760 \cdot (2,32 + 7)}{1,04 + 7} = 59\,736 \text{ кН.}$$

Приймаємо  $Q = 60\,000$  кН.

Щоб переконатися в тому, що з таким складом прийнятій тепловоз подолає і підйом 9 ‰, розрахунком перевіримо, як змінюється швидкість під час руху поїзда по даному підйому. Результати розрахунку зведемо в табл. 7.5.

Тепловоз 2ТЭ116 зі складом  $Q = 60\,000$  кН подолає підйом, крутизною 9 ‰ і довжиною 2000 м, тому що  $2128 > 2000$  м і швидкість поїзда на виході з підйому буде вище розрахункової – приблизно 50 км/год. Отже, підйом крутизною 7 ‰ і довжиною 5500 м заданого профілю шляху доцільно прийняти за розрахунковий і за цими вихідними даними встановити розрахункову вагу состава  $Q = 60\,000$  кН.

Якщо розрахункова відстань, яку проходить поїзд під час зниження до розрахункової швидкості, виявилася менше довжини підйому, то вагу состава слід зменшити та розрахунок повторити. Ці розрахунки повторюють до тих пір, поки поїзд певної ваги не пройде весь підйом зі швидкістю не нижче розрахункової.

Таблиця 7.4

## Результати розрахунків задачі прикладу 2

$v_1$ , км/ГОД	$v_2$ , км/ГОД	$v_{cp}$ , км/ГОД	$F_d$ , Н	$\omega'_0$ , Н/кН	$W'_0$ , Н	$\omega''_0$ , Н/кН	$W''_0$ , Н	$W_0$ , Н	$F_d - W_0$ , Н	$f_d - \omega_0$ , Н/кН	$f_d - \omega_d$ , Н/кН	$\Delta S_i$ , М	$\sum \Delta S_i$ , М
80	70	75	172 200	4,34	11 978	1,93	91 675	103 653	68 547	1,36	-7,64	822	822
70	60	65	198 970	3,82	10 543	1,70	80 750	91 293	107 677	2,14	-6,86	790	1612
60	50	55	232 010	3,36	9274	1,50	71 250	80 524	151 486	3,01	-5,99	766	2378

Таблиця 7.5

## Перевірка правильності вибору розрахункового підйому

$v_1$ , км/ГОД	$v_2$ , км/ГОД	$v_{cp}$ , км/ГОД	$F_d$ , Н	$\omega'_0$ , Н/кН	$W'_0$ , Н	$\omega''_0$ , Н/кН	$W''_0$ , Н	$W_0$ , Н	$F_d - W_0$ , Н	$f_d - \omega_0$ , Н/кН	$f_d - \omega_d$ , Н/кН	$\Delta S_i$ , М	$\sum \Delta S_i$ , М
80	70	75	172 200	4,34	11978	1,93	117 085	129 063	43 137	0,66	-8,31	752	752
70	60	65	198 970	3,82	10543	1,70	102 000	112 543	86 427	1,38	-7,62	171	1463
60	50	55	232 010	3,36	9274	1,50	90 000	99 274	132 736	2,11	-6,89	665	2128



### 7.3. Графічний метод визначення ваги состава

За формулою (7.2) розраховуємо вагу состава для подолання підйому, крутизна якого менше за найбільшу. Для отриманої ваги состава  $Q_1$  будуємо графік питомих прискорюючих сил заданого локомотива в режимі тяги. Рух починається від місця, на якому відома швидкість поїзда. З цієї точки будуємо криву швидкості в функції розрахункового профілю колії, тобто  $v = f(S)$ . Якщо на найбільш крутому підйомі швидкість поїзда не знизиться нижче розрахункової  $v_p$ , то поїзд можна вести по ділянці.

Якщо в кінці підйому швидкість  $v_1$  виявиться нижче  $v_p$ , то потрібно зменшити вагу состава, визначаючи її зі співвідношення:

$$Q_2 = Q_1 \frac{v_1}{v_p}.$$

За ПТР (п. 112) рекомендується округляти вантажний склад до 500 кН, а пасажирський – до 250 кН до більшого значення.

Для  $Q_2$  також будуємо графік питомих прискорюючих сил в режимі тяги. Знову починаємо рух від місця, на якому відома швидкість поїзда та будуємо криву швидкості в функції розрахункового профілю колії (рис. 7.1, а)

Якщо на найбільшому підйомі рівноважна швидкість не співпаде з розрахунковою, то визначають наступну вагу состава зі співвідношення:

$$Q_3 = \frac{Q_1 + Q_2}{2},$$

округляючи за правилами вагу состава.

Знову для  $Q_3$  будуємо графік питомих прискорюючих сил в режимі тяги. Повторюємо побудову кривої швидкості та визначаємо  $v_3$ , яка може не збігатися з розрахунковою швидкістю на виході з даного підйому.

За трьома значеннями швидкостей  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  і вагами складів  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  будуємо графік залежності ваги складу від швидкості в кінці

найбільш крутого підйому. Швидкості зручно представляти по осі ординат, а ваги составів – по осі абсцис (рис. 7.1, б).

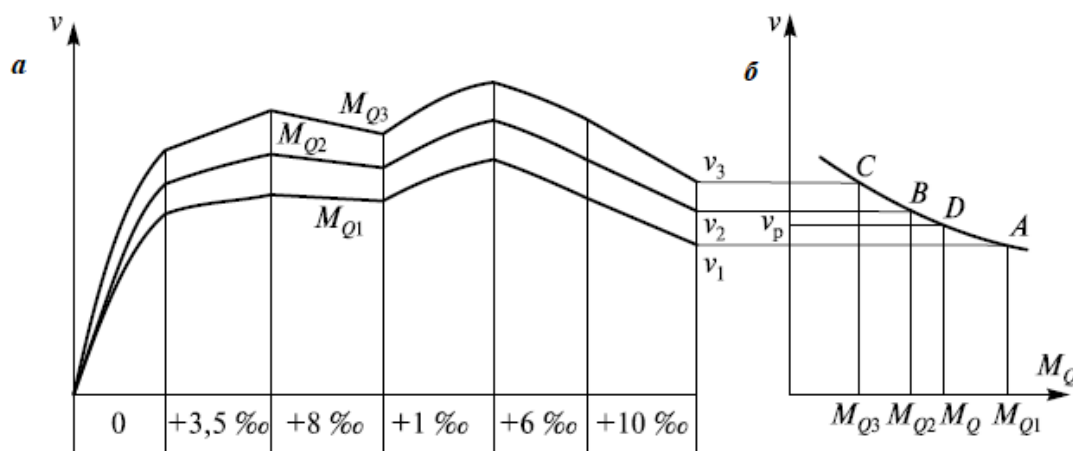


Рис. 7.1. Визначення ваги складу з урахуванням запасу кінетичної енергії

Щоб визначити найбільшу вагу состава, яку заданий локомотив проведе по даному підйому, отримані точки з'єднують плавною кривою і на ній знаходять вагу состава за розрахункову швидкість  $v_p$ .

Підйоми по крутизні, що перевищують розрахунковий, які поїзд може долати за рахунок запасу кінетичної енергії, називають *швидкісними*.

В експлуатації, як правило, швидкість в кінці найбільш важкого підйому повинна бути більше або дорівнювати розрахунковій. Однак в окремих випадках в залежності від місцевих умов по ПТР дозволяється в кінці підйому протягом не більше 500 м рухатися зі швидкістю нижче розрахункової.

Після визначення ваги состава за умовами проходження найбільш важкого на даній ділянці елемента профілю колії необхідно перевірити отриману вагу на можливість зрушення поїзда з місця та на можливість його установки в межах приймально-відправних колій станції.

#### 7.4. Перевірка ваги состава на зрушення з місця

Прискорююча сила під час зрушення поїзда з місця повинна бути більше нуля. Тільки в цьому випадку можна збільшити швидкість

руху, тобто зрушити поїзд з місця зупинки. Прискорююча сила визначається з виразу:

$$F_{\Pi} = F_{\text{д зруш}} - P\omega'_{\text{зруш}} - Q\omega''_{\text{зруш}} - (P + Q)i_{\text{зруш}} > 0, \quad (7.9)$$

де  $F_{\text{д зруш}}$  – сила тяги локомотива при зрушенні поїзда з місця зупинки, Н;

$\omega'_{\text{зруш}}$  – питомий опір зрушенню локомотива, Н/кН;

$\omega''_{\text{зруш}}$  – питомий опір зрушенню з місця состава поїзда, Н/кН;

$i_{\text{зруш}}$  – ухил елемента профілю колії, на якому відбувається зрушення з місця зупинки (початок руху) поїзда, %.

Якщо прийняти  $\omega_{\text{зруш}} = \omega'_{\text{зруш}} = \omega''_{\text{зруш}}$ , то рівняння (7.9) набуде вигляду

$$F_{\Pi} = F_{\text{д зруш}} - (P + Q)(\omega_{\text{зруш}} + i_{\text{зруш}}) > 0. \quad (7.10)$$

З рівняння (7.10) отримуємо

$$Q < Q_{\text{зруш}} = \frac{F_{\text{д зруш}}}{\omega_{\text{зруш}} + i_{\text{зруш}}} - P. \quad (7.11)$$

Таким чином, вага состава  $Q$  не повинна перевищувати значення  $Q_{\text{зруш}}$ , визначене за умовами зрушення поїзда на підйомі крутизною  $i_{\text{зруш}}$ . Значення сили тяги деяких тепловозів під час зрушення з місця приведені в табл. 7.6.

Таблиця 7.6

Значення сили тяги при рушанні з місця

Серія тепловоза	Сила тяги $F_{\text{д зруш}}$ , Н	Обмеження	Серія тепловоза	Сила тяги $F_{\text{д зруш}}$ , Н	Обмеження
1	2	3	4	5	6
ТЭМ1	354 000	–	2ТЭ10В	813 000	по зчепленню
ТЭМ2	354 000	по зчепленню	2ТЭ10М	813 000	те саме
ЧМЭЗ	363 000	–	2ТЭ116	813 000	те саме

Закінчення табл. 7.6

1	2	3	4	5	6
М62	357 000	–	3ТЭ10М	960 000	по автозчепленню
2М62	714 000	–	ТЭП60	205 000	по пусковому струму
2ТЭ10Л	756 000	–	ТЭП70	294 000	–

Питомий опір зрушенню кожної осі на підшипниках ковзання рухомого складу визначають за формулою:

$$\omega_{\text{зруш}}^{\text{ковз}} = \frac{1393}{q_0 + 68,7}. \quad (7.12)$$

Для рухомого складу на роликових підшипниках питомий опір

$$\omega_{\text{зруш}}^{\text{рол}} = \frac{275}{q_0 + 68,7}. \quad (7.13)$$

Тут  $q_0$  – середнє осьове навантаження поїзда, кН/вісь.

$$q_0 = \frac{P + Q}{n_{\text{ол}} + n_{\text{ов}}},$$

де  $n_{\text{ол}}$ ,  $n_{\text{ов}}$  – число осей локомотива та вагонів відповідно.

**Приклад 3.** Перевірити, чи може тепловоз 2ТЭ116 вагою 2760 кН зрушити з місця состав вагою  $Q = 45000$  кН, сформований з чотиривісних вагонів вагою по  $q = 600$  кН кожен на підйомі  $i_{\text{зруш}} = 10\%$ . Розрахунок провести для вагонів на підшипниках ковзання та на роликових підшипниках.

*Рішення.*

1. Визначення числа осей в поїзді:

$$n_{\text{ов}} = 45000 / 150 = 300 \text{ осей}; \quad n_{\text{ол}} = 12 \text{ осей.}$$

2. Визначення середнього навантаження на одну вісь поїзда

$$q_0 = (45000 + 2760) / 312 = 153 \text{ кН/вісь.}$$

3. Визначення питомого опору зрушенню зі стоянки поїзда на підшипниках ковзання

$$\omega_{\text{зруш}}^{\text{ковз}} = \frac{1393}{153 + 68,7} = 6,28 \text{ Н/кН.}$$

4. Перевірка можливості зрушенню з місця поїзда (вагони на підшипниках ковзання) на підйомі  $i_{\text{зруш}} = 10 \text{ ‰}$

$$F_{\text{д зруш}} = 81300 \cdot 9,81 = 797\,553 \text{ Н.}$$

Тоді

$$Q_{\text{зруш}} = \frac{797553}{6,28 + 10} - 2760 = 46230 \text{ кН.}$$

Умова  $Q < Q_{\text{зруш}}$  виконується, отже, тепловоз 2ТЭ116 зможе зрушити з місця состав вагонів на підшипниках ковзання вагою  $Q = 45\,000 \text{ кН}$  на  $i_{\text{зруш}} = 10 \text{ ‰}$ .

5. Визначення питомого опору зрушення зі стоянки складу вагонів на роликівих підшипниках

$$\omega_{\text{зруш}}^{\text{рол}} = \frac{275}{153 + 68,7} = 1,24 \text{ Н/кН.}$$

6. Перевірка можливості рушання з місця складу вагонів на підшипниках кочення (роликівих) вагою  $Q = 45\,000 \text{ кН}$  на  $i_{\text{зруш}} = 10 \text{ ‰}$  тепловозом серії 2ТЭ116

$$Q_{\text{зруш}} = \frac{797553}{1,24 + 10} - 2760 = 68197 \text{ кН.}$$

Умова  $Q < Q_{\text{зруш}}$  виконується, отже, тепловоз 2ТЭ116 зможе зрушити з місця склад вагонів на підшипниках кочення вагою  $Q = 45\,000 \text{ кН}$  на  $i_{\text{зруш}} = 10 \text{ ‰}$ .

## 7.5. Перевірка ваги состава за довжиною приймально-відправних колій

Потужні локомотиви, що мають великі сили тяги, здатні водити поїзди підвищеної ваги та довжини. Однак поїзд повинен встановлюватися в межах корисної довжини приймально-відправних колій  $l_{\text{пвк}}$  на станціях ділянки обертання. Вага состава, розрахована за найважчим елементом профілю колії та перевірена на проходження більш крутого підйому, може виявитися занадто великою, щоб уміститися в межах станційних колій. Тому проводять перевірку ваги поїзда за довжиною приймально-відправних колій станції:

$$l_{\text{пвк}} = l_{\text{л}} + l_{\text{с}} + 10,$$

де  $l_{\text{л}}$ ,  $l_{\text{с}}$  – довжина локомотива та состава, м;  
10 – допуск на неточність установки поїзда, м.

Довжину  $l_{\text{с}}$  визначають за кількістю та типом вагонів у сформованому составі

$$l_{\text{с}} = \sum n_i l_i,$$

де  $n_i$  – число однотипних вагонів у сформованому складі;  
 $l_i$  – довжина вагонів по осях автозчеплення, з яких сформований состав, м.

$$n_i = \frac{Q}{q_i} \alpha_i,$$

де  $q_i$  – середня для однотипної групи вага вагона, кН;  
 $\alpha_i$  – частка состава за вагою, що припадає на групу однотипних вагонів.

Довжину поїзда та місткість колій визначають та враховують в умовних вагонах. Умовний вагон має довжину 14 м. У додатках до нормативів графіка руху поїздів зазначають умовну довжину рухомого складу. Необхідні довідкові дані стосовно довжини рухомого складу для тягових розрахунків наведено у табл. 7.7.

## Довжина рухомого складу

Рухомий склад	Довжина в	
	умовних вагонах	метрах
<i>Вагони</i>		
Чотиривісний піввагон, платформа	1	14
Чотиривісна цистерна, думпкар	0,86	12
Чотиривісний критий	1,05	15
Шестивісний	1,21	17
Восьмивісна цистерна	1,51	21
<i>Локомотиви</i>		
ВЛ60 <sup>к</sup>	1,51	21
ВЛ10, ВЛ11, ВЛ80*	2,35	33
2ТЭ10*	2,42	34
2ТЭ116, 2М62*	2,59	36
ЧМЭЗ	1,29	18
ТЭМ2	1,21	17

Примітка. \*всіх індексів.

**Приклад 4.** Довжина приймально-відправних колій станції  $l_{\text{пвк}} = 1050$  м. Перевірити можливість прийому на станцію поїзда, сформованого з чотиривісних піввагонів середньої ваги (брутто) 840 кН і локомотива 2ТЭ116, який забезпечує водіння поїздів по ділянці з розрахунковою вагою складу 60 000 кН.

*Рішення.*

1. Визначимо число вагонів в составі

$$n_4 = 60000 / 840 = 71 \text{ ваг.}$$

2. Визначимо довжину поїзда.

З табл. 7.7 знаходимо довжину вагона  $l_{\text{в}} = 14$  м, локомотива  $l_{\text{л}} = 36$  м. Тоді

$$l_{\text{с}} = 71 \cdot 14 = 994 \text{ м;}$$

$$l_{\text{пвк}} > l_{\text{п}} = 994 + 36 + 10 = 1040 \text{ м.}$$

Умова дотримується, прийом поїзда на станцію можливий.

## 7.6. Принципи встановлення норм ваги состава

Якщо поїзд слідує на досить велику відстань, то цілком ймовірна ситуація, при якій розрахункові ваги состава для окремих перегонів, що входять до ділянки обороту, можуть значно відрізнятись один від одного. Змінювати локомотиви, щоб провести поїзд однієї ваги состава по всій ділянці, не завжди доцільно. Тому встановлюють уніфіковану вагу состава на весь напрямок для однієї і тієї ж серії локомотивів.

*Уніфікованою називається вага состава, яку певний тип локомотива здатний провезти без переробки (причеплення, відчеплення вагонів з метою зміни ваги состава) по всіх ділянках розглянутого полігону тяги.*

Уніфікована вага встановлюється за умовами проходження найбільш важкої ділянки. Для оцінки можливості збільшення уніфікованої ваги состава зазвичай будують *тонно-кілометрову діаграму*.

## 7.7. Побудова тонно-кілометрової діаграми

Для кожної ділянки визначають розрахункову вагу состава. Вагу состава замінюють відповідною масою в тонах за формулою:

$$M_Q = \frac{Q}{g}.$$

У прийнятому масштабі будується графік. По осі абсцис наносять перегони розглянутої ділянки обороту. На кожному перегоні вказують його довжину та величину розрахункового підйому. По осі ординат в масштабі відкладають розрахункову масу состава для кожного перегону (рис. 7.2).

З побудованої діаграми видно, що состав масою 3400 т, визначеної для другого перегону, може бути проведений без переробки обраним локомотивом по всій ділянці. По всіх інших ділянках тієї ж серії обраний локомотив може провезти состав набагато більшої маси.



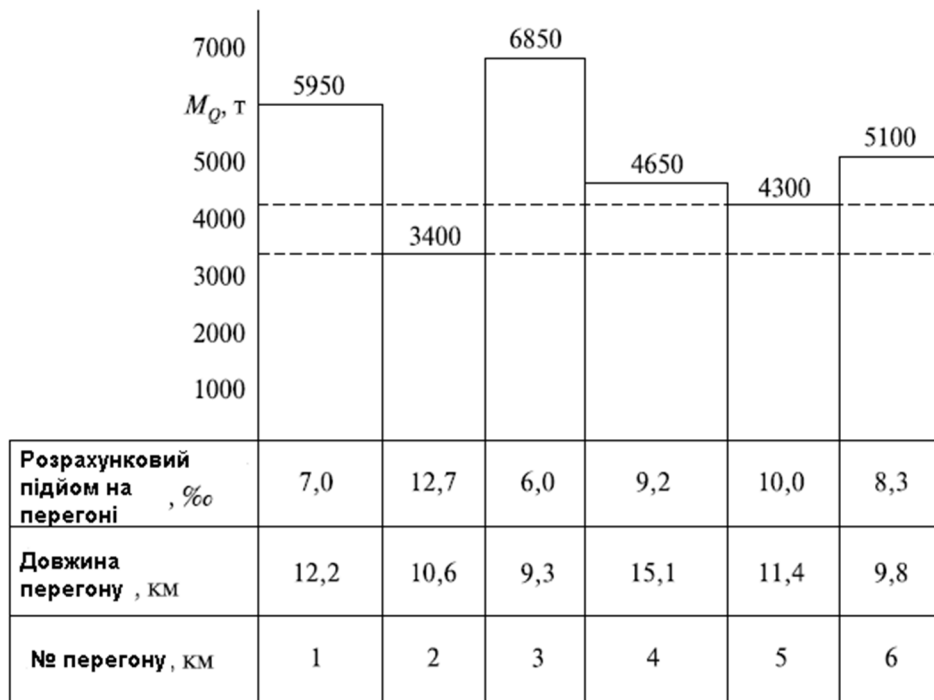


Рис. 7.2. Приклад побудови тонно-кілометрової діаграми

Подальший аналіз тонно-кілометрової діаграми та умов руху поїзда може підказати необхідні заходи з метою збільшення уніфікованої ваги состава. Наприклад, застосувати другий локомотив в якості штовхача на другому перегоні в найбільш важкому для руху поїзда місці. Цей захід дозволить підвищити масу состава до 4300 т і встановити уніфіковану вагу состава  $Q = 4300 \cdot 9,81 = 42183 \approx 42000$  кН для всієї ділянки обороту.

### Питання для самоконтролю

1. За яких умов визначається вага состава?
2. Що таке розрахунковий підйом розглянутої ділянки?
3. Що розуміється під коротким (інерційним) підйомом?
4. У чому полягають принципи вибору розрахункового підйому заданої тягової ділянки?
5. Назвіть умову для перевірки ваги состава під час зрушення поїзда з місця.
6. Як перевіряють вагу состава за довжиною приймально-відправних колій станції?
7. Що таке уніфікована вага состава?

## Швидкість і час руху поїзда

### 8.1. Основні принципи визначення швидкості руху поїзда

Визначення швидкості руху поїзда певної маси по ділянці колії можна виконати аналітичним, графо-аналітичним або чисельним методами.

Характеристику швидкості руху поїзда, представлену на графіку у функції від шляху, називають *кривою швидкості* руху.

Аналітичний метод розрахунку швидкості руху поїзда заснований на визначенні рівноважних швидкостей на ухилах елементів поздовжнього профілю. По суті, це завдання, обернене визначенню ваги состава. Для його вирішення необхідні вихідні дані:

- тип локомотива, його маса, тягова характеристика;
- характеристика та маса состава;
- детальні відомості про ділянку експлуатації – план і профіль колії.

Швидкість руху заданого поїзда на заданій ділянці, крутизною  $i^*$ , визначають, розв'язуючи рівняння у разі рівномірного руху, коли

$$F_d = W_d, \quad (8.1)$$

де функція  $F_d = f_1(v)$  задана за умовою.

Права частина рівняння

$$W_d = W'_0 + W''_0 \pm W_i,$$

включає:

- повний основний опір локомотива

$$W_0' = f_2'(v)P;$$

– повний основний опір состава

$$W_0'' = f_2''(v)Q;$$

– додаткові опори від профілю шляху

$$W_i = i_*(P + Q).$$

В результаті виходить розгорнута форма рівняння руху поїзда на ухилі  $i_*$

$$f_1(v) = f_2'(v)P + f_2''(v)Q + i_*(P + Q). \quad (8.2)$$

Отримане рівняння слід розв'язувати відносно змінної  $v$  і тоді на  $i = i_*$  можна визначити рівноважну швидкість  $v_*$ . Потім, підставляючи в рівняння значення наступних ухилів, отримаємо рівноважні швидкості для цих ухилів.

*Швидкості усталеного рівномірного руху на ухилах елементів поздовжнього профілю називаються рівноважними.*

За результатами розрахунків для декількох ухилів будують графік залежності  $v_* = f(i)$ , за яким знаходять значення рівноважних швидкостей для ухилів всіх елементів ділянки шляху.

Дане завдання вирішується за допомогою обчислювальної техніки.

Рівноважні швидкості для різних ухилів поздовжнього профілю можуть бути отримані також шляхом графоаналітичного побудови.

Спочатку вирішується рівняння  $F_d = W_0$ , яке відповідає руху поїзда на прямому горизонтальному шляху. Тут

$$W_0 = \omega_0'P + \omega_0''Q. \quad (8.3)$$

В системі координат "сила-швидкість" будується графік тягової характеристики заданого локомотива  $F_d = f_1(v)$ . У цій же системі координат будується графік  $W_0 = f_2(v)$  повного основного опору руху поїзда на прямому горизонтальному шляху. Точка перетину графіків сили тяги та основного опору дає рівноважну швидкість  $v_*$  руху прийнятої маси поїзда на прямому горизонтальному шляху.

Потім проводиться розрахунок  $W_d = f(v)$  під час руху поїзда на важких підйомах  $i^*$ , на яких встановлюється рівноважна швидкість, за якої  $F_d = W_d$ . Отримані значення  $W_{d^*} = f_{i^*}(v)$  служать для побудови графіків в тій же системі координат. Точка перетинів графіків дає значення рівноважних швидкостей для заданого поїзда.

**Приклад 1.** Поїзд масою  $M_Q = 3000$  т везе тепловоз з гідропередачею ТГ16 (ТГ102)  $M_P = 164$  т. Состав складається з чотиривісних навантажених вагонів масою  $m = 60$  т. Визначити рівноважні швидкості для заданого профілю ділянки колії (табл. 8.1) та визначити час ходу по всій ділянці.

Таблиця 8.1

Профіль колії

№ перегону	1	2	3	4	5	6	7
$i, \%$	0	-3	0	9	0	6	0
$S, \text{ м}$	1300	700	400	2500	600	3000	2000

*Рішення.*

1. З ПТР знаходять значення тягової характеристики (кГс) теплового ТГ102 і переводять їх в систему СІ. За отриманими значеннями сили тяги  $F_d$  будується графік (рис. 8.1) у функції швидкості руху.

2. Розраховуються і зводяться в табл. 8.2а та 8.2б значення:

$$W'_0 = f'_2(v)P; \quad W''_0 = f''_2(v)Q; \quad W_0 = \omega'_0 P + \omega''_0 Q,$$

де  $P = M_P g = 164 \cdot 9,81 = 1600$  кН;  $Q = M_Q g = 3000 \cdot 9,81 = 29400$  кН.

3. Задаючись різними значеннями  $i^*$ , визначають значення  $W_{d^*} = f_{i^*}(v)$  і результати розрахунку також записують в табл. 8.2а і 8.2б.

4. У тих же координатах на графіку рис. 8.1 будують залежності  $W_0 = f_2(v)$  і  $W_{d^*} = f_{i^*}(v)$ . По точкам (1, 2, 3, 4) перетинів графіків  $F_d$  і  $W_{d^*}$  знаходяться рівноважні швидкості за різних значеннях  $i^*$ .

Рівноважні швидкості руху поїзда в залежності від величини ухилу записують в табл. 8.3.

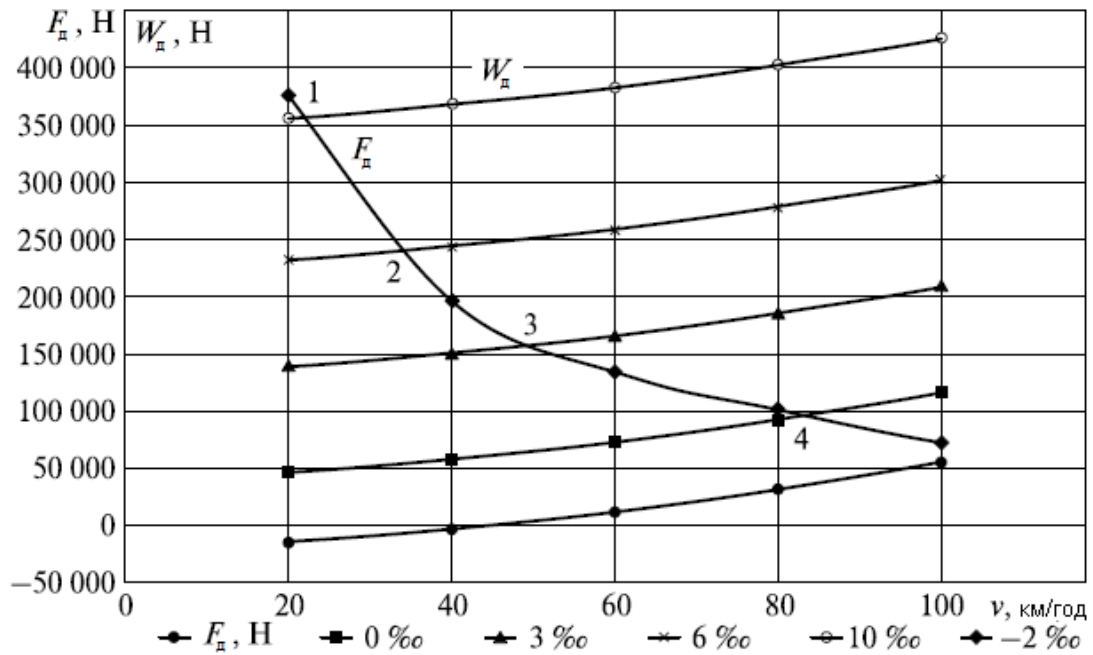


Рис. 8.1. Графічне визначення рівноважних швидкостей для ухилів і профілю колії

Таблиця 8.2а

**Визначення рівноважних швидкостей в залежності від ухилів і режиму руху**

$v$ , км/год	$F_d$ , Н	$\omega'_0$ , Н/кН	$W'_0$ , Н	$\omega''_0$ , Н/кН	$W''_0$ , Н	$W_0$ , Н, $i = 0$	$i_3 = 3\text{‰}$ , $W_{д3} = W \times$ $\times (P + Q)$ , Н	$i_3 = 6\text{‰}$ , $W_{д3}$ , Н	$i_4 = 10\text{‰}$ , $W_{д4}$ , Н
20	375 700	2,22	3552	1,45	42 630	46 182	139 182	232 182	356 182
40	196 200	2,78	4448	1,8	52 920	57 368	150 368	243 368	367 368
60	133 416	3,58	5728	2,26	66 444	72 172	165 172	258 172	382 172
80	101 043	4,62	7392	2,88	84 672	92 064	185 064	278 064	402 064
100	71 613	5,9	9440	3,62	106 428	115 868	208 868	301 868	425 868

За отриманими значенням рівноважних швидкостей в залежності від ухилів будують графік, показаний на рис. 8.2, де по осі ординат відкладаються значення ухилів і (підйомів), по осі абсцис – швидкість  $v$  руху поїзда. Цей графік дозволяє легко встановити рівноважні швидкості на заданій ділянці шляху (рис. 8.3).

Таблиця 8.2б

$v$ , км/год	$\omega'_x$ , Н/кН	$W'_x$ , Н	$\omega''_0$ , Н/кН	$W''_0$ , Н	$W_{0x}$ , Н	$W_{д5}$ , Н $i_5 = -2\%$
20	2,76	4400	1,45	42630	47030	-14970
40	3,4	5440	1,8	52920	58360	-3640
60	4,32	6912	2,26	66444	73356	+11356
80	5,52	8832	2,88	84672	93504	+31504
100	7,0	11200	3,62	106428	117628	+55628

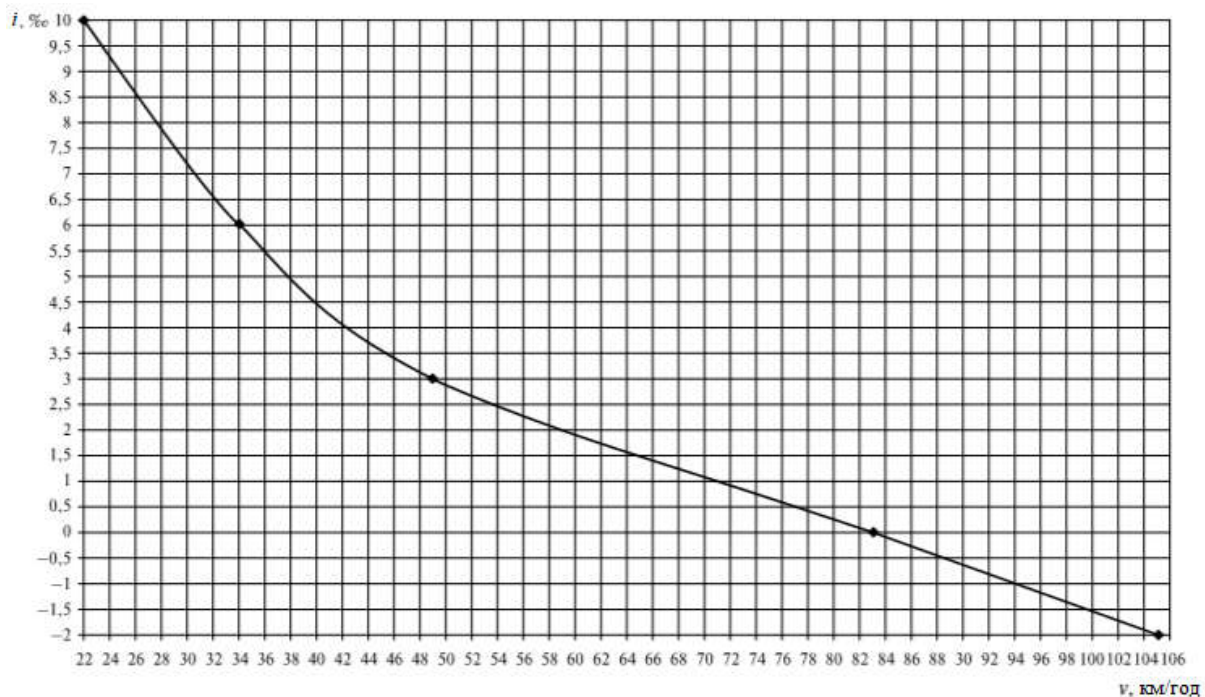


Рис. 8.2. Допоміжний графік для встановлення рівноважних швидкостей поїзда на елементах заданого профілю колії

Результати розрахунків, наведені в табл. 8.2а і 8.2б, для руху поїзда в режимах тяги та вибігу для різних ухилів колії нанесені на графік, показані на рис. 8.1. Точки перетину тягової характеристики  $F_d = f_1(v)$  з характеристиками повних опорів руху поїзда  $W_d = f(v)$  на різних ухилах  $i$  є шукані рівноважні швидкості.

Координати встановлених рівноважних швидкостей зводяться в табл. 8.3, і по ним будується допоміжна характеристика, показана на рис. 8.2. За допомогою допоміжної характеристики будується графік рівноважних швидкостей на заданій ділянці експлуатації (рис. 8.3).

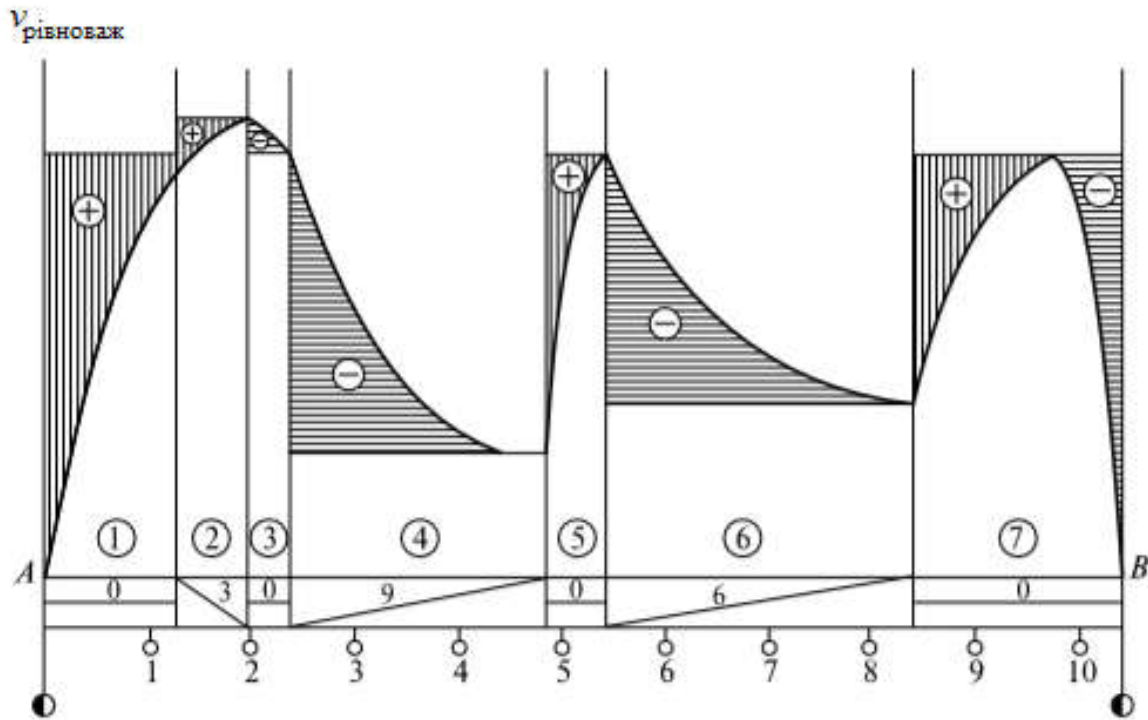


Рис. 8.3. Графік рівноважних (сталих) швидкостей руху поїзда під час руху по різних елементах профілю колії

Таблиця 8.3

**Координати рівноважних швидкостей**

Ухил $i^*$ , ‰	-2	0	3	6	10
Рівноважні швидкості $v_i^*$ , км/год	10	83	49	34	22

На рис. 8.3 побудований графік  $v(S)$ . По осі абсцис відкладено профіль заданої ділянки колії, горизонтальні лінії відповідають рівноважним швидкостям на кожному елементі, знайденому за допоміжним графіком на рис. 8.2. На першому елементі  $i = 0$  і швидкість  $v^* = 83$  км/год. На другому елементі – спуску, крутизною  $i = -3$  ‰ поїзд переходить в режим вибігу і може досягти рівноважної швидкості більше  $v^* = 100$  км/год. За табл. 8.4 визначається рівноважна швидкість на спуску<sup>2</sup> крутизною  $i = -3$  ‰ ( $v^* = 90$  км/год).

<sup>2</sup> Допустиму швидкість на спуску для поїздів, що мають розрахунковий гальмівний коефіцієнт не менше 0,33, рекомендується встановлювати в залежності від крутизни спуску за табл. 8.4.

## Допустима швидкість на спуску

$i, ‰$	до -10	-11...-15	-16...-20	-21...-24	-25...-30
$n, \text{км/год}$	90	70	55	50	40

Час руху поїзда по кожному елементу профілю колії за рівноважну (сталу) швидкість визначається за формулою:

$$t = \frac{60S}{v_{\text{рівноваж}}}. \quad (8.4)$$

Щоб визначити час ходу по перегону або ділянці, значення  $t$  на кожному елементі колії підсумовують. Результати таких розрахунків записують в табл. 8.5.

Таблиця 8.5

## Час ходу по перегону

Перегін	№ елемента	Довжина елемента, км	Ухил, ‰	Рівноважна швидкість, км	Час проходження елемента, хв	Поправка на розгін та уповільнення, хв	Час ходу по перегону, хв
<i>A</i>	1	1,3	0	83	0,94	2,0	2,94
–	2	0,7	-3,0	90	0,46	–	3,4
–	3	0,4	0	83	0,29	–	3,69
–	4	2,5	9,0	25	6,0	–	9,69
–	5	0,6	0	83	0,43	–	10,12
–	6	3,0	6,0	34	5,29	–	15,41
<i>B</i>	7	2,0	0	83	1,44	1,0	17,85

Насправді поїзд досягає рівноважної швидкості дуже рідко. На першому елементі йде розгін і швидкість поїзда, як правило, не досягає сталого значення, а на підйомах швидкість може змінюватися у великому діапазоні.

Час  $t_p$ , необхідний на розгін поїзда після зупинки, і  $t_r$ , що витрачається на гальмування до зупинки на роздільному пункті, враховують, вводячи відповідні виправлення. Виправлення на розгін поїзда  $t_p$  в середньому приймається рівним 2 хв, а на уповільнення поїзда – 1 хв.



Для електропоїздів поправку на розгін приймають рівною 0,5 хв, а на уповільнення – 0,4 хв.

Отже, час ходу по перегону  $t_{\text{п}}$ , хв, складе

$$t_{\text{п}} = 60 \sum \frac{S_i}{v_i} + t_{\text{р}} + t_{\text{г}}. \quad (8.5)$$

Метод рівноважних швидкостей використовується для оцінки часу ходу для попередніх наближених розрахунках на ділянках, що підлягають модернізації або електрифікації.

## 8.2. Графічний метод побудови кривої швидкості

Графічний метод розв'язання рівняння руху поїзда заснований на геометричному зв'язку між питомими прискорюючими або сповільнюючими силами в кожному інтервалі швидкостей, часом ходу та відстанню, що проходиться.

Для побудови кривої швидкості в масштабі на міліметровому папері будується діаграма прискорюючих і уповільнюючих сил розрахункового поїзда. Потім спрямлений профіль колії наноситься на міліметровий папір окремо для кожного напрямку (туди і назад), відкладаючи на осі абсцис шлях  $S$  в масштабі  $u$ . За характеристикою  $f_{\text{д}} - \omega_0 = f_y(v)$  діаграми за допомогою лінійки та косинця будується крива  $v(S)$  у масштабі  $m$  руху поїзда в режимі тяги, для чого задаються інтервалами зміни швидкості  $\Delta v$ .

Під час проходження локомотива в режимі тяги інтервал зміни швидкості  $\Delta v$  приймають до виходу на автоматичну характеристику сили тяги – не більше 10 км/год, потім – не більше 5 км/год. Якщо локомотив прямує на холостому ході (вибігу),  $\Delta v$  не повинне перевищувати 10 км/год; в режимі гальмування за швидкості вище 50 км/год – не більше 10 км/год, а за швидкості менше 50 км/год – не більше 5 км/год.

Побудову кривої швидкості (рис. 8.4) починають з моменту зрушення поїзда зі станції  $A$ , розташованої на майданчику, тобто  $i = 0$  ‰.

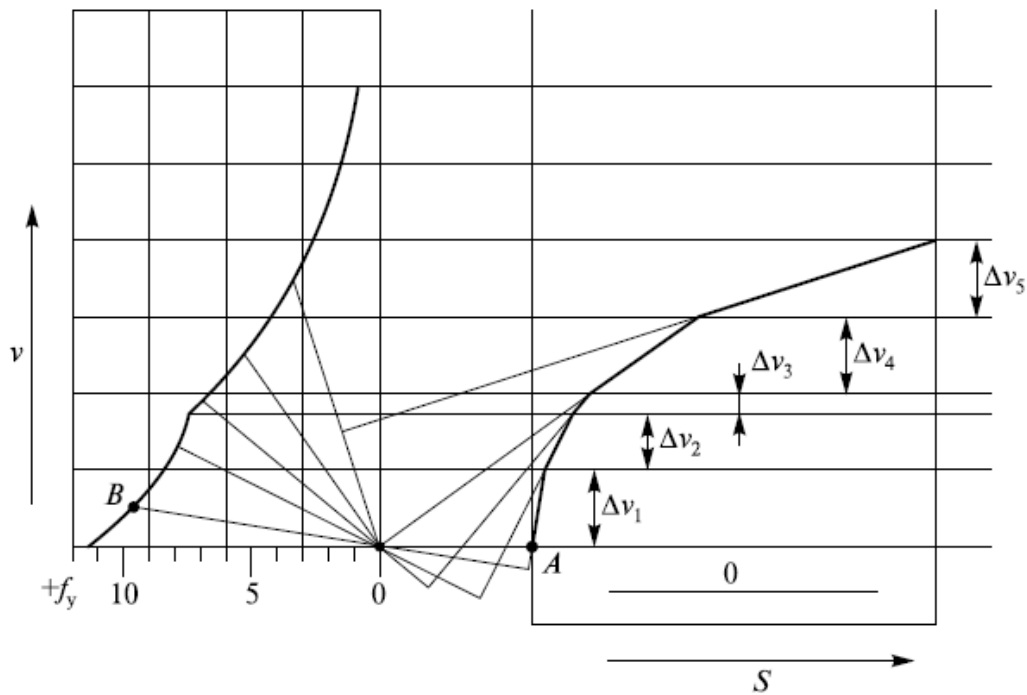


Рис. 8.4. Побудова кривої швидкості під час проходження локомотива в режимі тяги з поїздом на площадці

Діаграму попередньо поєднують абсцисою з нанесеним профілем колії. Потім задають перший приріст швидкості  $\Delta v = 10$  км/год. На характеристиці  $f_d - \omega_o = f_y(v)$  відзначають точку  $B$ , відповідну середній величині прирощення швидкості  $\Delta v_1/2$ . До початку координат  $O$  і середній точці  $B$   $f_y(v)$  першого інтервалу швидкостей  $\Delta v_1$  діаграми прикладають лінійку. До лінійки та початку побудови швидкості (станція  $A$ ) прикладають катетом прямокутний трикутник. З точки  $A$  проводять перпендикуляр (до лінійки) до перетину з горизонталлю, що відповідає збільшенню швидкості  $\Delta v_1$ . Так отримують першу ланку кривої швидкості, на якій швидкість поїзда збільшується від 0 до 10 км/год.

Подальша побудова кривої швидкості виконують аналогічно, тільки інтервал швидкості  $\Delta v_2$  приймають від 10 км/год до точки перетину характеристики прискорюючих сил  $f_y(v)$  діаграми.

Криву швидкості при проходженні локомотива в режимі тяги на підйомі будують таким же чином, тільки лінійку прикладають не до початку координат  $O$ , а до точки, що відповідає величині підйому. Тим самим зменшують питому прискорюючу силу  $f_d - \omega_o = f_y(v)$  на величину опору від підйому  $i_d$  (рис. 8.5).

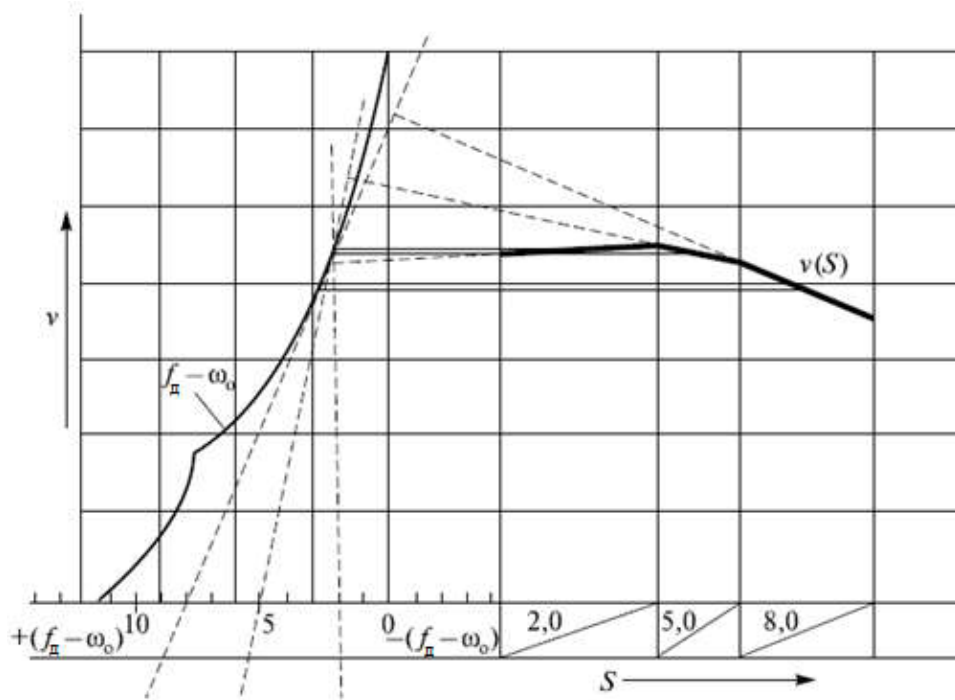


Рис. 8.5. Побудова кривої швидкості під час проходження локомотива в режимі тяги з поїздом на елементах з підйомами різної крутизни

Якщо поїзд прямує по спуску в режимі тяги, то до  $f_y(v)$  додають величину сили опору від ухилу  $i_d$  (рис. 8.6).

Для поїзда на вибігу (локомотив на холостому ході) під час побудови кривої швидкості замість характеристики прискорюючих сил використовують характеристику на діаграмі питомого опору руху поїзда  $\omega_{ox}(v)$ .

Якщо рух поїзда відбувається в режимі гальмування, то під час побудови кривої швидкості використовують на діаграмі характеристику питомих сповільнюючих сил гальмування  $b_r + \omega_{ox}$  (рис. 8.7).

**Приклад 2.** Побудувати графічним способом криву швидкості та часу руху поїзда від станції *A* до станції *B*: маса складу  $M_Q = 3000$  т, тепловоз ТГ16(ТГ102),  $M_P = 164$  т. Состав складається з чотиривісних навантажених вагонів масою  $m = 60$  т. Гальмівний коефіцієнт  $\vartheta = 0,33$ . Спрямований профіль колії представлений в табл. 8.1.

*Рішення.*

1. Побудуємо діаграму питомих сил для даного поїзда. Таблично проводимо розрахунок питомих сил: прискорювальних, холостого ходу та службового гальмування поїзда, використовуючи результати розрахунків у попередньому прикладі (фрагмент наведено в табл. 8.6).

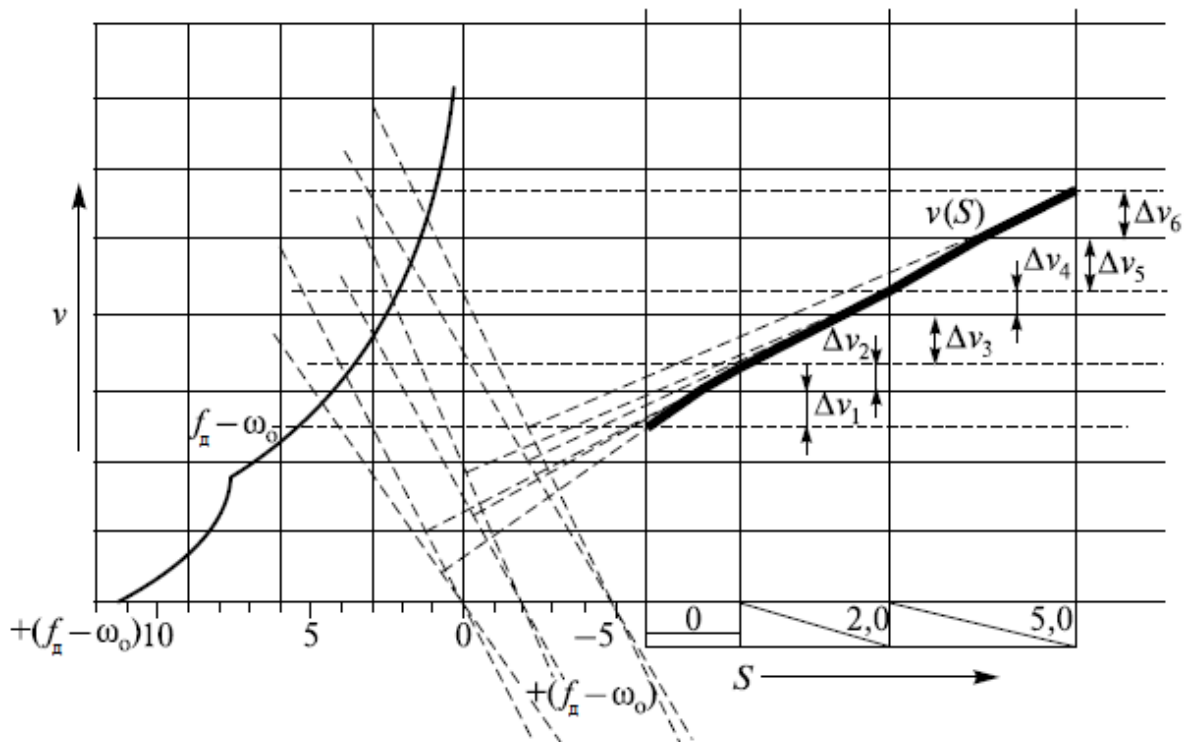


Рис. 8.6. Побудова кривої швидкості під час проходження локомотива в режимі тяги з поїздом на елементах зі спусками різної крутизни

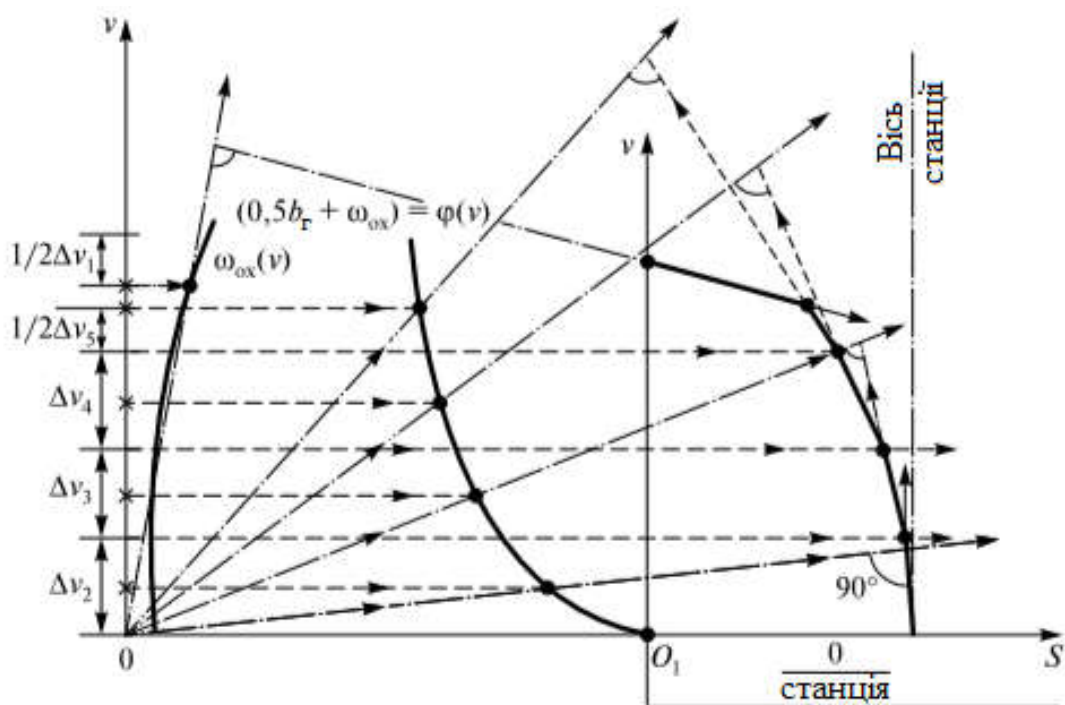


Рис. 8.7. Побудова кривої швидкості у разі гальмування до повної зупинки поїзда

Попередньо визначаємо вагу состава

$$Q = M_Q g = 3000 \cdot 9,81 = 29400 \text{ кН},$$

та вагу локомотива

$$P = M_P g = 164 \cdot 9,81 = 1600 \text{ кН}.$$

Таблиця 8.6

### Питомі сили поїзда

$v$ , км/год	$F_d$ , Н	$W_0$ , Н	$F_y$ , Н	$f_d$ , Н/кН	$W_{0x}$ , Н	$\omega_{0x}$ , Н/кН	$\varphi_{кр}$	$0,5b_r$ , Н/кН	$f_{yг}$ , Н/кН
20	375 700	46 182	329 518	10,63	47 030	-1,52	0,162	26,73	-29,75
40	196 200	57 368	138 832	4,48	58 360	-1,88	0,126	20,79	-22,67
60	133 416	72 172	61 244	1,98	73 356	-2,37	0,108	17,82	-20,39
80	101 043	92 064	8979	0,29	93 504	-3,02	0,102	16,005	-19,025
100	71 613	115 868	-44 255	-1,43	117 628	-3,8	0,097	14,50	-18,3

Для подальших рішень і графічних побудов виберемо масштаб для побудови діаграми, а також кривої швидкості та часу руху поїзда на заданій ділянці. Нехай масштаб шляху  $y = 20$  мм/км; питомих сил  $k = 6$  мм/(Н/кН), тоді масштаб швидкості знаходимо за формулою:

$$m = \sqrt{\frac{ky}{\zeta}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 20}{120}} = 1 \text{ мм}/(\text{Н}/\text{кН}). \quad (8.6)$$

На міліметровому масштабнo-координатному папері побудуємо діаграму питомих прискорюючих і питомих сповільнюючих сил тепловоза ТГ102 і прийнятого поїзда (рис. 8.8) за розрахунковими значеннями табл. 8.6. Потім, на тому ж папері нанесемо в масштабі заданий (див. табл. 8.1) профіль колії. За описаними вище правилами будуємо криву швидкості від станції А до станції В і криву часу (рис. 8.9).

Аналіз результатів, отриманих на графіку швидкості руху поїзда та часу, дозволяє зробити наступні висновки.

Порівняльні розрахунки з використанням методу рівноважних (сталі) швидкостей та графічного методу для одного і того ж поїзда й на тому ж профілі ділянки АВ протяжністю 10,5 км показали, що технічні

швидкості руху по елементах профілю значно різняться, а час руху поїзда, отриманий методом рівноважних швидкостей ( $t = 17,85$  хв) і графічним методом ( $t = 18,1$  хв), має збіжність.

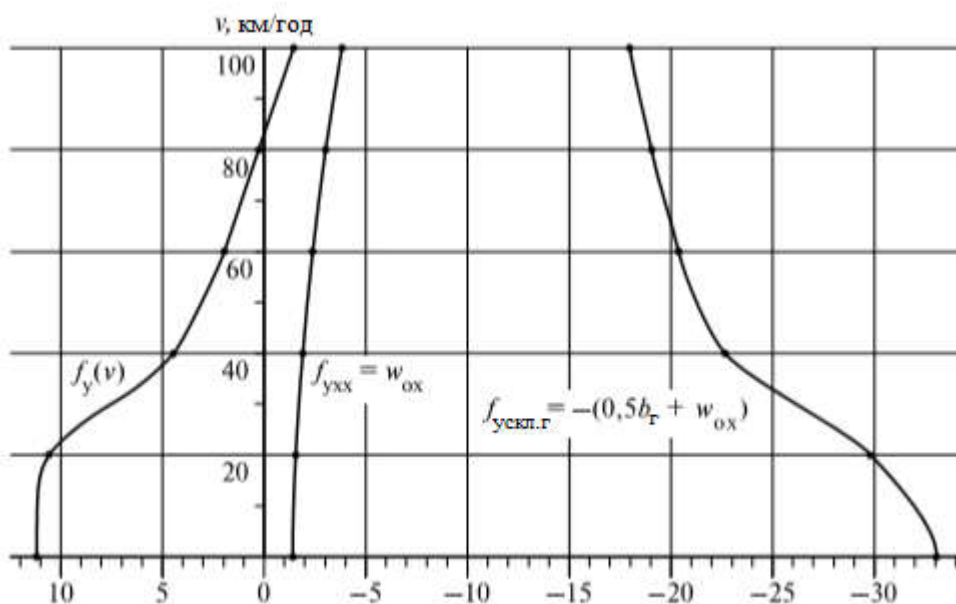


Рис. 8.8. Діаграма питомих прискорюючих і сповільнюючих сил поїзда з тепловозом ТГ16 (ТГ102)

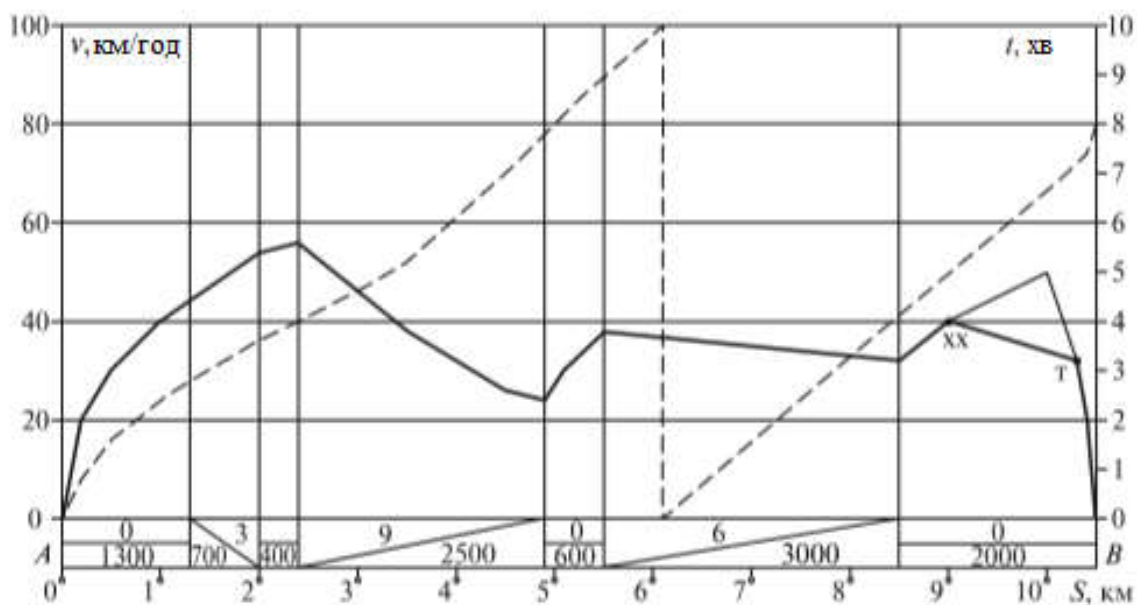


Рис. 8.9. Крива швидкості та часу руху поїзда від станції А до станції В, побудовані графічним способом

### 8.3. Чисельні методи розв'язання рівняння руху поїзда

Для розв'язання рівняння руху поїзда за допомогою ЕОМ використовуються чисельні методи інтегрування. Принципово вони аналогічні аналітичному та графічному методам. Відмінності полягають лише в математичній формалізації залежностей  $f_d(v)$ ,  $b_r(v)$  і розв'язанні рівняння руху поїзда. Суть чисельних методів полягає в заміні нелінійного диференціального рівняння руху поїзда лінійним диференціальним, рішення якого з достатньою для практики точністю наближається до вирішення нелінійного рівняння, тобто в лінеаризації рівняння руху шляхом заміни його лінійним рівнянням з постійними коефіцієнтами.

Основним допущенням, як і в розглянутих вище методах, є *принцип малих відхилень*, що входять в рівняння координат від тих значень, які прийняті в якості вихідних для лінеаризації.

Відомо багато різних методів чисельного інтегрування диференціальних рівнянь: Л. Ейлера, Чаплигіна, Рунге-Кутта, Адамса і ін., академік А. Н. Крилов розділив прийоми знаходження наближених рішень диференціальних рівнянь на групи:

- 1) розкладання загального інтеграла в ряди;
- 2) застосування способу послідовних наближень;
- 3) наближене чисельне інтегрування.

Під час виконання тягових розрахунків одним з методів чисельного інтегрування досить знайти частинне рішення, що задовольняє початковим умовам, у вигляді таблиці або графіка кривої, що представляють рішення рівняння руху поїзда.

### 8.4. Методика розрахунку швидкості руху з урахуванням довжини та розподіленої ваги поїзда

В умовах моделювання руху поїзда з параметрами – маса 15...20 тис т, довжина – 2...3 км і більше традиційні методи теорії локомотивної тяги потребують уточнення.

Існуючі наближені методи вирішення диференціального рівняння руху поїзда з урахуванням його ваги та довжини, розроблені Н. Е. Жуковським, С. А. Чаплигіним, А. Н. Криловим, не знайшли практичного

застосування через їх складність та недостатню точність. У разі знаходження поїзда одночасно більше ніж на 5...10 елементах профілю рішення рівняння руху поїзда цими методами практично неможливе навіть з використанням ЕОМ, а поїзди довжиною 1,5...2,0 км розташовуються одночасно на 15...20 елементах попакетного (довжина елемента 100 м) профілю. Використання спрямленого звичайним методом профілю не забезпечує необхідної точності рішень.

Більш простим і досить точним є метод побудови розрахункового тягового профілю з урахуванням довжини та ваги поїзда. При цьому рівняння руху поїзда вирішується традиційними способами (аналітичним або графічним), а змінюється тільки метод підготовки вихідного профілю колії для розрахунків. Перед входом поїзда на ухил  $i_2$  (рис. 8.10) його повний опір руху (положення 1)

$$W_1 = P(\omega'_0 + i_1) + Q(\omega''_0 + i_1). \quad (8.7)$$

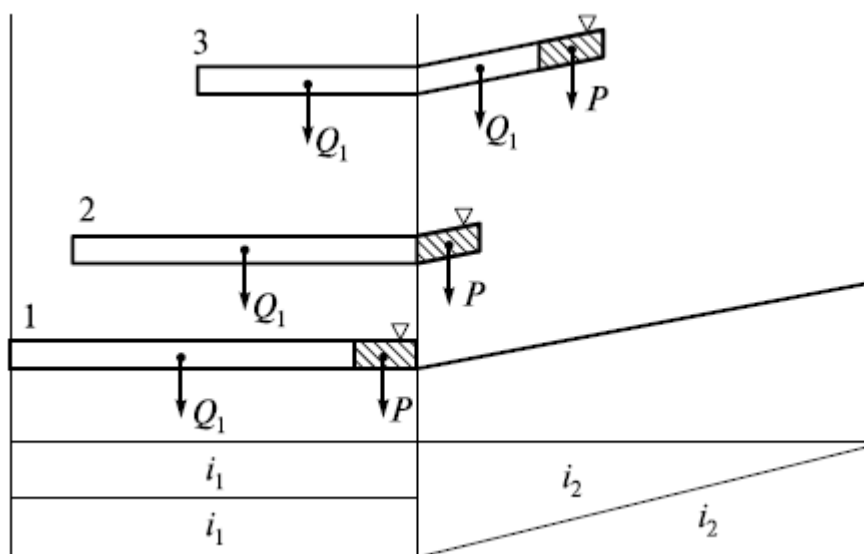


Рис. 8.10. Варіанти розташування поїзда на елементах профілю

У положенні 2 повний опір руху поїзда

$$W_2 = P(\omega'_0 + i_2) + Q(\omega''_0 + i_2). \quad (8.8)$$

що рівнозначно вступу поїзда на еквівалентний ухил  $i_{сп2}$



$$W_2 = P\omega'_0 + Q\omega''_0 + (P + Q)i_{cp2}. \quad (8.9)$$

Зі зіставлення виразів (8.7) і (8.8) знаходимо

$$i_{cp2} = \frac{Pi_2 + Qi_1}{P + Q}. \quad (8.10)$$

У положенні 3 повний опір поїзда

$$W_3 = P\omega'_0 + Q\omega''_0 + (P + Q_1)i_2 + Q_2i_1, \quad (8.11)$$

або

$$W_3 = P\omega'_0 + Q\omega''_0 + (P + Q_1)i_{cp3}. \quad (8.12)$$

Зі зіставлення виразів (8.11) і (8.12) отримаємо

$$i_{cp3} = \frac{Pi_2 + Q_1i_2 + Q_2i_1}{P + Q},$$

де  $Q_1$  – частина ваги состава, яка розташовується на другому елементі профілю колії;

$Q_2$  – інша частина ваги состава, яка ще знаходиться на першому елементі профілю колії.

При розташуванні поїзда на трьох елементах профілю колії

$$W = P\omega'_0 + Q\omega''_0 + Pi_3 + Q_1i_3 + Q_2i_2 + Q_3i_1,$$

або

$$W = P\omega'_0 + Q\omega''_0 + (P + Q)i_{cp}.$$

Звідси середнє значення ухилу, що діє на поїзд в цьому положенні, дорівнює

$$i_{\text{cp}} = \frac{Pi_3 + Q_1i_3 + Q_2i_2 + Q_3i_1}{P + Q}.$$

Цей спосіб побудови розрахункового (з урахуванням довжини та ваги поїзда) профілю колії, основні положення якого запропоновані Ю. В. Ломоносовим, доцільно застосовувати в тому випадку, коли заданий докладний попикетний профіль і план колії. Застосування попикетного профілю хоча і збільшує обсяг розрахунків, але компенсується значним підвищенням точності для визначення швидкості руху поїзда. У цьому випадку вираз для середнього ухилу, що діє на поїзд (рис. 8.11, *a*), приймає вигляд:

$$i_{\text{cp}} = \frac{Pi_m + Q_1i_m + Q_2i_{m-1} + \dots + Q_{n-1}i_2 + Q_ni_1}{P + Q}. \quad (8.13)$$

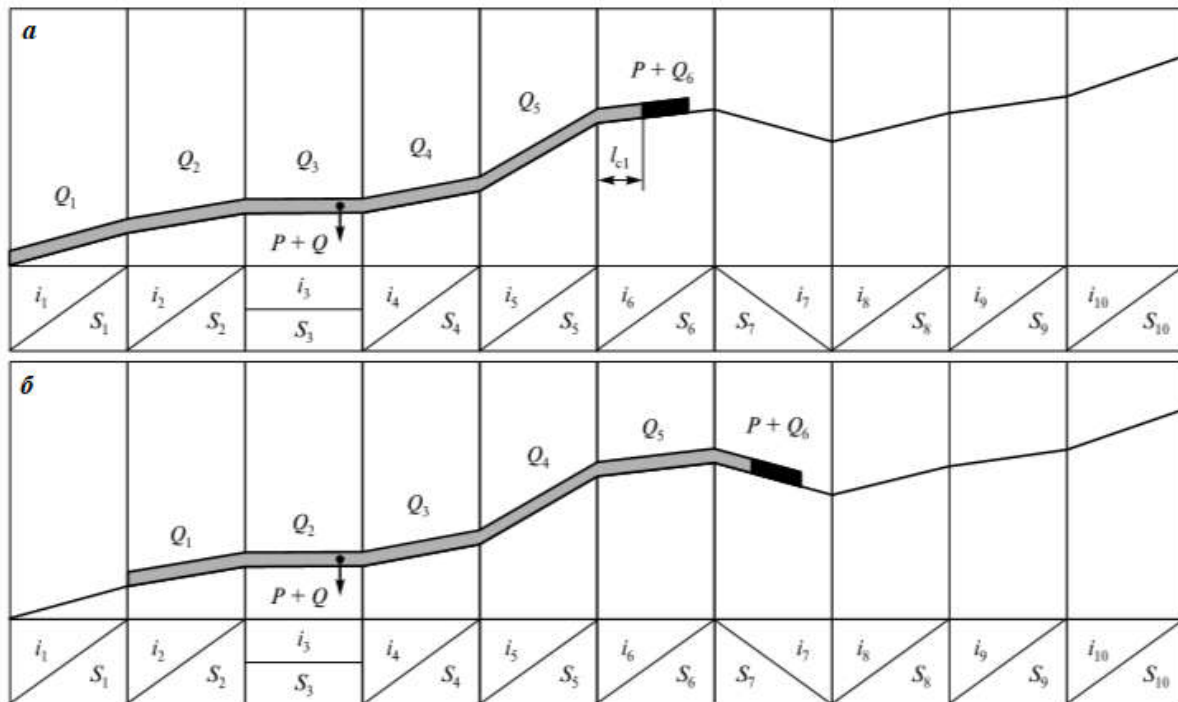


Рис. 8.11. Детальний пікетний профіль для визначення «миттєвих» та «середніх» (розрахункових) значень ухилів, що діють на поїзд:  
*a* – перше положення поїзда; *b* – друге положення поїзда

Розрахунки виконуються в наступній послідовності. Спочатку ви-

значається середньостатистична довжина та вага поїзда (в кілоньютонах). Якщо на ділянці є криві, вони замінюються наведеними ухилами на кожному елементі попінетного профілю, на якому вони розташовані

$$i_k = \pm i + \omega_r.$$

Якщо припустити, що вага  $Q$  складу рівномірно розподілена по його довжині  $l_c$ , то вираз (8.13) для першого положення поїзда (див. рис. 8.11, а) прийме вигляд

$$i_{cp1} = \frac{\left( P + Q \frac{l_{c1}}{l_c} \right) i_m + Q \frac{100}{l_c} (i_{m-1} + \dots + i_2 + i_1)}{P + Q}, \quad (8.14)$$

тому що на попінетному профілі  $Q_2 = Q_3 = \dots = Q_n = Q(100 / l_c)$ .

Тому що  $Q_1 = Q(l_{c1}/l_c)$ , то вираз (8.13) можна представити у вигляді

$$i_{cp1} = A i_m + B (i_{m-1} + i_{m-2} + \dots + i_2 + i_1). \quad (8.15)$$

Звідси

$$A = \frac{P + Q \frac{l_{c1}}{l_c}}{P + Q} \quad \text{та} \quad B = \frac{Q \frac{100}{l_c}}{P + Q}, \quad (8.16)$$

де  $l_c$  – загальна довжина состава, м;

$l_{c1}$  – довжина частини состава, що розташовується на одному з локомотивом елементі профілю, м.

Для зручності розрахунків кінцеву точку поїзда "прив'язують" до межі елемента профілю. Переміщаючи поїзд вперед на 100 м, отримують вираз для другого положення поїзда (рис. 8.11, б)

$$i_{cp2} = A i_{m+1} + B (i_m + i_{m-1} + \dots + i_2).$$

Для третього положення

$$i_{cp3} = Ai_{m+2} + B(i_{m+1} + i_m + \dots + i_3).$$

і т.д.

Отримані значення середніх ухилів  $i_{cp}$  представляють значення ухилів, в кожен момент часу відповідним положенням поїзда: 1, 2, 3 і т.д. Для розрахунків необхідно мати безперервний профіль. Для цього визначають розрахункові значення ухилів як середні алгебраїчні між двома сусідніми  $i_{cp}$

$$i_{p1} = \frac{\pm i_{cp1} \pm i_{cp2}}{2},$$

$$i_{p2} = \frac{\pm i_{cp2} \pm i_{cp3}}{2}.$$

Значення ухилів в усі формули необхідно підставляти зі своїми знаками. Значення ухилів в кожен момент часу можуть бути приведені не тільки для центру ваги поїзда, але і для будь-якої точки. Так, наприклад, якщо "прив'язати" миттєві та розрахункові значення ухилів для голови поїзда, то можна потім проводити безпосереднє порівняння розрахункових значень швидкості з показаннями вимірювача швидкості на локомотиві або з даними швидкостемірної стрічки.

Для скорочення обсягу розрахунків, коли доводиться виконувати побудову кривих швидкості для одної і тієї ж ділянки колії неодноразово, необхідно один раз побудувати криву швидкості по розрахунковому тяговому профілю, а потім об'єднати кілька елементів розрахункового профілю в ділянки, на яких крива швидкості може бути замінена прямими відрізками. Практика показує, що при цьому число елементів профілю на перегоні можна порівняти з числом елементів при випрямленні звичайним способом. Точність побудови кривої швидкості за таким спрямленим профілем зростає в порівнянні з кривою швидкості, розрахованої звичайним способом.

**Приклад 3.** Довжина вантажного поїзда  $l_{п} = 660$  м, довжина локомотива  $l_{л} = 25$  м; довжина состава  $l_{с} = 635$  м; маса состава  $M_{с} = 2000$  т; маса локомотива  $M_{л} = 160$  т. Довжина частини состава,

яка розташовується на одному з локомотивом елементі,  $l_{cl} = 35$  м. Визначити тяговий профіль на заданій ділянці попикетного профілю та плану колії (рис. 8.12, а, б).

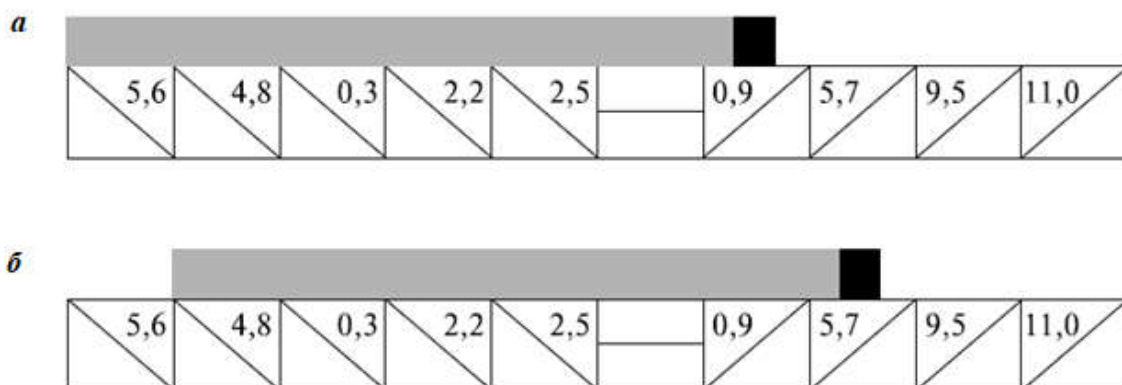


Рис. 8.12. Ділянка пікетного профілю, на якому розташований поїзд:  
а – перше положення поїзда; б – друге положення поїзда

*Рішення.* Використовуючи вираз (8.14), визначають середні значення ухилів, що діють на поїзд в положеннях 1, 2, 3, 4, і т.д. ці значення ухилів приведені до центру ваги поїзда (цв).

Спочатку визначається вага состава та вага локомотива

$$Q = M_Q g = 2000 \cdot 9,81 = 19620 \text{ кН},$$

$$P = M_P g = 160 \cdot 9,81 = 1570 \text{ кН}.$$

Попередньо розраховуються значення коефіцієнтів  $A$  і  $B$  у виразі (8.15)

$$A = \frac{1570 + 19620 \cdot \frac{35}{635}}{1570 + 19620} = 0,125,$$

$$B = \frac{19620 \cdot \frac{100}{635}}{1570 + 19620} = 0,146.$$

У першому положенні поїзда

$$i_{cp1} = 0,125 \cdot 0,9 + 0,146 \cdot (0 - 2,5 - 2,2 - 0,3 - 4,8 - 5,6) = -2,04 \text{ ‰}.$$

У другому положенні поїзда

$$i_{cp2} = 0,125 \cdot 5,7 + 0,146 \cdot (0,9 + 0 - 2,5 - 2,2 - 0,3 - 4,8) = -0,59 \text{ ‰}.$$

У третьому положенні поїзда

$$i_{cp3} = 0,125 \cdot 9,5 + 0,146 \cdot (5,7 + 0,9 + 0 - 2,5 - 2,2 - 0,3) = 1,42 \text{ ‰}.$$

У четвертому положенні поїзда

$$i_{cp4} = 0,125 \cdot 11,0 + 0,146 \cdot (9,5 + 5,7 + 0,9 + 0 - 2,5 - 2,2) = 3,04 \text{ ‰}$$

і т.д.

Потім розраховують значення ухилів тягового профілю

$$i_{p1} = \frac{-2,04 - 0,59}{2} = -1,3 \text{ ‰};$$

$$i_{p2} = \frac{-0,59 + 1,42}{2} = 0,4 \text{ ‰};$$

$$i_{p3} = \frac{1,42 + 3,04}{2} = 2,2 \text{ ‰};$$

і т.д.

### **Питання для самоконтролю**

- 1. Що таке рівноважна швидкість руху поїзда?*
- 2. Як визначити рівноважну швидкість руху поїзда по ділянці?*
- 3. Як визначити час руху поїзда по рівноважних швидкостях?*
- 4. Принцип графічної побудови кривої швидкості по ділянці.*
- 5. Як графічно визначається час руху поїзда?*
- 6. Суть розрахунку швидкості руху з урахуванням довжини та ваги поїзда?*

## Гальмування поїзда та рішення гальмівних завдань

### 9.1. Види гальмування поїзда

Машиніст за необхідності та для забезпечення безпеки руху поїздів повинен мати можливість змінювати швидкість руху поїзда до його зупинки на певній відстані. Тому під час ведення поїзда гальмівні засоби повинні бути завжди готовими до дії. Машиніст повинен уникати частих гальмувань без підзарядки гальмівної магістралі, тому що неповна зарядка гальмівних засобів поїзда у разі гальмування призводить до зменшення гальмівного ефекту.

Правильне керування автогальмами є важливою частиною раціональних режимів ведення поїзда, гарантією безпеки руху, економного витрачання паливно-енергетичних ресурсів.

Для регулювання швидкості руху поїзда та його зупинки застосовують такі види гальмування:

- службове ступінчасте;
- повне службове;
- екстрене.

*Службове ступінчасте* або регульовальне гальмування досягається шляхом зниження тиску в гальмівній магістралі ступенями для зміни гальмівної сили і, отже, швидкості руху поїзда. Службове гальмування застосовують для зупинки поїзда в заздалегідь передбаченому місці. Під час службового гальмування уповільнення (від'ємне прискорення) вантажного поїзда становить приблизно  $0,3 \text{ м/с}^2$ .

*Повне службове гальмування* досягається за рахунок зниження тиску в гальмівній магістралі в один прийом на  $0,15 \dots 0,17 \text{ МПа}$  від встановленого зарядного та застосовується для зменшення швидкості поїзда на більш короткій відстані або для його зупинки. У пасажирських поїздах, обладнаних ЕПГ, службове гальмування може проводитися

без розрядки гальмівної магістралі.

*Екстрене гальмування* досягається інтенсивною та повною розрядкою гальмівної магістралі, що забезпечує максимальну гальмівну силу поїзда. При екстреному гальмуванні з електропневматичним управлінням пасажирського поїзда уповільнення може досягати за умовами комфортності до  $1,3 \text{ м/с}^2$ .

У дослідженнях руху поїздів гальмівні розрахунки використовуються для визначення:

1) *допустимої швидкості руху* у разі заданого гальмівного шляху, відомих гальмівних засобах і профілі колії;

2) *необхідної сили натискання гальмівних колодок* у разі заданої максимально допустимої швидкості руху, довжині гальмівного шляху та крутизні ухилу;

3) *довжини гальмівного шляху* в залежності від заданої максимальної (початкової) швидкості руху, сили натискання гальмівних колодок і профілю колії.

## 9.2. Методи вирішення гальмівних завдань

Завдання визначення допустимої швидкості руху на спусках різної крутизни вирішується тільки графічним методом. Для відомого числа осей складу поїзда та гальмівних засобів  $\mathcal{Q}_p$  будується діаграма уповільнюючих сил (рис. 9.1, а) під час гальмування  $-(b_r + \omega_{ox}) = f(v)$  в обраному масштабі (див. табл. 6.8). Задаючись деякими значеннями спусків  $i_1, i_2, i_3$  для кожного спуску на діаграмі будується крива гальмування в межах заданого гальмівного шляху  $S_r$  (рис. 9.1, б).

Шлях підготовки  $S_{п}$ , м, визначається за формулою (5.20)

$$S_{п} = 0,278v_i t_{п},$$

де  $v_i$  – знаходиться на осі ординат для кожного значення ухилу;

$t_{п}$  – час підготовки гальм до ефективного гальмування. Значення  $t_{п}$  визначається за формулою (5.21) і табл. 5.5 відповідно до числа осей поїзда на кожному прийнятому ухилі.



Отримані значення  $S_{\text{п}}$  відкладаються на діаграмі (див. рис. 9.1, б) і в точках перетину з відповідними кривими швидкостей знаходяться допустимі швидкості початку гальмування  $v_{\text{д1}} - v_{\text{д3}}$  в точках  $D_1 - D_3$ . Потім будується допоміжна діаграма (рис. 9.1, в), за якою визначається шукана допустима швидкість  $v_{\text{доп}}$  для будь-якого значення ухилу.

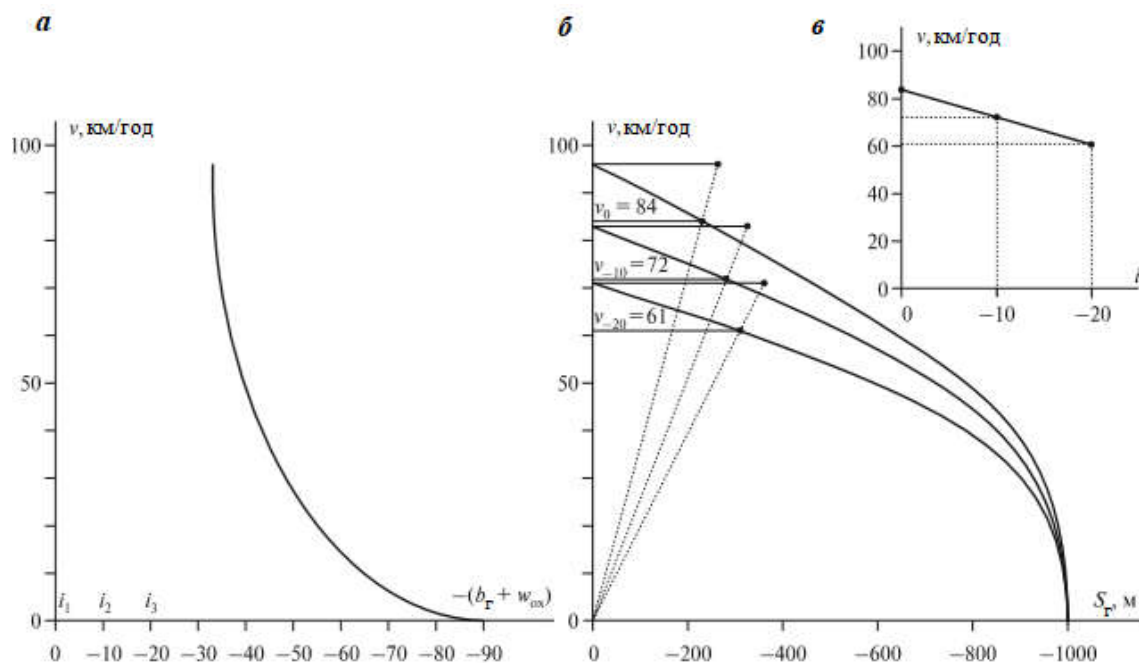


Рис. 9.1. Визначення допустимої швидкості руху на спусках різної крутості: а – крива питомих сил екстреного гальмування для заданого поїзда; б – побудова кривих швидкості гальмування на різних ухилах ( $i_1 = 0 \text{ ‰}$ ;  $i_2 = -10 \text{ ‰}$ ;  $i_3 = -20 \text{ ‰}$ ) для одного й того ж гальмівного шляху; в – допоміжний графік для визначення допустимої (з безпеки) швидкості руху на заданому зтяжному спуску

**Приклад 1.** Визначити допустимі швидкості руху поїзда на ухилах різної крутизни ланкової колії. Поїзд складається з електровоза ВЛ80<sup>к</sup> масою 184 т і состава масою 3800 т, сформований з чотиривісних вагонів на підшипниках кочення, з середньою масою, що припадає на вісь,  $q_0 = 17,5$  т. Розрахунковий гальмівний коефіцієнт  $\vartheta_p = 0,33$ . Вагони складу оснащені стандартними чавунними колодками.

*Рішення.*

1. Спочатку проводяться розрахунки, необхідні для побудови діаграми уповільнюючих сил заданого поїзда:

Вага локомотива

$$P = M_P g = 184 \cdot 9,81 = 1805 \text{ кН.}$$

Вага состава

$$Q = M_Q g = 3800 \cdot 9,81 = 37278 \text{ кН.}$$

Кількість осей у составі

$$n_c = \frac{M_Q}{17,5} = \frac{3800}{17,5} \approx 216 \text{ осей.}$$

Середнє осьове навантаження в составі

$$q_0 = \frac{Q}{n_c} = \frac{37278}{216} \approx 172 \text{ кН/вісь.}$$

Потім розраховуються дані для побудови діаграми уповільнюючих сил поїзда, і результати розрахунків записуються в табл. 9.1. За отриманими результатами розрахунку в масштабі, рекомендованому ПТР для графічних розрахунків, на міліметровці будують криву питомих уповільнюючих сил. На цьому ж міліметровому папері на продовженні абсциси відкладають в масштабі відстань гальмівного шляху  $S_T = 1000 \text{ м}$ .

Від кінця гальмівного шляху будуються криві швидкості гальмування для  $i_1 = 0 \text{ ‰}$ ,  $i_2 = -10 \text{ ‰}$ ,  $i_3 = -20 \text{ ‰}$  до перетину з ординатою – початку гальмування. Точка перетину з ординатою кривої швидкості гальмування відповідає швидкості  $v_1$ . Ця швидкість дозволяє визначити шлях підготовки. Допустима швидкість руху заданого поїзда по гальмівному забезпеченню на відповідному по крутизні спуску визначається з побудови променя – від початку гальмування до кінця знайденого шляху підготовки за швидкості  $v_1$ . Точка перетину побудованого променя з кривою швидкості гальмування і є допустима швидкість руху на відповідному ухилі.

2. Потім обчислюється час підготовки гальм до дії у разі гальмування на прямій горизонтальній колії, тобто  $i_1 = 0 \text{ ‰}$

$$t_{\text{пл}} = 10 \frac{15i_1}{b_{r1}} = 10 \text{ с.}$$

Таблиця 9.1

**Розрахункові дані для побудови діаграми уповільнюючих сил поїзда**

$v$ , км/год	$\omega'_x$ , Н/кН	$W'_x$ , Н	$\omega''_0$ , Н/кН	$W''_0$ , Н	$W'_x + W''_0$ , Н	$\omega_{\text{ок}}$ , Н/кН	$\varphi_{\text{кр}}$	$b_r$ , Н/кН	$b_r + \omega_{\text{ок}}$ , Н/кН
0	2,4	4332,1	0,87	32 431,8	36 763,9	0,94	0,27	83,1	90,04
10	2,54	4584,8	0,95	35 414,1	39 998,9	1,02	0,198	65,3	66,32
20	2,74	4945,8	1,05	39 141,9	44 087,7	1,13	0,162	53,5	54,63
30	3,045	5496,0	1,18	43 988,0	49 484,0	1,27	0,140	46,2	47,47
40	3,4	6137,1	1,34	49 952,5	56 089,6	1,44	0,126	41,6	43,04
50	4,06	7328,5	1,53	57 035,3	64 363,8	1,65	0,116	38,3	39,95
60	4,32	7797,8	1,74	64 863,7	72 661,5	1,86	0,108	35,6	37,46
70	4,89	8826,6	1,99	74 183,2	83 009,8	2,12	0,102	33,7	35,82
80	5,52	9963,8	2,26	84 248,3	94 212,1	2,41	0,097	32,0	34,41

3. Далі визначається шлях підготовки гальм до дії

$$S_{\text{пл}} = 0,278v_1t_{\text{пл}} = 0,278 \cdot 96 \cdot 10 = 266,9 \text{ м.}$$

Отримане значення  $S_{\text{пл}}$  в прийнятому масштабі (1 км – 120 мм) наноситься на діаграму за швидкості 96 км/год. У перетині променю (від початку гальмування до кінця  $S_{\text{пл}}$ ) (див. Рис. 9.1, б) з кривою швидкості ( $D_1$ ) гальмування на прямій горизонтальній колії визначається допустима швидкість руху на розрахунковій ділянці по гальмах. Її значення  $v_{\text{д1}} = 85$  км/год.

Визначення часу підготовки гальм до дії при гальмуванні на спуску  $i_1 = -10$  ‰. Спочатку визначається значення  $b_r$  за швидкості (з діаграми)  $v_2 = 83$  км/год. Для цієї швидкості обчислюється

$$\varphi_{\text{кр2}} = 0,27 \frac{v_2 + 100}{5v_2 + 100} = 0,27 \frac{83 + 100}{5 \cdot 83 + 100} = 0,096.$$

Тоді

$$b_{r2} = 1000\varphi_{\text{кр2}}\vartheta_p = 1000 \cdot 0,096 \cdot 0,33 = 31,7 \text{ Н/кН.}$$

Потім обчислюється час підготовки гальм до дії на гальмування

$$t_{п2} = 10 - \frac{15i_2}{b_{r2}} = 10 - \frac{15 \cdot (-10)}{31,7} = 14,7 \text{ с.}$$

Шлях підготовки гальм до дії на спуску  $i_2 = -10 \text{ ‰}$

$$S_{п2} = 0,278v_2t_{п2} = 0,278 \cdot 83 \cdot 14,7 = 339,2 \text{ м.}$$

Отримане значення  $S_{п2}$  знову наноситься на діаграму, і в перетині променя (від початку гальмування до кінця лінії  $S_{п2}$  за швидкості  $v_2 = 83 \text{ км/год}$ ) з кривою швидкості гальмування ( $D2$ ) на спуску  $i_2 = -10 \text{ ‰}$  визначається допустима швидкість початку гальмування. Її значення  $v_{2д} = 72 \text{ км/год}$ .

4. Визначення шляху підготовки гальм до дії у разі гальмування на спуску  $i_3 = 20 \text{ ‰}$ .

Спочатку визначається коефіцієнт тертя стандартних чавунних колісок під час гальмування за швидкості руху (з графіка 3 діаграми)  $v_3 = 71 \text{ км/год}$

$$\varphi_{кр3} = 0,27 \frac{v_3 + 100}{5v_3 + 100} = 0,27 \frac{71 + 100}{5 \cdot 71 + 100} = 0,1015.$$

Питома гальмівна сила

$$b_{r3} = 1000\varphi_{кр3}\vartheta_p = 1000 \cdot 0,1015 \cdot 0,33 = 33,5 \text{ Н/кН.}$$

Час підготовки гальм до дії у разі гальмування на спуску  $i_3 = -20 \text{ ‰}$

$$t_{п3} = 10 - \frac{15i_3}{b_{r3}} = 10 - \frac{15 \cdot (-20)}{33,5} = 18,9 \text{ с.}$$

Шлях підготовки гальм до дії

$$S_{п3} = 0,278v_3t_{п3} = 0,278 \cdot 71 \cdot 18,9 = 373 \text{ м.}$$

Отримане значення  $S_{п3}$  знову наноситься на діаграму, і в перетині

променю (від початку гальмування до кінця лінії  $S_{пз}$  за швидкості  $v_3 = 71$  км/год) з кривою швидкості гальмування ( $D3$ ) на спуску  $i_3 = -20$  ‰ визначається допустима швидкість  $v_{3д}$  початку гальмування. Її значення  $v_{3д} = 61$  км/год.

5. На основі отриманих допустимих швидкостей з гальмівного оснащення поїзда в залежності від величини спуску будується допоміжна діаграма (див. рис. 9.1, в)  $v_d(i)$ , за якою можна знайти допустиму швидкість руху поїзда для будь-якого значення спуску.

### 9.3. Визначення необхідних гальмівних засобів для забезпечення безпечного руху поїзда

Завдання визначення необхідних гальмівних засобів зводяться до визначення гальмівного коефіцієнта поїзда за наступних заданих величинах:

- допустима швидкість руху поїзда  $v_d$ ;
- спуск  $i$ , на якому відбувається гальмування поїзда;
- довжина гальмівного шляху  $S$ ;
- необхідні відомості про поїзд.

Метод вирішення таких задач зводиться до наступного:

- задаються не менше трьох значень розрахункового гальмівного коефіцієнта поїзда  $\vartheta_{p1}, \vartheta_{p2}, \dots, \vartheta_{pn}$ ;
- для кожного прийнятого  $\vartheta_p$  розраховуються питомі рівнодіючої сили поїзда у разі екстреного гальмування

$$b_{\Gamma} + \omega_{0x} = 1000\vartheta_p \varphi_{кр} + \omega_{0x};$$

- в масштабі будується діаграма питомих рівнодіючих сил для кожного прийнятого  $\vartheta_p$ ;
- по діаграмі питомих рівнодіючих сил на заданому спуску та гальмівному шляху будуються криві швидкості гальмування;
- визначаються допустимі швидкості руху для заданого  $\vartheta_p$ ;
- на основі даних розрахунків будують діаграму  $v(\vartheta_p)$ ;

– по заданій початковій швидкості та побудованої діаграмі  $v(\vartheta_p)$  визначають необхідний гальмівний коефіцієнт поїзда  $\vartheta_{pr}$ .

**Приклад 2.** Визначити, який розрахунковий гальмівний коефіцієнт повинен мати поїзд, що складається з тепловоза 2ТЭ116 і состава з 80 чотиривісних вагонів на роликівих підшипниках масою 70 т. Поїзд рухається по безстиківій колії зі швидкістю 80 км/год на спуску  $-12\%$  і повинен зупинитися в межах 1300 м. Поїзд рухається по ділянці зі спусками більше  $20\%$  і в даному випадку гальмівну силу локомотива і його масу потрібно враховувати.

*Рішення.*

1. Вага состава

$$Q = 80 \cdot 70 \cdot 9,81 = 54936 \text{ кН.}$$

2. Вага тепловоза

$$P = 276 \cdot 9,81 = 2708 \text{ кН.}$$

3. Середнє осьове навантаження состава

$$q_0 = \frac{Q}{80 \cdot 4} = \frac{54936}{320} = 172 \text{ кН/вісь.}$$

4. Питомий основний опір руху вагонів під час руху по безстиківій колії

$$\begin{aligned} \omega_0'' &= 0,7 + \frac{30 + 0,9v + 0,02v^2}{q_0} = \\ &= 0,7 + \frac{30 + 0,9 \cdot 80 + 0,02 \cdot 80^2}{172} = 2,04 \text{ Н/кН.} \end{aligned}$$

5. Питомий основний опір руху локомотива в режимі холостого ходу за швидкості 80 км/год

$$\begin{aligned} \omega_x' &= 2,4 + 0,009v + 0,00035v^2 = \\ &= 2,4 + 0,009 \cdot 80 + 0,00035 \cdot 80^2 = 5,36 \text{ Н/кН.} \end{aligned}$$

6. Питомий основний опір руху поїзда на вибігу (холостий хід локомотива)

$$\omega_{0x} = \frac{P\omega'_x + Q\omega''_0}{P + Q} = \frac{2708 \cdot 5,36 + 57936 \cdot 2,04}{2708 + 57936} = 2,19 \text{ Н/кН.}$$

7. Величина розрахункового коефіцієнта тертя визначається

$$\varphi_{кр} = 0,27 \cdot \frac{v + 100}{5v + 100} = 0,27 \cdot \frac{80 + 100}{5 \cdot 80 + 100} = 0,097.$$

8. Питомі гальмівні сили в залежності від гальмівних коефіцієнтів визначаються за формулою:

$$b_{r1} = 1000\varphi_{кр}\vartheta_p = 1000 \cdot 0,097 \cdot 0,33 = 32 \text{ Н/кН.}$$

$$b_{r2} = 1000 \cdot 0,097 \cdot 0,4 = 38,8 \text{ Н/кН.}$$

$$b_{r2} = 1000 \cdot 0,097 \cdot 0,5 = 48,5 \text{ Н/кН.}$$

Результати розрахунків питомих сил опору руху за інших швидкостях наведені в табл. 9.2.

Таблиця 9.2

Питомі сили опору руху

v, км/ год	$\omega''_0$ , Н/кН	$\omega'_x$ , Н/кН	$\omega_{0x}$ , Н/кН	$\varphi_{кр}$	$b_r$ , Н/кН, за			$b_r + \omega_{0x}$ , Н/кН, за		
					$\vartheta_{p1} =$	$\vartheta_{p2} =$	$\vartheta_{p3} =$	$\vartheta_{p1} =$	$\vartheta_{p2} =$	$\vartheta_{p3} =$
					0,33	0,4	0,5	0,33	0,4	0,5
80	2,04	5,36	2,19	0,097	32,0	38,8	48,5	34,2	41,0	50,7
70	1,80	4,75	1,94	0,102	33,7	40,8	51,0	35,6	42,7	52,9
60	1,60	4,20	1,71	0,108	35,6	43,2	54,0	37,3	44,9	55,7
50	1,41	3,73	1,52	0,116	38,8	46,4	58,0	39,8	47,9	59,5
40	1,26	3,32	1,36	0,126	41,6	50,4	63,0	43,0	51,8	64,4
30	1,13	2,99	1,22	0,140	46,2	56,0	70,0	47,4	57,2	71,2
20	1,02	2,72	1,10	0,162	53,5	64,8	81,0	54,6	65,9	82,1
10	0,93	2,53	1,01	1,198	65,3	79,2	99,0	66,3	80,2	100,0
0	0,93	2,53	1,01	0,27	89,1	108,0	135,0	90,1	109,0	136,0

9. Питомі уповільнюючі сили визначаються шляхом складання  $b_{\Gamma} + \omega_{0x}$ . За отриманими даними будуються діаграми питомих уповільнюючих сил, за якими будують швидкості кривих дійсного гальмування (рис. 9.2), починаючи з кінця підготовчого шляху до зупинки поїзда.

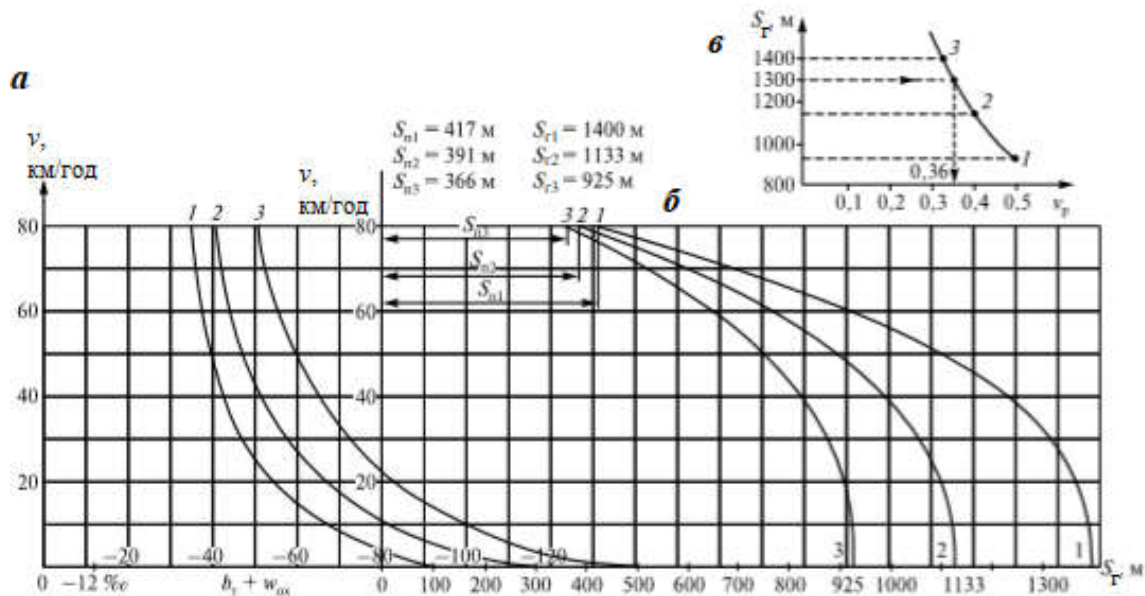


Рис. 9.2. Визначення необхідних гальмівних засобів для руху з допустимою швидкістю 80 км/год на зтяжних спусках:

*a* – характеристики питомих сил гальмування того самого поїзда, але для різних значень гальмівного коефіцієнта; *б* – побудова кривих швидкості гальмування на зтяжному спуску для визначення довжини шляхів гальмування; *в* – побудова допоміжного графіка для визначення необхідних гальмівних засобів з метою безпечного руху поїзда на заданій ділянці колії

10. Для розрахунку підготовчого гальмівного шляху визначають число осей у складі

$$n_o = n_{в4} = 80 \cdot 4 = 320.$$

Для швидкості  $v_{п} = 80$  км/год,  $i = -12$  ‰,  $\varphi_{кр} = 0,097$  і  $\vartheta_{p1} = 0,33$ ,  $b_{\Gamma} = 32$  Н/кН підготовчий час до дійсного гальмування

$$t_{п1} = 12 - \frac{18i}{b_{r1}} = 12 - \frac{18 \cdot (-12)}{32} = 18,75 \text{ с};$$



$$t_{п2} = 12 - \frac{18 \cdot (-12)}{38,8} = 17,25 \text{ с};$$

$$t_{п3} = 12 - \frac{18 \cdot (-12)}{48,5} = 16,45 \text{ с}.$$

Довжини підготовчих гальмівних шляхів складають:  
 – для  $\vartheta_{п1} = 0,33$

$$S_{п1} = 0,278 v_{п1} t_{п1} = 0,278 \cdot 80 \cdot 18,75 = 417 \text{ м};$$

– для  $\vartheta_{п2} = 0,4$

$$S_{п2} = 0,278 \cdot 80 \cdot 17,57 = 391 \text{ м};$$

– для  $\vartheta_{п3} = 0,5$

$$S_{п3} = 0,278 \cdot 80 \cdot 16,56 = 366 \text{ м}.$$

11. Побудова графіка  $v(S)$  під час гальмування починається з кінцевих точок підготовчих шляхів за швидкості  $v_{п} = 80$  км/год.

12. Отримані побудовою довжини гальмівних шляхів  
 – для  $\vartheta_{п1} = 0,33$

$$S_{г1} = 1400 \text{ м};$$

– для  $\vartheta_{п2} = 0,4$

$$S_{г2} = 1133 \text{ м};$$

– для  $\vartheta_{п3} = 0,5$

$$S_{г3} = 925 \text{ м}.$$

Вони дозволяють побудувати графік (рис. 9.2, в)  $S_{г}(\vartheta_{п})$ , за яким для заданого гальмівного шляху  $S_{г} = 1300$  м на спуску  $i = -12$  ‰ і швидкості руху  $v = 80$  км/год в поїзді повинні діяти гальмівні сили, що відповідають розрахунковому гальмівному коефіцієнту  $\vartheta_{п} = 0,36$ .

## 9.4. Визначення довжини гальмівного шляху

Залежно від заданої максимальної (початкової) швидкості руху, сили натискання гальмівних колодок і профілю колії завдання визначення довжини гальмівного шляху та часу гальмування вирішуються за наступних заданих величинах:

- початкова швидкість гальмування  $v_{\text{п}}$ ;
- профіль колії та на ділянці гальмування;
- гальмівні засоби поїзда  $\mathcal{G}_{\text{р}}$ ;
- необхідні відомості про поїзд.

Завдання визначення довжини гальмівного шляху вирішується аналітичним або графічним способом.

При вирішенні гальмівних завдань аналітичним способом за інтервалами швидкостей повний гальмівний шлях  $S_{\text{г}}$  визначається як сума двох складових

$$S_{\text{г}} = S_{\text{п}} + S_{\text{д}}, \quad (9.1)$$

де  $S_{\text{п}}$  – підготовчий гальмівний шлях, м;

$S_{\text{д}}$  – шлях дійсного гальмування, м.

Гальмівний шлях умовно ділять на підготовчий  $S_{\text{п}}$  і дійсний  $S_{\text{д}}$ . Діаграма наповнення гальмівних циліндрів у вантажному поїзді у разі екстреного гальмування приведена в гл. 5 на рис. 5.2.

Для спрощення гальмівних розрахунків в області несталого режиму дії гальмівної сили у разі її зростання дійсні діаграми наповнення гальмівних циліндрів (лінії 1–3) замінюються умовної стрибкоподібної лінією  $OCDB$ , прийнятої однаковою для всіх гальмівних циліндрів. При цьому передбачається, що під час проходження поїздом шляху підготовки гальм до дії –  $t_{\text{п}}$  (лінія  $0-C$ ) тиск у всіх гальмівних циліндрах поїзда дорівнює нулю, а швидкість поїзда не змінюється. Після цього тиск в гальмівних циліндрах зростає стрибком (лінія  $C-D$ ) і далі залишається постійним.

Час підготовки гальм до дії залежить від довжини поїзда, типу гальм, типу розподільника повітря та режиму його роботи, тому що від цього залежать характер і нахил діаграми наповнення, а також від гальмівної сили та ухилу, на якому відбувається підготовка гальм до дії.

У розрахунках під час підготовки гальм до дії швидкість руху приймається постійною, а фактично вона зростає або убуває в залежності від ухилу та гальмівної сили.

Час підготовки гальм до дії в секундах визначається за формулою:

$$t_{\text{п}} = a - \frac{ci}{b_{\text{г}}}, \quad (9.2)$$

де  $a, c$  – коефіцієнти, що залежать від типу поїзда (вантажний або пасажирський), типу гальм (пневматичний або електропневматичний) і числа осей;

$b_{\text{г}}$  – питома гальмівна сила поїзда, Н/кН;

$i$  – профіль колії, на якому знаходиться поїзд під час підготовки гальм до дії, ‰.

Значення коефіцієнтів  $a, c$  наведені в табл. 5.5.

Після визначення  $t_{\text{п}}$  обчислюється шлях підготовки гальм до дії

$$S_{\text{п}} = 0,278v_{\text{п}}t_{\text{п}}, \quad (9.3)$$

де  $v_{\text{п}}$  – швидкість, з якої відбувається гальмування, км/год.

Для розрахунку дійсного гальмівного шляху при проходженні поїздом розглянутого інтервалу швидкості гальмування (інтервали 5...10 км/год) використовують формулу:

$$\Delta S_{\text{д}} = \frac{500(v_{\text{п}}^2 - v_{\text{к}}^2)}{\zeta(b_{\text{г}} \mp i + \omega)}, \quad (9.4)$$

$$v_{\text{ср}} = \frac{v_{\text{п}} + v_{\text{к}}}{2}. \quad (9.5)$$

Дійсний гальмівний шлях

$$\sum \Delta S_{\text{д}} = \Delta S_{\text{д1}} + \Delta S_{\text{д2}} + \dots + \Delta S_{\text{дi}}. \quad (9.6)$$

Повний гальмівний шлях до кінця прийнятого інтервалу швидкості

гальмування

$$S_r = S_{\pi} + \sum \Delta S_d. \quad (9.7)$$

Час, витрачений поїздом під час проходження даного інтервалу швидкості, розраховується за формулою:

$$\Delta t_d = \frac{3,6 \Delta S_d}{v_{cp}}. \quad (9.8)$$

Загальний час, витрачений поїздом на гальмування, розраховується як сума часу з усіх розглянутих складових шляху гальмування

$$t_r = t_{\pi} + \Delta t_d. \quad (9.9)$$

Розрахунок гальмівного шляху по інтервалах швидкості зручно виконувати у вигляді таблиці (табл. 9.3), в якій на першому рядку записується шлях підготовки.

Таблиця 9.3

**Розрахунок гальмівного шляху за інтервалами швидкості**

$v_{\pi},$ $\frac{\text{км}}{\text{год}}$	$v_k,$ $\frac{\text{км}}{\text{год}}$	$v_{cp},$ $\frac{\text{км}}{\text{год}}$	$\varphi_{кр}^ч$	$b_r^ч,$ $\frac{\text{Н}}{\text{кН}}$	$\varphi_{кр}^к$	$b_r^к,$ $\frac{\text{Н}}{\text{кН}}$	$b_r,$ $\frac{\text{Н}}{\text{кН}}$	$\omega_0'',$ $\frac{\text{Н}}{\text{кН}}$	$\omega_x',$ $\frac{\text{Н}}{\text{кН}}$	$\omega_{0x},$ $\frac{\text{Н}}{\text{кН}}$	$\Delta S,$ м	$S_r,$ м	$\Delta t_d,$ с	$t_r,$ с

*Примітка.*  $S_r$  – гальмівний шлях, пройдений з моменту гальмування до закінчення даного інтервалу;  $t_r$  – час, що минув з моменту початку гальмування до закінчення зміни швидкості в даному інтервалі.

За результатами розрахунку будуються графіки залежності  $v = f(S)$  і  $t = f(S)$  (рис. 9.3).

**Приклад 3.** Визначити гальмівний шлях, що проходить вантажний поїзд за початкову швидкість 60 км/год до повної зупинки на спуску  $i = 5,4 \text{ ‰}$ , якщо дано:

1) питомий основний опір руху состава

$$\omega_0'' = 0,889 + 0,0001572v^2;$$

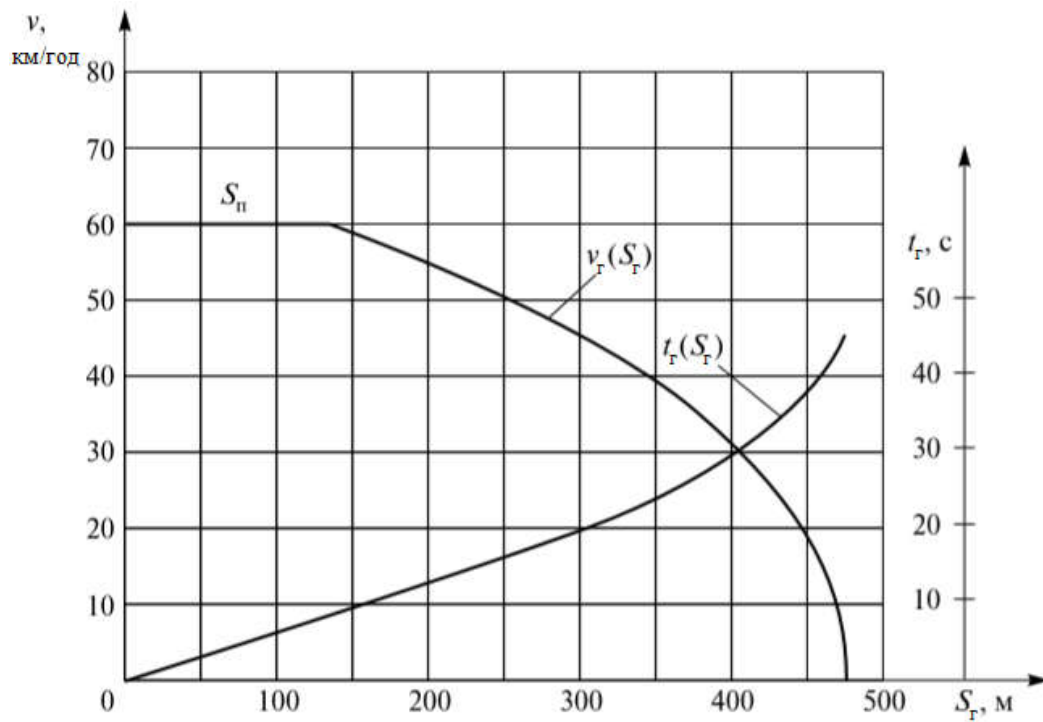


Рис. 9.3. Графіки швидкості і часу гальмування поїзда за результатами аналітичного розрахунку

2) розрахунковий гальмівний коефіцієнт чавунних колодок у поїзді  $\vartheta_p^ч = 0,242$ ;

3) розрахунковий гальмівний коефіцієнт композиційних колодок у поїзді  $\vartheta_p^к = 0,54$ ;

4) маса состава  $M_Q = 2100$  т;

5) маса локомотива  $M_P = 124$  т;

6) число осей складу  $n_o = 124$ ;

7) одиничне прискорення поїзда  $\zeta = 123,2$ ;

8) поїзд рухався колією з ухилами крутіше 20 %.

*Рішення.*

1. Визначення питомої гальмівної сили за початкову швидкість

$$\varphi_{кр}^ч = 0,27 \cdot \frac{v+100}{5v+100} = 0,27 \cdot \frac{60+100}{5 \cdot 60+100} = 0,18;$$

$$\varphi_{кр}^к = 0,36 \cdot \frac{v+150}{2v+150} = 0,36 \cdot \frac{60+100}{2 \cdot 60+100} = 0,28;$$

$$b_r^ч = 1000\varphi_{кр}^ч \vartheta_p^ч = 1000 \cdot 0,18 \cdot 0,242 = 26,136 \text{ Н/кН};$$

$$b_r^к = 1000\varphi_{кр}^к \vartheta_p^к = 1000 \cdot 0,28 \cdot 0,54 = 15,12 \text{ Н/кН}.$$

Загальна (сумарна) питома гальмівна сила поїзда дорівнює

$$b_r = b_r^ч + b_r^к = 26,135 + 15,12 = 41,48 \text{ Н/кН}.$$

2. Визначення часу підготовки гальм до дії

$$t_{п} = a - \frac{ci}{b_r} = 7 - \frac{10 \cdot (-5,4)}{41,48} = 8,3 \text{ с}.$$

3. Визначення шляху підготовки гальм до дії

$$S_{п} = 0,278v_{п}t_{п} = 0,278 \cdot 60 \cdot 8,3 = 138,4 \text{ м}.$$

Результати розрахунків вносяться до першого рядка табл. 9.4.

4. Визначення гальмівного шляху, що проходить поїздом у режимі дійсного гальмування першого інтервалу зниження швидкості на 10 км/год:

– середня швидкість на першому інтервалі дорівнюватиме

$$v_{ср} = \frac{v_{п} + v_{к}}{2} = \frac{60 + 50}{2} = 55 \text{ км/год}.$$

Значення розрахункових коефіцієнтів тертя чавунних та композиційних колодок за середньої швидкості 55 км/год

$$\varphi_{кр}^ч = 0,27 \cdot \frac{55 + 100}{5 \cdot 55 + 100} = 0,1116;$$

$$\varphi_{кр}^к = 0,36 \cdot \frac{55 + 100}{2 \cdot 55 + 100} = 0,284.$$

Питомі гальмівні сили, що створюються чавунними та композиційними колодками

Таблиця 9.4

## Розрахунок гальмівного шляху за інтервалами швидкості

$V_{п},$ км ГОД	$V_{к},$ км ГОД	$V_{ср},$ км ГОД	$\varphi_{ср}^u$	$b_{г}^u,$ Н кН	$\varphi_{ср}^к$	$b_{г}^к,$ Н кН	$b_{г},$ Н кН	$\omega_0''$ , Н кН	$\omega_x',$ Н кН	$\omega_{0x},$ Н кН	$\Delta S,$ М	$S_{г},$ М	$\Delta t_{д},$ с	$t_{г},$ с
60	60	60	0,108	26,14	0,28	15,12	41,48	–	–	–	138,4	138,4	8,3	8,3
60	50	55	0,112	27,01	0,284	15,34	42,35	1,71	4,06	1,84	115,1	253,5	7,5	15,8
50	40	45	0,12	29,04	0,293	15,82	44,86	1,49	3,60	1,62	88,9	342,4	7,1	22,9
40	30	35	0,133	32,2	0,303	16,36	48,56	1,30	3,21	1,40	63,8	406,2	6,6	29,5
30	20	25	0,15	36,3	0,315	17,01	53,31	1,14	2,89	1,23	41,3	447,5	5,9	35,4
20	10	15	0,177	42,83	0,33	17,82	60,65	1,02	2,64	1,11	21,6	469,1	5,2	40,6
10	0	5	0,227	67,03	0,349	18,85	85,88	0,97	2,55	1,06	5,0	474,1	3,6	44,2

$$b_r^q = 1000 \cdot 0,1116 \cdot 0,242 = 27,01 \text{ Н/кН};$$

$$b_r^k = 1000 \cdot 0,284 \cdot 0,54 = 15,34 \text{ Н/кН}.$$

Загальна питома гальмівна сила поїзда дорівнює

$$b_r = b_r^q + b_r^k = 27,01 + 15,34 = 42,35 \text{ Н/кН}.$$

Питомий основний опір руху состава

$$\omega_0'' = 0,889 + 0,00629 \cdot 55 + 0,0001572 \cdot 55^2 = 1,71 \text{ Н/кН}.$$

Питомий основний опір руху локомотиву в режимі холостого ходу

$$\omega_x' = 2,4 + 0,011v + 0,00035v^2 = 2,4 + 0,011 \cdot 55 + 0,00035 \cdot 55^2 = 4,06 \text{ Н/кН}.$$

Питомий основний опір руху поїзда

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \frac{\omega_0''Q + \omega_x'P}{P + Q} = \frac{g(\omega_0''M_Q + \omega_x'M_P)}{M_Q + M_P} = \\ &= \frac{1,71 \cdot 2100 + 4,06 \cdot 120}{2100 + 120} = 1,84 \text{ Н/кН}. \end{aligned}$$

Гальмівний шлях, що проходить в інтервалі зміни швидкості, що розглядається, дорівнює

$$\Delta S_d = \frac{500(60^2 - 50^2)}{123,2 \cdot (42,35 - 5,4 + 1,84)} = 115,1 \text{ м}.$$

5. Гальмівний шлях, пройдений з початку гальмування до закінчення зміни швидкості у цьому інтервалі

$$S_r = 138,4 + 115,1 = 253,5 \text{ м}.$$

6. Час, витрачений поїздом на зниження швидкості в даному інтервалі



$$\Delta t = \frac{3,6 \cdot 115,1}{55} = 7,5 \text{ с.}$$

7. Час гальмування, що минув з початку гальмування до закінчення зміни швидкості у цьому інтервалі

$$t_T = 8,3 + 7,5 = 15,8 \text{ с.}$$

Аналогічно заповнюються решта граф табл. 9.4.

Необхідно мати на увазі, що за швидкостях руху поїзда 10 км/год і менш питомий основний опір руху слід сприймати як за швидкості 10 км/год.

Результати розрахунку представлені на графіках швидкості та часу гальмування поїзда (див. рис. 9.3).

## 9.5. Графічний метод розв'язання гальмівних задач

Нижче наведено послідовність розрахунку графічним методом.

1. Попередньо розраховують та будують у вибраних масштабах діаграми питомих сил, що діють на поїзд на холостому ході локомотива  $\omega_{0x}(v)$  та екстреному гальмуванні  $(b_r + \omega_{0x}) = f(v)$ .

2. Праворуч від діаграми питомих рівнодіючих сил наносять профіль ділянки у масштабі шляху.

3. Для заданої початкової швидкості гальмування визначають час  $t_{\Pi}$  та шлях підготовки  $S_{\Pi}$  гальм до дії.

4. Припускаючи, що швидкість руху поїзда за час  $t_{\Pi}$  є сталою і дорівнює  $v_{\Pi}$ , відкладають на графіку при швидкості руху поїзда  $v_{\Pi}$  отриману величину  $S_{\Pi}$  (в масштабі шляху).

5. Від кінця нанесеної на графік лінії шляху підготовки гальм до дії  $S_{\Pi}$  до повної зупинки поїзда з урахуванням профілю колії будується крива швидкості гальмування по діаграмі питомих сил екстреного гальмування  $(b_r + \omega_{0x}) = f(v)$ .

У тих випадках коли необхідно більш точно визначити довжину гальмівного шляху, при вирішенні завдання враховують час сприйняття

машиністом сигналу зупинки та час, необхідний для прийняття рішення про гальмування поїзда відповідно до інструкцій. В цьому випадку для вирішення завдання використовується наступна послідовність розрахунку графічним методом.

1. Попередньо розраховують та будують у вибраних масштабах діаграми питомих сил, що діють на поїзд при холостому ході локомотива  $\omega_{0x}(v)$  та екстремому гальмуванні  $(b_r + \omega_{0x}) = f(v)$ .

2. Додатково розраховують і будують діаграму питомих сил в режимі тяги, що діють на поїзд (рис. 9.4).

3. Праворуч від діаграми питомих рівнодіючих сил наносять профіль ділянки у масштабі шляху.

4. За швидкостемірною стрічкою локомотива визначають *швидкість* руху «голови» поїзда  $v_{сп}$  і *місце* на шляху в момент надходження сигналу зупинки.

5. За відомій швидкості  $v_{сп}$  і заданому (інструкцією) часу  $t_{сп}$  визначають шлях сприйняття

$$S_{сп} = 0,278v_{сп}t_{сп}, \quad (9.10)$$

де  $v_{сп}$  – швидкість поїзда в момент надходження сигналу зупинки (її називають *швидкістю сприйняття*), км/год;  
 $t_{сп}$  – час сприйняття сигналу зупинки поїзда, с.

6. Припускаючи швидкість руху поїзда за проміжок часу  $t_{сп}$  постійною і рівною  $v_{сп}$ , відкладають шлях  $S_{сп}$  на графіку від встановленого місця на шляху (ордината початку гальмування) в момент надходження сигналу зупинки ( $A-B$ ).

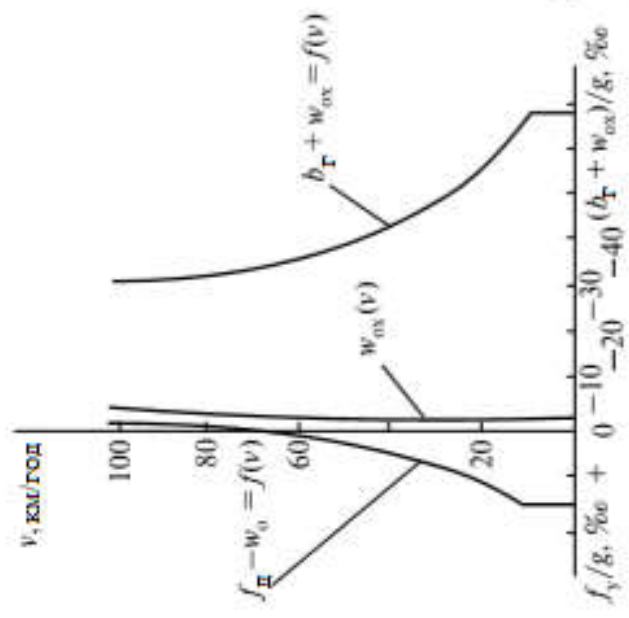
7. Від початку координат через точку  $B$  проводять промінь.

8. В момент надходження сигналу зупинки локомотив знаходився в режимі тяги, тому від точки  $A$  на графіку будують криву швидкості до перетину з побудованим променем і точку перетину позначають буквою  $C$ . По суті, так визначається швидкість початку гальмування  $v_{п}$ . Від точки  $C$  проводять на шлях (графіка) іншу ординату.

9. Для отриманої побудовою  $v_{п}$  початкової швидкості гальмування визначають час  $t_{п}$  і шлях підготовки  $S_{п}$  гальм до дії.

10. За постійну швидкість руху поїзда  $v_{п}$  за час  $t_{п}$  відкладають на графіку величину  $S_{п}$  (в масштабі шляху).

**a**



**б**

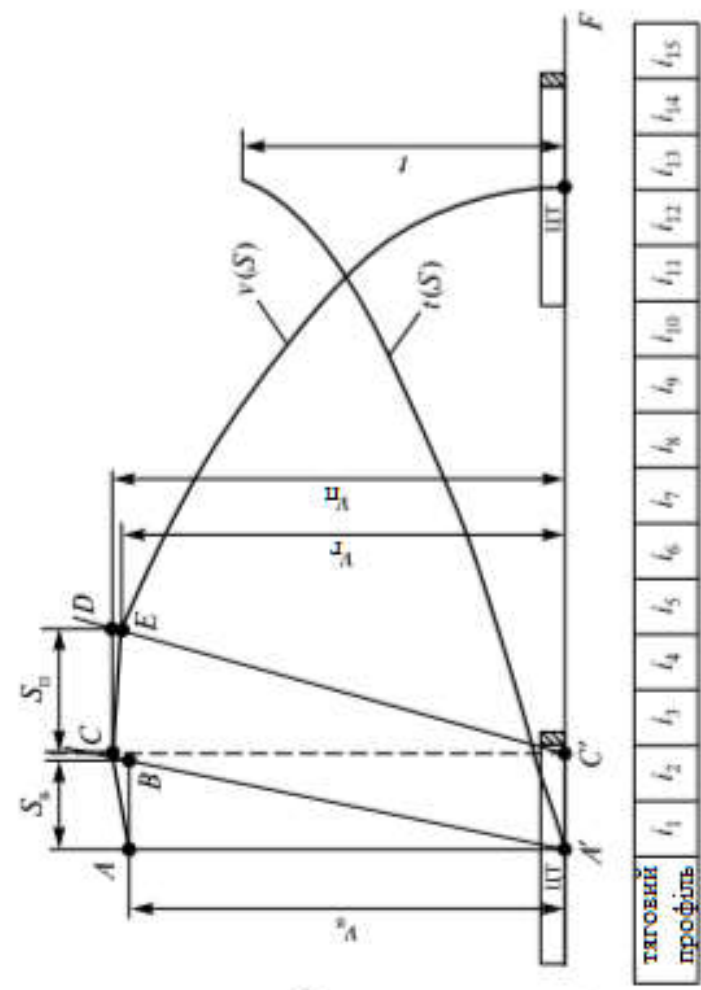


Рис. 9.4. Діаграма питомих сил, що діють на поїзд у гальмівних режимах:

*a* – діаграма питомих сил розрахункового поїзда; *б* – побудова кривої швидкості екстреного гальмування для розрахункового поїзда на конкретному профілі з метою визначення гальмівної колії та часу гальмування (завдання для експертизи)

11. Від початку другої ординати до кінця побудованої на графіку лінії  $S_{\pi}$  (точка  $D$ ) проводять промінь.

12. На основі діаграми питомих сил, що діють на поїзд на холостому ході локомотива, від точки  $C$  (швидкість  $v_{\pi}$ ) будують криву швидкості до перетину з променем в точці  $E$ .

13. Від точки  $E$  до повної зупинки поїзда на основі діаграми питомих сил, що діють на поїзд при екстремому гальмуванні  $(b_r + \omega_{0x}) = f(v)$ , будують криву швидкості гальмування.

14. Шлях гальмування (з побудованого графіка) визначають від ординати початкової швидкості  $v_{\pi}$  до зупинки поїзда на заданому профілі колії та при гальмівних засобах поїзда. При цьому необхідно враховувати розташування «голови» поїзда, тому що всі розрахунки та побудови проводяться для умовної точки центру ваги поїзда.

Для підвищення точності розрахунків необхідно враховувати: серію локомотива та його відповідність тяговим паспортним характеристикам; тип вагонів і підшипників кожного вагона в составі; масу тари (з напису на вагоні, а не за довідковими даними) і масу вантажу у вагоні (за накладними, які супроводжують вантаж).

Для розрахунку гальмівних характеристик поїзда необхідно мати дані про тип повітророзподільників під кожним вагоном, режимі роботи та гальмування; типах гальмівних колодок і виходах штоків гальмівних циліндрів; наявності вантажних авторежимів і швидкісних регуляторів та їх типі. Необхідно також знати всі відхилення в змісті гальмівного обладнання від типових норм і креслень.

Надалі розрахунок питомих рівнодіючих сил ведеться за загальноприйнятою методикою.

## 9.6. Розв'язання гальмівних задач по інтервалах часу

У практиці роботи залізниць доводиться вирішувати завдання визначення гальмівного шляху та часу гальмування у разі невстановлених гальмівних процесах.

Несталі гальмівні процеси виникають, коли до моменту зупинки поїзда гальмівні циліндри не встигають наповнитися стисненим повітрям до розрахункового тиску. Такі процеси спостерігають за різні

види службового гальмування, включаючи поетапне.

У цих випадках звичайні методи гальмівних розрахунків не дають необхідної точності. При вирішенні таких задач використовується метод чисельного інтегрування, розроблений у ВНДІЗТ. Гальмівні розрахунки виконуються за умови сталості сил в прийнятому інтервалі часу. Нижче розглянуто порядок розрахунку задач цим методом.

Реальні діаграми наповнення стисненим повітрям гальмівних циліндрів в часі різних вагонів поїзда під час гальмування замінюються однією еквівалентної (усередненої) діаграмою (рис. 9.5).



Рис. 9.5. Діаграма наповнення гальмівних циліндрів у вантажному поїзді при екстреному гальмуванні:

1, 2, 3 – діаграми наповнення гальмівних циліндрів головного, середнього в складі і хвостового вагонів відповідно; 4 – усереднена діаграма наповнення гальмівних циліндрів поїзда

Отримана діаграма залежить від довжини поїзда, типу гальм, режиму роботи повітророзподільника та виду гальмування (повне службове, ступінчасте або екстрене).

Дані діаграми наводяться у вигляді таблиць. Наприклад, в табл. 9.5 наведені зміни розрахункового коефіцієнта натискання у разі екстреного гальмування одиночного локомотива та состава різної довжини в залежності від інтервалу часу. У таблиці показано характер зміни в часі розрахункового гальмівного коефіцієнта по відношенню до його повного значення (у разі 100 % наповнення гальмівних циліндрів) у відсотках.

Таблиця 9.5

**Значення розрахункового коефіцієнта натискання у разі екстреного гальмування одиночного локомотива та состава різної довжини в залежності від інтервалу часу**

Інтервал часу, с	Розрахунковий коефіцієнт натискання (в середньому по поїзду), %				
	поодинокій локомотив	за довжиною состава вантажного поїзда, м			
		500	800	1200	1600
0...3	15	0	0	0	0
3...6	62	20	15	2	0
6...9	87	45	35	20	10
9...12	97	65	50	35	25
12...15	100	80	65	50	35
15...18	100	90	75	60	45
18...21	100	95	85	70	55
21...24	100	98	95	80	62
24...27	100	100	98	85	70
27...30	100	100	100	90	75
30...33	100	100	100	94	80
33...36	100	100	100	96	85
36...39	100	100	100	98	90
39...42	100	100	100	100	92
42...45	100	100	100	100	95
45...50	100	100	100	100	98
50...55	100	100	100	100	100

Як правило, реальна довжина складу відрізняється від довжини, приведеної у табл. 9.5. Для визначення характеру наповнення гальмівних циліндрів реального поїзда, використовують лінійну інтерполяцію, за допомогою якої визначають співвідношення довжини реального поїзда з довжинами поїздів табл. 9.5. Можливі розрахункові формули наведені у табл. 9.6.

Таблиця 9.6

**Формули для розрахунку діаграми наповнення гальмівних циліндрів поїзда певної довжини**

Довжина поїзда ,м	Розрахункова формула
1	2
менше 500	$\vartheta_{\text{рпоїзд}}^{\%} = \vartheta_{\text{р500}}^{\%} + \frac{\vartheta_{\text{р0}}^{\%} - \vartheta_{\text{р500}}^{\%}}{500 - 0} (500 - l_{\text{сост}})$

Закінчення табл. 9.6

1	2
500...800	$\vartheta_{\text{рпоїзд}}^{\%} = \vartheta_{\text{р800}}^{\%} + \frac{\vartheta_{\text{р500}}^{\%} - \vartheta_{\text{р800}}^{\%}}{800 - 500} (800 - l_{\text{сост}})$
800...1200	$\vartheta_{\text{рпоїзд}}^{\%} = \vartheta_{\text{р1200}}^{\%} + \frac{\vartheta_{\text{р1200}}^{\%} - \vartheta_{\text{р800}}^{\%}}{1200 - 800} (1200 - l_{\text{сост}})$
1200...1600	$\vartheta_{\text{рпоїзд}}^{\%} = \vartheta_{\text{р1600}}^{\%} + \frac{\vartheta_{\text{р1200}}^{\%} - \vartheta_{\text{р1600}}^{\%}}{1600 - 1200} (1600 - l_{\text{сост}})$

У табл. 9.6:  $\vartheta_{\text{рпоїзд}}^{\%}$  – відсоток наповнення гальмівних циліндрів поїзда;  $l_{\text{сост}}$  – довжина состава;  $\vartheta_{\text{р0}}^{\%}$ ,  $\vartheta_{\text{р500}}^{\%}$ ,  $\vartheta_{\text{р800}}^{\%}$ ,  $\vartheta_{\text{р1200}}^{\%}$ ,  $\vartheta_{\text{р1600}}^{\%}$  – відсоток наповнення гальмівних циліндрів одиночного локомотива та вантажного состава у разі його довжини, що дорівнює 500, 800, 1200 та 1600 м відповідно.

**Приклад 4.** Розрахувати діаграму наповнення гальмівних циліндрів поїзда завдовжки 950 м у разі екстреного гальмування.

*Рішення.*

1. Визначення відсотка наповнення гальмівних циліндрів для інтервалу часу 0–3 с з моменту початку гальмування

$$\begin{aligned} \vartheta_{\text{рпоїзд}}^{\%} &= \vartheta_{\text{р1200}}^{\%} + \frac{\vartheta_{\text{р1200}}^{\%} - \vartheta_{\text{р800}}^{\%}}{1200 - 800} (1200 - l_{\text{сост}}) = \\ &= 0 + \frac{0 - 0}{1200 - 800} (1200 - 950) = 0 \text{ \%}. \end{aligned}$$

Відсоток наповнення гальмівних циліндрів поїзда для інтервалу часу 3–6 с

$$\vartheta_{\text{рпоїзд}}^{\%} = 2 + \frac{15 - 2}{1200 - 800} (1200 - 950) = 10,1 \text{ \%}.$$

Результати подальшого розрахунку наведено у табл. 9.7.

Для пасажирського поїзда діаграма наповнення гальмівних циліндрів у разі екстреного гальмування вибирається виходячи з числа вагонів поїзда за табл. 9.8.

Прийнята за табл. 9.8 діаграма не вимагає перерахунків та уточнення.

Таблиця 9.7

**Результати розрахунку діаграми наповнення гальмівних циліндрів вантажного поїзда**

Інтервал часу, с	$\vartheta_{p800}^{\%}$	$\vartheta_{p1200}^{\%}$	$\vartheta_{p1600}^{\%}$
0–3	0	0	0
3–6	15	2	10,125
6–9	35	20	29,4
9–12	50	35	44,4
12–15	65	50	59,4
15–18	75	60	69,4
18–21	85	70	79,4
21–24	95	80	89,4
24–27	98	85	93,1
27–30	100	90	96,2
30–33	100	94	97,8
33–36	100	96	98,5
36–39	100	98	99,2
39–42	100	100	100

Таблиця 9.8

**Розрахунковий гальмівний коефіцієнт пасажирського поїзда у процесі наповнення гальмівних циліндрів у разі екстреного та повного службового гальмування**

Інтервал часу, с	Розрахунковий коефіцієнт натискання $\vartheta_{p\text{сост}}^{\%}$ , %, в залежності від числа вагонів в поїзді		
	до 18	19–25	більше 25
0–3	2	0	0
3–6	65	35	20
6–9	90	60	50
9–12	95	80	70
12–15	100	95	85
15–18	100	100	95
18–21	100	100	100



Зміна швидкості  $\Delta v$  за розглянутий інтервал часу  $\Delta t$  обчислюється за формулою:

$$\Delta v = -\frac{\zeta(b_r + \omega_{0x} \pm i_{cp})}{3600} \Delta t, \quad (9.11)$$

де  $i_{cp}$  – середнє значення ухилу, що обчислюється в розрахунковому інтервалі часу з урахуванням довжини та маси поїзда.

Під час використання формули (9.11) виникають труднощі, тому що присутні у виразі питома гальмівна сила  $b_r$  та питомий основний опір руху поїзда в режимі холостого ходу локомотива  $\omega_{0x}$  залежать від середньої швидкості руху поїзда в інтервалі часу. Середня швидкість руху, в свою чергу, залежить від величини  $\Delta v$ . Тому для вирішення гальмівної задачі даним способом використовується метод послідовного наближення. Спочатку задають значення середньої швидкості на розглянутому інтервалі, проводять обчислення та порівнюють задане та розраховане значення середньої швидкості. Точність розрахунків вважається задовільною, якщо розбіжність не перевищує 0,5 км/год.

Для визначення гальмівного шляху за інтервалами часу рекомендується виконати розрахунки у наступній послідовності.

1. Визначення фактичних розрахункових гальмівних коефіцієнтів для чавунних та композиційних гальмівних колодок у даному інтервалі часу за формулами:

$$\mathfrak{G}_{рф}^ч = \mathfrak{G}_p^ч \frac{\mathfrak{G}_{рсост}^{\%}}{100}; \quad (9.12)$$

$$\mathfrak{G}_{рф}^к = \mathfrak{G}_p^к \frac{\mathfrak{G}_{рсост}^{\%}}{100}. \quad (9.13)$$

2. Вибір середнього значення швидкості руху поїзда  $v_{cp}^{пр}$  на розглянутому інтервалі часу.

3. Значення розрахункових коефіцієнтів тертя чавунних та композиційних гальмівних колодок за середню швидкість гальмування

$$\varphi_{\text{кр}}^{\text{ч}} = 0,27 \frac{v_{\text{ср}}^{\text{пр}} + 100}{5v_{\text{ср}}^{\text{пр}} + 100}; \quad (9.14)$$

$$\varphi_{\text{кр}}^{\text{к}} = 0,36 \frac{v_{\text{ср}}^{\text{пр}} + 150}{2v_{\text{ср}}^{\text{пр}} + 150}. \quad (9.15)$$

4. Питома гальмівна сила, що діє на поїзд у розглянутому інтервалі часу

$$b_{\text{г}}^{\text{ч}} = 1000\varphi_{\text{кр}}^{\text{ч}} \mathfrak{G}_{\text{рф}}^{\text{ч}}; \quad (9.16)$$

$$b_{\text{г}}^{\text{к}} = 1000\varphi_{\text{кр}}^{\text{к}} \mathfrak{G}_{\text{рф}}^{\text{к}}; \quad (9.17)$$

$$b_{\text{г}} = b_{\text{г}}^{\text{ч}} + b_{\text{г}}^{\text{к}}. \quad (9.18)$$

5. Питомий основний опір руху поїзда у прийнятому інтервалі часу

$$\omega'_{\text{x}} = 2,4 + 0,011v_{\text{ср}}^{\text{пр}} + 0,00035(v_{\text{ср}}^{\text{пр}})^2,$$

$$\omega''_0 = a + bv_{\text{ср}}^{\text{пр}} + c(v_{\text{ср}}^{\text{пр}})^2. \quad (9.19)$$

Тут коефіцієнти  $a$ ,  $b$  і  $c$  визначаються для кожного конкретного состава.

Коефіцієнт  $a$  включає всі вільні члени у формулах питомого основного опору руху груп однотипних вагонів состава (без швидкості руху  $v$ ) з урахуванням частки  $a_n$  групи вагонів (підшипники кочення) у составі

$$a = \left(0,7 + \frac{30}{q_{01}}\right)\alpha_1 + \left(0,7 + \frac{30}{q_{02}}\right)\alpha_2 + \dots + \left(0,7 + \frac{30}{q_{0n}}\right)\alpha_n, \quad (9.20)$$

де  $n$  – число груп вагонів у складі;

$q_0$  – осьове навантаження вагона брутто більше 60 кН/вісь.

Якщо  $\epsilon$  у складі вагони з навантаженням менше 60 кН/вісь, то

$$a = \left(0,7 + \frac{30}{q_{01}}\right)\alpha_1 + \left(0,7 + \frac{30}{q_{02}}\right)\alpha_2 + \dots + 1,0 \cdot \alpha_n \quad (9.21)$$

Значення коефіцієнта  $a$  обчислюють із точністю до 0,001.

Коефіцієнт  $b$  включає коефіцієнти у формулах опору руху вагонів різних груп состава поїзда при членах, що містять швидкість руху  $v$  у першому ступені, з урахуванням частки однотипних (чотиривісних) вагонів у составі

$$b = \frac{1}{q_{01}}\alpha_1 + \frac{1}{q_{02}}\alpha_2 + \dots + \frac{1}{q_{0n}}\alpha_n, \quad (9.22)$$

де  $q_0 > 60$  кН/вісь.

Якщо у складі  $\epsilon$  вагони з навантаженням  $q_0 < 60$  кН/вісь, то

$$b = \frac{1}{q_{01}}\alpha_1 + \frac{1}{q_{02}}\alpha_2 + \dots + 0,044\alpha_n. \quad (9.23)$$

Значення коефіцієнта  $b$  визначають з точністю 0,00001.

Коефіцієнт  $c$  включає всі коефіцієнти у формулах опору руху окремих груп вагонів складу при членах, що містять швидкість у квадратах ( $v^2$ ), з урахуванням частки вагонів у поїзді за вагою. Для состава, де всі вагони мають осьові навантаження  $q_0 > 60$  кН/вісь, коефіцієнт  $c$  визначається за формулою:

$$c = \frac{0,025}{q_{01}}\alpha_1 + \frac{0,025}{q_{02}}\alpha_2 + \dots + \frac{0,025}{q_{0n}}\alpha_n. \quad (9.24)$$

Якщо у складі  $\epsilon$  вагони з навантаженням  $q_0 < 60$  кН/вісь, то

$$c = \frac{0,025}{q_{01}}\alpha_1 + \frac{0,025}{q_{02}}\alpha_2 + \frac{0,021}{q_{03}}\alpha_3 + 0,00024\alpha_4. \quad (9.25)$$

Значення коефіцієнта  $c$  визначають з точністю до 0,0000001.

Потім визначають питомий основний опір поїзда в прийнятому інтервалі часу

$$\omega_{0x} = \frac{\omega_0'' Q + \omega_x' P}{P + Q}.$$

**Приклад.** Визначити питомий основний опір руху ланковою колією вантажного состава вагою 27 500 кН (188 осей). Состав сформований з:  $\alpha_1 = 0,4$  (ваги состава) шестивісних завантажених вагонів з осьовим навантаженням  $q_{06} = 190$  кН/вісь;  $\alpha_2 = 0,3$  чотиривісних завантажених вагонів з осьовим навантаженням  $q_{04} = 150$  кН/вісь;  $\alpha_3 = 0,2$  восьмивісних завантажених вагонів з осьовим навантаженням  $q_{04} = 200$  кН/вісь;  $\alpha_4 = 0,1$  чотиривісних порожніх вагонів з осьовим навантаженням  $q_{04} = 60$  кН/вісь.

*Рішення.*

1. З табл. 4.1 вибираємо формули питомого основного опору заданих вагонів состава, призначених для руху ланковою колією:

– шестивісних завантажених

$$\omega_{06}'' = 0,7 + \frac{80 + v + 0,025v^2}{q_{06}};$$

– чотиривісних завантажених

$$\omega_{04}'' = 0,7 + \frac{30 + v + 0,025v^2}{q_{04}};$$

– чотиривісних порожніх

$$\omega_{04}'' = 1,0 + 0,044v + 0,0024v^2;$$

– восьмивісних завантажених

$$\omega_{08}'' = 0,7 + \frac{60 + 0,38v + 0,021v^2}{q_{08}}.$$

2. За формулою (9.20) визначаємо коефіцієнт

$$a = \left(0,7 + \frac{80}{q_{06}}\right)\alpha_1 + \left(0,7 + \frac{30}{q_{04}}\right)\alpha_2 + 1,0\alpha_4 + \left(0,7 + \frac{60}{q_{08}}\right)\alpha_3 =$$

$$= \left(0,7 + \frac{80}{190}\right) \cdot 0,4 + \left(0,7 + \frac{30}{150}\right) \cdot 0,3 + 1,0 \cdot 0,1 + \left(0,7 + \frac{60}{200}\right) \cdot 0,2 = 1,018.$$

3. За формулою (9.22) визначаємо коефіцієнт

$$b = \frac{1}{q_{06}}\alpha_1 + \frac{1}{q_{04}}\alpha_2 + 0,044\alpha_4 + \frac{0,38}{q_{08}}\alpha_3 =$$

$$= \frac{1}{190} \cdot 0,4 + \frac{1}{150} \cdot 0,3 + 0,044 \cdot 0,1 + \frac{0,38}{200} \cdot 0,2 = 0,008885.$$

4. За формулою (9.24) визначаємо коефіцієнт

$$c = \frac{0,025}{q_{06}}\alpha_1 + \frac{0,025}{q_{04}}\alpha_2 + 0,00024\alpha_4 + \frac{0,021}{q_{08}}\alpha_3 =$$

$$= \frac{0,025}{190} \cdot 0,4 + \frac{0,025}{150} \cdot 0,3 + 0,00024 \cdot 0,1 + \frac{0,021}{200} \cdot 0,2 = 0,000147631.$$

5. Наведений питомий основний опір руху заданого состава ланковою колією виразиться формулою:

$$\omega_0'' = 1,018 + 0,008885v + 0,000147631v^2.$$

6. Необхідно визначитися зі значенням ухилу, на якому проводиться розрахунок у розглянутому інтервалі часу  $i_{cp}$ .

7. Використовуючи вираз (9.11), визначають зміну швидкості  $\Delta v$  на розглянутому інтервалі часу.

8. Визначають значення кінцевої та середньої швидкостей руху

$$v_k = v_{п} + \Delta v; \quad (9.26)$$

$$v_{cp} = \frac{v_{п} + v_k}{2}. \quad (9.27)$$

9. Порівнюють отримане  $v_{cp}$  і припущене  $v_{cp}^{np}$  значення швидкості. Якщо розбіжність між цими швидкостями менше 0,5 км/год, то уточнення розрахунків не потрібно. Якщо ж розбіжність більше 0,5 км/год, необхідно розрахунок повторити, прийнявши  $v_{cp}^{np} = v_{cp}$ .

10. Після уточнення розрахунків визначають шлях, пройдений поїздом на розглянутому інтервалі часу

$$\Delta S = 0,278v_{cp}\Delta t. \quad (9.28)$$

Потім переходять до розрахунку на наступному інтервалі часу, прийнявши як початкову швидкість руху кінцеву швидкість попереднього інтервалу часу. Розрахунок ведеться до моменту зупинки поїзда.

Результати розрахунку зручно подати у вигляді табл. 9.9.

**Приклад 5.** Визначити гальмівний шлях, що проходить вантажний поїзд з початковою швидкістю 60 км/год до повної зупинки на профілі, показаному на рис. 9.6, якщо надані такі величини.

Питомий основний опір руху состава, що розраховується, який визначається за формулою:

$$\omega_0'' = 0,0889 + 0,00629v + 0,0001572v^2.$$

Розрахунковий гальмівний коефіцієнт чавунних колодок у поїзді  $\vartheta_p^ч = 0,212$ .

Розрахунковий гальмівний коефіцієнт композиційних колодок поїзда  $\vartheta_p^к = 0,074$ .

Маса состава  $M_с = 4200$  т.

Маса локомотива  $M_p = 120$  т.

Довжина складу  $l_{сост} = 950$  м.

Одиничне прискорення поїзда  $\zeta = 123,2$ .

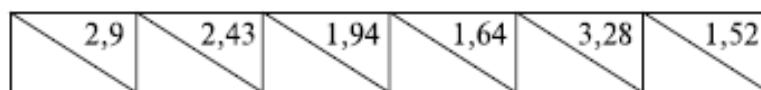


Рис. 9.6. Розрахунковий пікетний профіль



*Рішення.*

1. Діаграма наповнення гальмівних циліндрів повністю збігається з діаграмою, розрахованою в прикладі 4 (табл. 9.7).

2. Визначення фактичних (з урахуванням швидкості наповнення гальмівних циліндрів) значень розрахункових гальмівних коефіцієнтів для чавунних та композиційних гальмівних колодок в інтервалі часу від 0 до 3 с

$$\vartheta_{\text{рф}}^{\text{ч}} = 0,212 \frac{0}{100} = 0,$$

$$\vartheta_{\text{рф}}^{\text{к}} = 0,074 \frac{0}{100} = 0.$$

3. Передбачається, що середнє значення швидкості руху поїзда на інтервалі часу, що розглядається, дорівнює  $v_{\text{ср}}^{\text{пр}} = 60$  км/год.

4. Розрахункові коефіцієнти тертя чавунних та композиційних гальмівних колодок

$$\varphi_{\text{кр}}^{\text{ч}} = 0,27 \frac{60 + 100}{5 \cdot 60 + 100} = 0,108;$$

$$\varphi_{\text{кр}}^{\text{к}} = 0,36 \frac{60 + 150}{2 \cdot 60 + 150} = 0,28.$$

5. Значення питомої гальмівної сили, що діє на поїзд у розглянутому інтервалі часу

$$b_{\text{r}}^{\text{ч}} = 1000 \cdot 0,108 \cdot 0 = 0 \text{ Н/кН};$$

$$b_{\text{r}}^{\text{к}} = 1000 \cdot 0,28 \cdot 0 = 0 \text{ Н/кН};$$

$$b_{\text{r}} = 0 + 0 = 0 \text{ Н/кН}.$$

6. Величина питомого основного опору руху поїзда в інтервалі часу, що розглядається:

$$\omega'_x = 2,4 + 0,011 \cdot 60 + 0,00035 \cdot 60^2 = 4,32 \text{ Н/кН};$$



$$\omega_0'' = 0,889 + 0,00629 \cdot 60 + 0,0001572 \cdot 60^2 = 1,83 \text{ Н/кН};$$

$$\omega_{0x} = \frac{1,83 \cdot 4200 + 4,32 \cdot 120}{120 + 4200} = 1,90 \text{ Н/кН}.$$

7. На даному інтервалі часу поїзд знаходиться на спуску крутістю  $i_{cp} = -2,90 \text{ ‰}$ . Зміна швидкості при цьому дорівнюватиме

$$\Delta v = -\frac{123,2(0 + 1,9 - 2,9)}{3600} \cdot 3 = 0,1 \text{ км/год.}$$

Кінцева та середня швидкості руху

$$v_k = 60 + 0,1 = 60,1 \text{ км/год};$$

$$v_{cp} = \frac{60 + 60,1}{2} = 60,05 \text{ км/год.}$$

8. Порівнюються отримане  $v_{cp} = 60,05 \text{ км/год}$  і припущене  $v_{cp}^{пр} = 60 \text{ км/год}$  значення швидкості. Оскільки розбіжність не перевищує  $0,5 \text{ км/год}$ , то уточнення розрахунків не потребує.

9. Визначається шлях, пройдений поїздом на розглянутому інтервалі часу

$$\Delta S = 0,278 \cdot 60,05 \cdot 3 = 50,08 \text{ м.}$$

Результати розрахунку наведені в табл. 9.10.

## 9.7. Гальмівні розрахунки за допомогою номограм

Для оперативного і спрощеного рішення гальмівних завдань, які нерідко виникають в процесі організації експлуатаційної роботи рухомого складу, фахівці ВНДІЗТ розробили розрахункові номограми гальмівних шляхів вантажних і пасажирських поїздів. Номограми встановлюють залежність гальмівних шляхів від швидкості руху, гальмівних коефіцієнтів складу (поїзда) і крутизни спуску.

Таблиця 9.10

## Приклад розрахунку гальмівного шляху за інтервалами часу

$\Delta t, c$	$\vartheta_{\text{рост}}, \%$	$\vartheta_{\text{рф}}, \frac{H}{\text{кН}}$	$\vartheta_{\text{рф}}, \frac{H}{\text{кН}}$	$\vartheta_{\text{рф}}, \frac{H}{\text{кН}}$	$\nu_{\text{ср}}, \frac{\text{км}}{\text{год}}$	$\varphi_{\text{ср}}^{\text{ч}}$	$\varphi_{\text{кр}}^{\text{к}}$	$b_{\text{г}}^{\text{ч}}, \frac{H}{\text{кН}}$	$b_{\text{г}}^{\text{к}}, \frac{H}{\text{кН}}$	$b_{\text{г}}, \frac{H}{\text{кН}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0-3	0	0	0	60	0,108	0,280	0	0	0	
3-6	10,1	0,021	0,007	60	0,108	0,280	2,27	1,96	4,23	
6-9	29,4	0,062	0,022	59,5	0,108	0,280	6,70	6,16	12,86	
9-12	44,4	0,094	0,033	58	0,109	0,282	10,25	9,31	19,56	
12-15	59,4	0,126	0,044	55	0,111	0,284	13,99	12,50	26,49	
15-18	69,4	0,147	0,051	52	0,114	0,286	16,76	14,59	31,35	
18-21	79,4	0,168	0,059	49	0,117	0,289	19,66	17,05	36,71	
21-24	89,4	0,190	0,066	45	0,120	0,293	22,8	19,34	42,14	
24-27	98,2	0,195	0,068	40	0,126	0,297	24,57	20,20	44,77	
27-30	96,3	0,204	0,071	35,5	0,132	0,302	26,93	21,44	48,37	
30-33	97,8	0,207	0,072	30,5	0,140	0,308	28,98	22,18	51,16	
33-36	98,5	0,209	0,073	25,5	0,49	0,314	31,14	22,92	54,06	
36-39	99,3	0,211	0,073	20	0,162	0,322	34,18	23,51	57,69	
39-42	100	0,212	0,074	14	0,181	0,332	38,37	24,57	62,94	
42-45	100	0,212	0,074	7,5	0,211	0,344	44,73	25,46	70,19	
45-46	100	0,212	0,074	1,9	0,251	0,356	53,21	26,34	79,55	

Закінчення табл. 9.10

$\omega'_x,$ Н кН	$\omega''_0,$ Н кН	$\omega_{0x},$ Н кН	$i_{cp},$ %	$b_r +$ $\omega_{0x} \mp$ $i_{cp},$ Н/кН	$V_p,$ км год	$\Delta V,$ км год	$V_k,$ км год	$V_{cp},$ км год	$\Delta S,$ м	$\sum \Delta S,$ м
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
4,32	1,83	1,90	2,90	-1,00	60	-0,1	60,1	60,05	50,08	50,08
4,32	1,83	1,90	2,90	3,23	60,01	0,3	59,8	59,95	50,0	100,08
4,29	1,82	1,89	2,43	12,32	59,8	1,3	58,5	59,15	49,33	149,41
4,22	1,78	1,85	2,43	18,98	58,5	1,9	56,6	57,55	48,00	197,41
4,06	1,71	1,78	1,94	36,33	56,6	2,7	53,9	55,25	46,08	243,49
3,92	1,64	1,70	1,94	31,11	53,9	3,2	50,7	52,3	43,62	287,11
3,78	1,57	1,63	1,64	36,7	50,7	3,8	46,9	48,8	40,70	327,81
3,60	1,49	1,55	1,64	42,05	46,9	4,3	42,6	44,75	37,32	365,13
3,40	1,39	1,45	1,64	44,58	42,6	4,6	38	40,3	33,61	398,74
3,23	1,31	1,40	3,28	46,49	38	4,8	33,2	35,6	29,69	428,43
3,06	1,23	1,28	3,28	49,16	33,2	5,0	28,2	30,7	25,60	454,03
2,79	1,15	1,20	3,28	51,98	28,2	5,3	22,9	25,55	21,31	475,34
2,76	1,08	1,13	3,28	55,54	22,9	5,7	17,2	20,05	16,72	492,06
2,62	1,01	1,05	3,28	60,71	17,2	6,2	11,0	14,1	11,76	503,82
2,55	0,97	1,01	1,52	69,68	11,0	7,2	3,8	7,4	6,17	509,99
2,55	0,97	1,01	1,52	79,4	3,8	3,8	0	1,9	0,37	510,36

За номограмами можна вирішувати такі завдання:

1) для заданих величин розрахункового гальмівного коефіцієнта та швидкості руху визначається гальмівний шлях на будь-якому профілі колії;

2) за відомими гальмівним шляхом і гальмівним коефіцієнтом визначити допустиму швидкість руху;

3) за відомими значеннями гальмівного шляху, швидкості та ухилу визначити реалізований гальмівний коефіцієнт поїзда.

Для вирішення гальмівного завдання необхідно вибрати номограму або таблицю, що відповідає певному типу поїзда (вантажний, пасажирський, електропоїзд або одиночний локомотив), крутизні ухилу, на якому відбувається гальмування.

Гальмівні номограми для вантажних і пасажирських поїздів наведено в додатку ПТР. Вони розраховані для певних ухилів і швидкостей, які, як правило, не збігаються з параметрами конкретного поїзда. У цих випадках необхідно скористатися лінійною інтерполяцією. Порядок використання номограм і таблиць, а також застосування інтерполяції представлені в прикладі 6.

**Приклад 6.** Визначити за таблицями та номограмами гальмівний шлях поїзда, що має швидкість на початку гальмування 57 км/год, розрахунковий гальмівний коефіцієнт  $\vartheta_p = 0,37$  кН/кН (т/т) під час руху на спуску з крутизною  $-7,4\%$ .

*Рішення.*

У таблицях номограм немає заданої швидкості, розрахункового гальмівного коефіцієнта та ухилу. Найближчі значення крутизни, для яких є розраховані дані, складають  $-6$  і  $-8\%$ . Найближчі значення швидкостей початку гальмування, для яких виконані розрахунки, рівні 55 і 60 км/год. При цьому розрахункові гальмівні коефіцієнти складають  $\vartheta_p = 0,35$  та  $\vartheta_p = 0,40$ .

1. По таблиці з додатка ПТР, показаної на рис. 9.7, для найближчих параметрів визначаємо значення гальмівного шляху на спуску  $i = -6\%$  і заносимо в табл. 9.11.

Таблиця 9.11

$\vartheta_p$	$v_n$ , км/год	$S_r$ , м
0,35	55	436
0,35	60	520
0,4	55	391
0,4	60	464

Вантажний поїзд  $i = -0,006\%$

$v, \text{ км/год}$	Розрахунковий гальмівний коефіцієнт										
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,28	0,3	0,33	0,35	0,4	0,45	0,5
10	53	40	35	31	30	29	28	28	27	26	25
15	107	77	63	56	53	51	49	48	45	43	42
20	185	127	102	88	82	79	75	73	68	65	62
25	291	193	151	128	119	114	107	104	96	91	86
30	430	276	212	178	163	156	146	141	130	121	114
35	607	379	287	237	217	206	192	184	169	157	147
40	818	503	376	308	280	265	246	236	21	198	185
45	1075	649	480	390	353	333	308	294	266	245	228
50	1377	818	600	483	436	411	379	371	325	298	276
55	1727	1013	730	590	530	498	452	436	391	357	330
60	2128	1233	890	709	630	590	543	520	464	422	389
65	2580	1479	1061	841	753	705	646	612	545	495	455

Рис. 9.7. Таблиця для визначення гальмівного шляху вантажного поїзда на спуску  $i = -6 \%$

2. Для визначення гальмівного шляху на спуску  $i = -6 \%$  під час гальмування від швидкості  $v_{\pi} = 57 \text{ км/год}$  використовуємо лінійну інтерполяцію

$$S_r = S_r^{55} + \frac{S_r^{60} - S_r^{55}}{60 - 55} (57 - 55).$$

Спочатку для гальмівного коефіцієнта  $\vartheta_p = 0,35$  отримаємо

$$S_r^{0,35} = 436 + \frac{520 - 436}{60 - 55} (57 - 55) = 469,6 \text{ м.}$$

Потім для  $\vartheta_p = 0,40$  отримаємо

$$S_r^{0,40} = 391 + \frac{464 - 391}{60 - 55} (57 - 55) = 420,2 \text{ м.}$$

Тепер визначимо гальмівний шлях для  $\vartheta_p = 0,37$  на спуску  $-6 \%$ :

$$S_{\Gamma}^{-6} = S_{\Gamma}^{0,35} + \frac{S_{\Gamma}^{0,35} - S_{\Gamma}^{0,4}}{0,4 - 0,35} (0,37 - 0,35) =$$

$$= 469,6 - \frac{469,6 - 420,2}{0,4 - 0,35} (0,37 - 0,35) = 449,84 \text{ м.}$$

По таблиці з додатка ПТР, показаної на рис. 9.8, для вихідних параметрів визначаємо значення гальмівного шляху на спуску  $i = -8 \text{ ‰}$  і заносимо в табл. 9.12.

$v$ , км/год	Розрахунковий гальмівний коефіцієнт										
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,28	0,3	0,33	0,35	0,4	0,45	0,5
10	59	43	37	33	31	30	29	29	27	27	26
15	122	83	67	59	55	53	51	50	47	45	43
20	215	139	109	93	86	83	78	76	71	67	64
25	344	212	162	136	125	119	112	108	100	94	89
30	518	307	229	189	173	164	153	147	135	125	118
35	742	425	311	253	230	217	202	193	176	163	152
40	1024	568	410	329	297	280	259	247	223	205	192
45	1371	738	525	418	376	353	325	309	278	254	236
50	1790	938	659	520	465	436	400	381	340	310	286
55	2287	1169	813	636	587	530	485	460	410	372	343
60	2867	1433	980	767	681	636	586	549	487	441	405
65	3537	1731	1181	913	809	753	686	648	573	517	473

Рис. 9.8. Таблиця для визначення гальмівного шляху вантажного поїзда на спуску  $i = -8 \text{ ‰}$

Таблиця 9.12

$\vartheta_p$	$v_{п}$ , км/год	$S_{\Gamma}$ , м
0,35	55	460
0,35	60	549
0,4	55	410
0,4	60	487

Як і в попередньому випадку, за номограми визначаємо гальмівний шлях на спуску  $i = -8 \text{ ‰}$  під час гальмування від швидкості  $v_{п} = 57 \text{ км/год}$ :

– для гальмівного коефіцієнта  $\vartheta_p = 0,35$

$$S_r^{0,35} = 460 + \frac{549 - 460}{60 - 55} (57 - 55) = 495,6 \text{ м,}$$

– для гальмівного коефіцієнта  $\vartheta_p = 0,40$

$$S_r^{0,40} = 410 + \frac{487 - 410}{60 - 55} (57 - 55) = 440,8 \text{ м.}$$

Для розрахункового гальмівного коефіцієнта  $\vartheta_p = 0,37$  отримуємо

$$\begin{aligned} S_r^{-8} &= S_r^{0,35} + \frac{S_r^{0,35} - S_r^{0,4}}{0,4 - 0,35} (0,37 - 0,35) = \\ &= 495,6 - \frac{495,6 - 440,8}{0,4 - 0,35} (0,37 - 0,35) = 473,68 \text{ м.} \end{aligned}$$

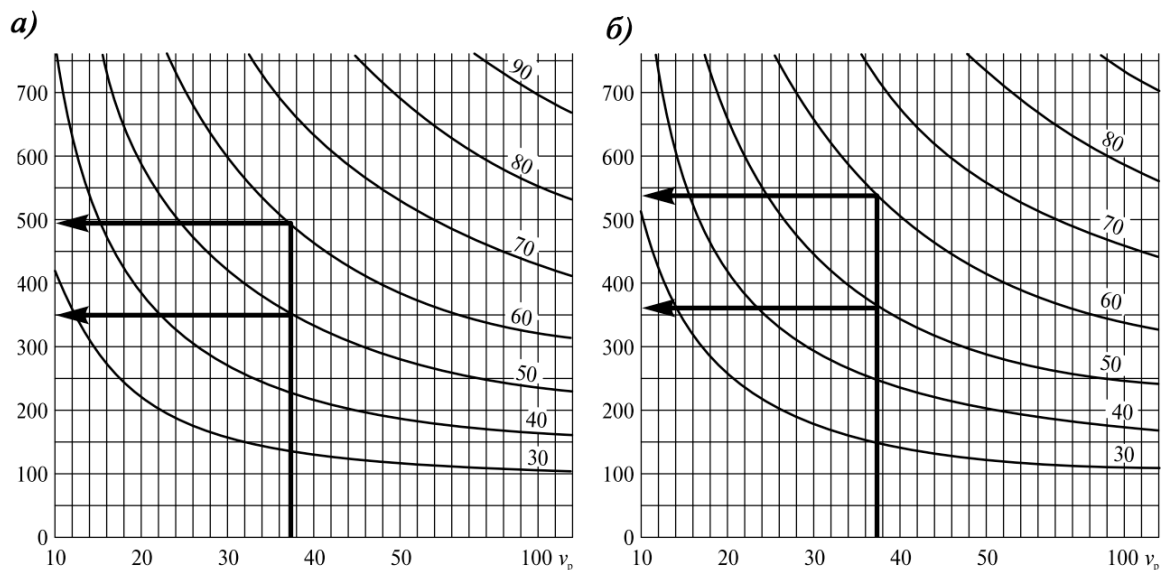


Рис. 9.9. Приклад визначення гальмівного шляху вантажного поїзда за номограмами:

а) на спускі 6 ‰; б) на спускі 8 ‰

3. Отже, отримано гальмівні шляхи під час гальмування від швидкості  $v_{п} = 57$  км/год і розрахунковому гальмівному коефіцієнті

$\vartheta_p = 0,37$  на спусках  $-6$  та  $-8$  ‰. Використовуючи лінійну інтерполяцію, визначаємо гальмівний шлях на спуску  $-7,4$  ‰

$$\begin{aligned} S_r^{-7,4} &= S_r^{-6} + \frac{S_r^{-8} - S_r^{-6}}{8 - 6} (7,4 - 6) = \\ &= 449,84 - \frac{473,68 - 49,84}{8 - 6} (7,4 - 6) = 466,53 \text{ м.} \end{aligned}$$

Таким чином, гальмівний шлях поїзда до зупинки дорівнює  $466,53$  м. Перевіримо рішення цього ж завдання по гальмівним номограмам у вигляді графіків (рис. 9.9). Як і в попередньому випадку, є номограми тільки для спусків  $-6$  і  $-8$  ‰ та графіки тільки для швидкостей  $50$  і  $60$  км/год.

З номограми для спуску  $i = -6$  ‰ за розрахунковим гальмівним коефіцієнтом  $\vartheta_p = 0,37$  і швидкості  $v = 60$  км/год гальмівний шлях  $S_r^{60} = 490$  м.

З номограми спуску  $i = -8$  ‰ за розрахунковим гальмівним коефіцієнтом  $\vartheta_p = 0,37$  і швидкості  $v = 50$  км/год гальмівний шлях  $S_r^{50} = 350$  м, а за  $v = 60$  км/год гальмівний шлях  $S_r^{60} = 525$  м.

Застосувавши той же метод, що і для табличної форми номограм для спуску  $i = -6$  ‰ і швидкості  $v = 57$  км/год, отримаємо

$$S_r^{-6} = S_r^{50} + \frac{S_r^{60} - S_r^{50}}{0,4 - 0,35} (57 - 50) = 350 - \frac{490 - 350}{60 - 50} (57 - 50) = 448 \text{ м.}$$

За номограмою для спуску  $i = -8$  ‰ і швидкості  $v = 57$  км/год, отримаємо

$$S_r^{-8} = S_r^{50} + \frac{S_r^{60} - S_r^{50}}{0,4 - 0,35} (57 - 50) = 350 - \frac{525 - 350}{60 - 50} (57 - 50) = 472,5 \text{ м.}$$

Використовуючи лінійну інтерполяцію, визначаємо гальмівний шлях на спуску  $i = -7,4$  ‰



$$S_r^{-7,4} = S_r^{-6} + \frac{S_r^{-8} - S_r^{-6}}{8-6} (7,4-6) = 448 - \frac{472,5-448}{8-6} (7,4-6) = 465,15 \text{ м.}$$

Отже, різниця гальмівних шляхів, отриманих за допомогою таблиць і графіків номограм, не перевищує 1,5 м, що задовольняє необхідній точності розрахунків.

### Питання для самоконтролю

1. Які види гальмування застосовують під час ведення поїзда?
2. Для яких цілей виробляють гальмівні розрахунки?
3. Як визначити допустиму швидкість руху на спусках різної крутизни?
4. Якими методами вирішують гальмівні завдання?
5. Як визначають необхідні гальмівні засоби поїзда для забезпечення безпеки руху?
6. Якими способами визначають шлях гальмування поїзда?
7. Як визначити час гальмування графічним і аналітичним методами?
8. У яких випадках вирішують гальмівні завдання по інтервалах часу?
9. Як визначають питомий основний опір руху поїзда, сформованого з різних одиниць рухомого складу?

## Розрахунок нагрівання електричних машин за методом Матвєєнко

### 10.1. Визначення температури обмоток якоря

Всі розрахунки на нагрівання тягових двигунів і генератора проводяться шляхом визначення перевищення температури обмоток якоря над температурою охолоджуючого повітря.

Побудова кривої перевищення температури ізоляції обмоток тягових машин над температурою навколишнього середовища  $\tau = f(S)$  (температура перегріву ТЕМ) виконується за допомогою діаграми теплових коефіцієнтів  $T_v/60 = f(\tau_\infty)$ . Наочність результатів розрахунків сприяє кращому розумінню фізичної суті процесу нагрівання та зменшує ймовірність помилок. Пропонований метод значно прискорює виконання розрахунків у порівнянні з аналітичним методом, тому що діаграми теплових коефіцієнтів є постійними для кожної серії локомотива та можуть бути використані неодноразово за умови постійних масштабів тягових розрахунків. Порядок розрахунку та побудови діаграми теплових коефіцієнтів найзручніше розглянути на прикладі розрахунків для тепловоза М62. Розрахунки представимо в табличній формі (табл. 10.1).

Графи 1 і 2 табл. 10.1 заповнюються за даними графіка залежності струму ТЕД від швидкості руху  $I_p = f(v)$  (рис. 10.1) для повного (ПП) і ослабленого поля (ОП1 та ОП2). У таблицю обов'язково записують значення струмів для характерних точок тягової характеристики: точка виходу на автоматичну характеристику – перехід з обмеження по зчепленню (або по пусковому струму) на обмеження по потужності; точки переходів  $ПП \leftrightarrow ОП1$ ,  $ОП1 \leftrightarrow ОП2$ . На додаток до характерних точок тягової характеристики на кожному відрізку кривої треба взяти

не менше двох-трьох значень струму кратних 50 або 100 А. Для обраних значень струмів за характеристикою струму (див. рис. 10.1) визначають відповідні значення швидкості (графа 2). Графи 3 і 4 заповнюють за даними теплових характеристик тягового електродвигуна (рис. 10.2). Для струмів, зазначених в графі 1, визначають значення теплової постійної  $T$  і встановилася температури ( $\tau_{\infty}$ ). Потім проводять розрахунок даних графа 5 –  $Tv/60$ . За даними табл. 10.1 для кожної гілки: обмеження по зчепленню (або по пусковому струму, наприклад, для тепловоза ТЭП60), ПП; ОП1 та ОП2 будують у відповідних масштабах криві  $Tv/60 = f(\tau_{\infty})$  (рис. 10.3) із зазначенням значень відповідної швидкості руху (графа 2) біля кривих.

Таблиця 10.1

**Визначення теплових коефіцієнтів для тепловоза М62**

$I, A$	$v, \text{км/год}$	$T, \text{хв}$	$\tau_{\infty}, \text{град}$	$Tv/60, \text{од.}$
1	2	3	4	5
Обмеження по зчепленню				
938	1	42,8	216,5	0,71
893	5	39,8	187,0	3,32
833	10	37,2	154,5	6,20
818	11,5	36,6	148,0	7,02
Повне збудження				
818	11,5	36,6	148,0	7,02
717	15	33,3	111,5	8,32
600	20	30,2	81,0	10,07
467	30	27,9	58,5	13,95
433	33,5	27,4	54,0	15,30
Ослаблене збудження 1-го ступеня				
600	29	30,2	81,0	14,60
504	40	28,4	64,0	18,93
445	50	27,6	55,5	23,00
404	60	27,2	51,0	27,20
400	61	27,15	50,0	27,60
Ослаблене збудження 2-го ступеня				
575	43,5	29,7	76,0	21,53
533	50	28,8	68,5	24,00
488	60	28,2	61,5	28,20
454	70	27,7	57,0	32,32
425	80	27,4	53,0	36,53
400	90	27,15	50,0	40,72



Рис. 10.1. Характеристика струму тягового електродвигуна ЭД118 в залежності від швидкості руху тепловоза М62

Для побудови кривої нагрівання тягових машин  $\tau = f(S)$  в режимі холостого ходу (а для тепловоза ТЭП60 і в режимі обмеження розгону по пусковому струму) розраховують значення теплових коефіцієнтів

$$T_0 v / 60 = f(\tau_\infty) \text{ та } T_p v / 60 = f(\tau_\infty),$$

де  $T_0 = 24,3$  хв – тепла стала двигуна тепловоза М62 при холостому ході;

$T_p = 58,1$  хв – тепла стала двигуна тепловоза ТЭП60 при розгоні;

$\tau_\infty = 353$  °С – стала температура двигуна тепловоза ТЭП60 під час розгону.

Коефіцієнти  $T_p v / 60$  під час розгону тепловоза ТЭП60 для швидкостей 10 і 20 км/год рівні відповідно 9,69 і 19,37. Для режиму холостого ходу тепловоза М62  $T_0 v / 60$  наведені в табл. 10.2.

Зрушення з місця та розгін поїзда, як правило, відбуваються за максимально допустимі струми тягового двигуна, який залишається практично постійним до виходу на автоматичну характеристику (наприклад, пусковий струм тепловоза ТЭП60). Тому що при цьому  $T_p$  – величина постійна, відповідна струму під час розгону, то залежність

$T_p v/60 = f(\tau_{\infty})$  представляє пряму лінію, проведену через точку  $\tau_{\infty p}$  паралельно осі ординат (лінія  $\tau_{\infty p} \rightarrow T_p v/60$  на рис. 10.4, а).

Таблиця 10.2

**Теплові коефіцієнти для режиму холостого ходу тепловоза М62**

Швидкість тепловоза, км/год	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$T_0 v/60$	4,05	8,1	12,15	16,2	20,25	24,3	28,35	32,4	36,45

Для режиму вибігу та у разі пневматичного гальмування значення  $T_0$  також постійне, а значення  $\tau_{\infty 0} = 0$ . Тому залежність  $T_0 v/60 = f(\tau_{\infty})$  також є прямою лінією на осі ординат при  $\tau_{\infty 0} = 0$  (лінія 4 на рис. 10.3).

Для графічної побудови необхідно вибрати масштаби діаграми теплових коефіцієнтів і кривої нагрівання  $\tau = f(S)$ . Між масштабами повинне дотримуватися співвідношення

$$m_S / m_{\tau} = m_{T v/60} / m_{\tau_{\infty}},$$

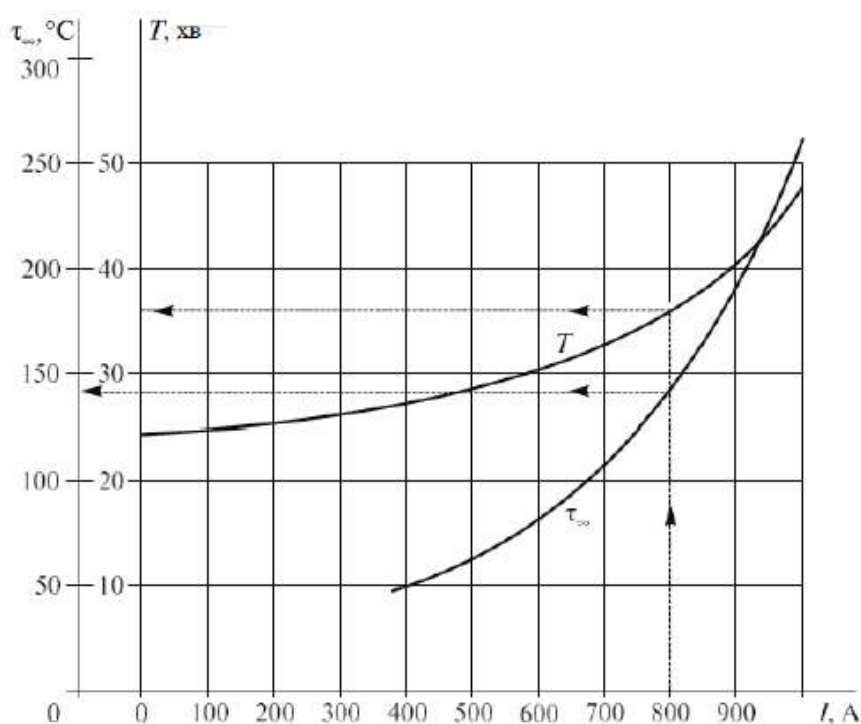


Рис. 10.2. Теплова характеристика ТЕД ЭД118 тепловоза М62

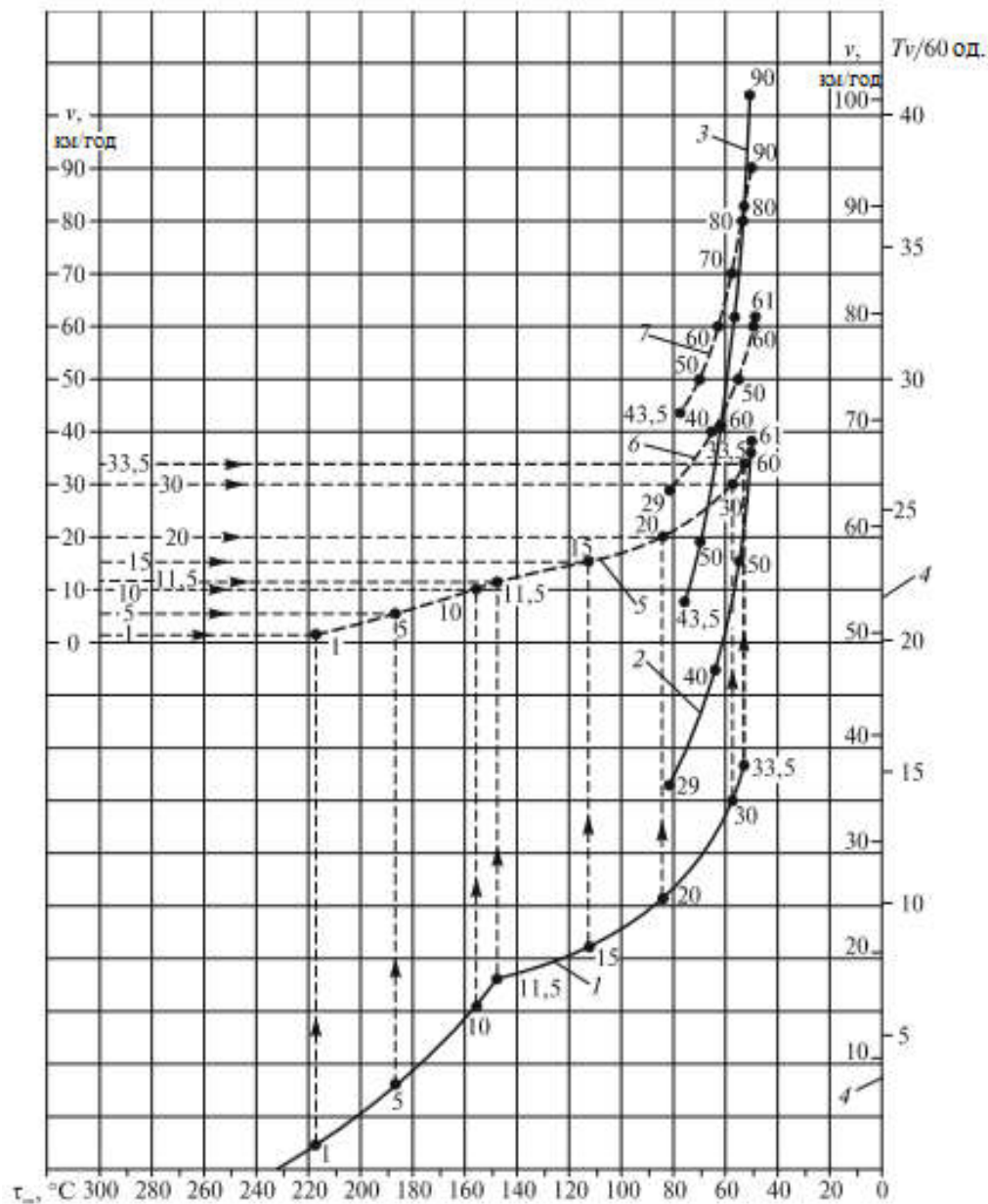


Рис. 10.3. Діаграма теплових коефіцієнтів для тепловоза М62:

1 – крива обмеження по зчепленню і повному збудженню; 2 – крива теплових коефіцієнтів при першому ослабленні збудження; 3 – крива теплових коефіцієнтів при другому ослабленні збудження; 4 – лінія  $T_0 v / 60 = f(\tau_{\infty})$  при  $\tau_{\infty} = 0$  °С; 5 – допоміжні криві (штрихові) залежності швидкості руху  $v$  від звичайної температури (криві: 5 – для ПП, 6 – для ОП1 і 7 для ОП2 збудження)

де  $m_S$  – масштаб шляху, обраний раніше при побудові кривої швидкості  $v = f(S)$ ;  
 $m_\tau$  – масштаб кривої нагрівання (температури перегріву);  
 $m_{T_0v/60}$  – масштаб теплових коефіцієнтів;  
 $m_{\tau_\infty}$  – масштаб температури, що встановилася.

Для зручності побудови на графіку теплових коефіцієнтів наносять допоміжні криві залежності швидкості руху  $v$  від температури, що встановилася (криві 5, 6 і 7). Для їх побудови наносять в довільному масштабі тимчасову шкалу швидкості. Потім з точок швидкості на кривих 1, 2 і 3 роблять вертикальне перенесення значень  $\tau_\infty$  на відповідні значення швидкості тимчасової шкали. Пунктирними лініями показаний порядок побудови допоміжної кривої  $v = f(\tau_\infty)$  для повного поля тягових двигунів (крива 5). Аналогічно будують допоміжні криві для ослабленого збудження ОП1 та ОП2 (криві 6 і 7).

Криву перевищення температури ТЕД в режимі розгону (до виходу на автоматичну характеристику) будують таким чином (див. рис. 10.4, а). На осі  $S$  побудованої кривої швидкості вибирають відрізок  $\Delta S_1$  (рекомендується вибрати  $\Delta S_1 = 2$  мм), для якого по кривій  $v(S)$  знаходять середню швидкість руху поїзда  $v_{cp1}$ . На осі  $T_0v/60$  вибирають точку  $B$ , відповідну  $v_{cp1}$ , а на осі абсцис – точку  $A$ , що відповідає початковому перевищенню температури  $\tau_0$ . Через точки  $A$  і  $B$  проводять пряму і до неї з точки  $C$  планшета кривої швидкості відновлюють перпендикуляр в межах відрізка шляху  $\Delta S_1$ .

Точка  $\tau_{k1}$  відповідає в обраному масштабі  $m_\tau$  кінцевому перевищенню температури, що досягається в кінці відрізка  $\Delta S_1$ . Потім обирають відрізок  $\Delta S_2$  (не більше 3 мм) і визначають середню на цьому відрізку шляху швидкість руху  $v_{cp2}$ . Точка  $A'$  відповідає температурі  $\tau_{k1}$  (ця температура є початковою для другого відрізка шляху), а точка  $B'$  відповідає середній швидкості руху  $v_{cp2}$  на відрізку шляху  $\Delta S_2$ . Провівши через ці дві точки пряму лінію, відновлюємо перпендикуляр з точки  $\tau_{k1}$  до кінця відрізка  $\Delta S_2$  (точка  $\tau_{k2}$ ). Аналогічні побудови виконують до швидкості, що відповідає швидкості виходу на автоматичну характеристику (точка  $D$  кривої швидкості).

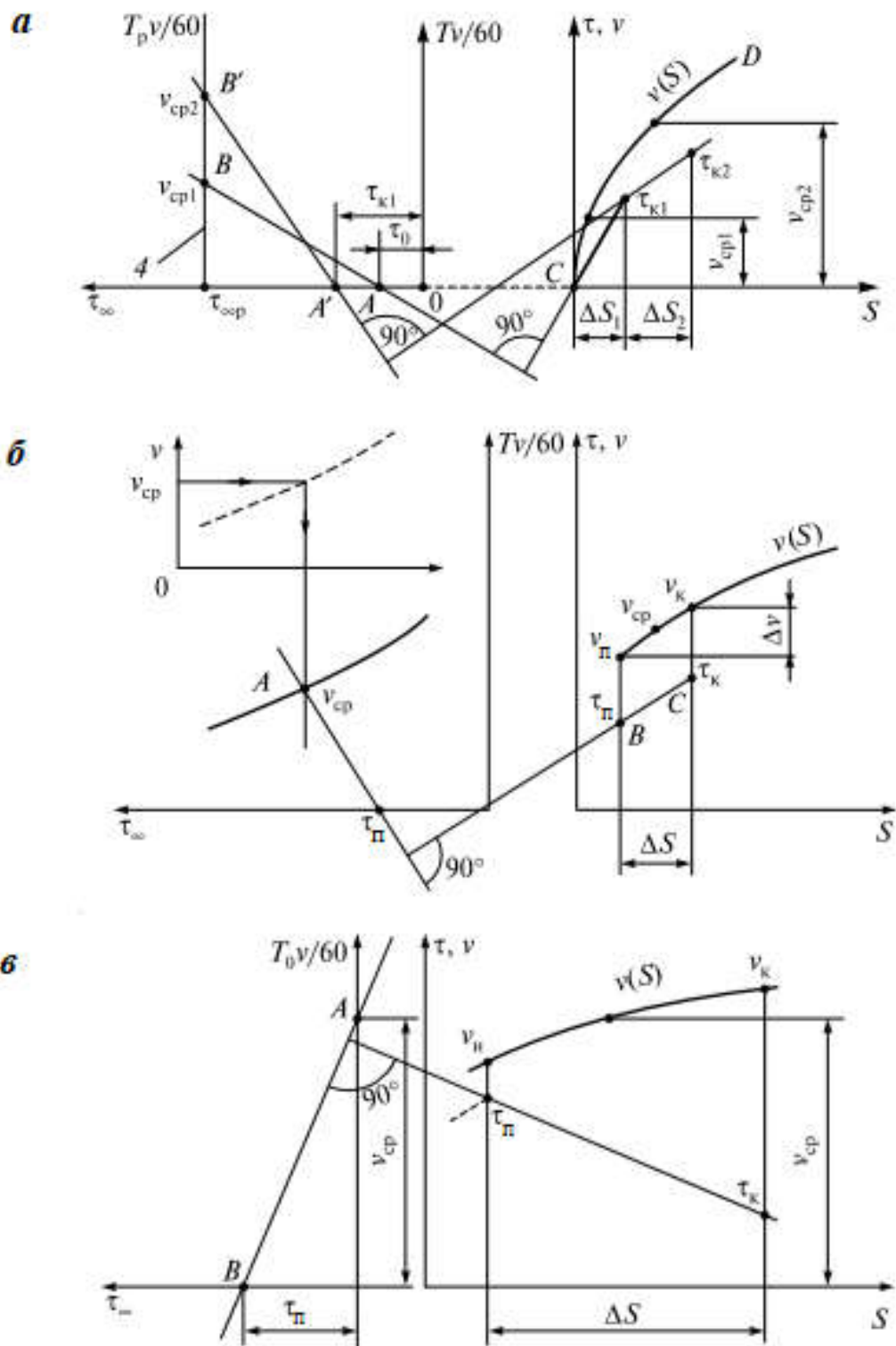


Рис. 10.4. Розрахунок нагріву обмоток тягових електродвигунів за методом Матвєєнко:

*a* – під час зрушення та розгону поїзда; *б* – після виходу на автоматичну характеристику; *в* – у разі руху в режимі холостого ходу



Після виходу на автоматичну характеристику графічні побудови продовжують виконувати аналогічно. На осі  $S$  обирається відрізок  $\Delta S$  і для нього визначають середню швидкість руху  $v_{cp}$  (рис. 10.4, б), якщо значення  $v_{cp}$  не вказано на кривих 1, 2 і 3 діаграми теплових коефіцієнтів (див. рис. 10.3), то його знаходять, користуючись допоміжними кривими 5, 6 і 7. Поєднавши прямою лінією точки  $v_{cp}$  (точка  $A$ ) і точку початкової температури  $\tau_{п}$  на відрізку  $\Delta S$  (див. рис. 10.4, б), відновлюють перпендикуляр з точки  $B$  кривої температури перегріву до кінця відрізка  $\Delta S$  (точка  $C$ ).

Кінцева температура перегріву  $\tau_{к}$  на відрізку  $\Delta S$  є початковою для наступного відрізка шляху.

Відрізки шляху  $\Delta S$  слід вибирати так, щоб межі відрізків були межами переходу з одного режиму руху на інший, а також точками перелому кривої швидкості під час переходу поїзда з одного елемента профілю на інший. Для більшої точності розрахунків відрізки шляху  $\Delta S$  слід вибирати так, щоб зміна швидкості на графіку була не більше 10 мм ( $\Delta v \leq 10$  мм).

Під час руху без струму побудову кривої перевищення температури виконують наступним чином (рис. 10.4, в). Для обраного відрізка шляху  $\Delta S$  визначають середню швидкість руху поїзда  $v_{cp}$ . Її значення відкладають на осі  $T_0 v / 60$  (цифри зліва від осі) діаграми теплових коефіцієнтів (точка  $A$ ). На осі  $\tau_{\infty}$  визначають точку  $B$ , відповідну початковій температурі на відрізку  $\Delta S$ . Через точки  $A$  і  $B$  проводять пряму лінію і до неї відновлюють перпендикуляр  $\tau_{п} - \tau_{к}$  в межах відрізка  $\Delta S$ . Довжини відрізків шляху при постійній швидкості руху (без переломів кривої швидкості руху) обирають не більше 1 км. Для зручності побудови криву температури  $\tau(S)$  обривають аналогічно кривій часу.

Тому що розрахунки на нагрівання генератора та тягових електродвигунів виконують шляхом визначення перевищення температури лімітуючих обмоток над температурою охолоджуючого повітря, то температура нагріву обмоток тягових машин обчислюється за формулою:

$$\tau = \tau_{\max} + t_{zn},$$

де  $\tau_{\max}$  – максимальна температура перевищення нагрівання тягової машини на ділянці, визначена по кривій  $\tau(S)$ , °C;

$t_{зп}$  – температура навколишнього повітря, °С.

Для більшості локомотивів температуру охолоджуючого повітря приймають рівною температурі зовнішнього повітря. Найбільше допустиме перевищення температури обмоток над температурою навколишнього повітря при його максимальній температурі  $t_{зп\max} \leq 40$  °С визначають за табл. 10.3.

Таблиця 10.3

**Допустиме перевищення температури обмоток ТЕД над температурою зовнішнього повітря**

Обмотки	$\tau_{\text{доп}}$ для класу ізоляції, °С		
	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>
Якір	120 <sup>1)</sup>	140 <sup>2)</sup>	160 <sup>3)</sup>
Полюси	130	155	180

*Примітка.* 1) тепловози ЧМЭЗ, ТЭМ2, М62, 2М62, ТЭ10Л, ТЭП60; 2) тепловози ТЭ10В, ТЭ10М, ТЭ116; 3) тепловоз ТЭП70.

За максимальну температуру зовнішнього повітря більше +40 °С допустиме перевищення температур обмоток тягових електричних машин зменшують на відповідне число градусів. Максимальну температуру зовнішнього повітря приймають за даними метеорологічних станцій як середню багаторічну (не менше 5 років) по вимірах в 7, 13 і в 19 годин за місцевим часом для літнього періоду за червень, липень і серпень, і визначають за формулою:

$$t_{зп} = \frac{t_7 + 2t_{13} + t_{19}}{4},$$

але не нижче +15 °С, а для зимового періоду за грудень, січень і лютий – не нижче 0 °С.

Уразі відправлення тепловоза зі станції після тривалої стоянки (понад 2 год) початкову температуру перегріву обмоток  $\tau_{п}$  приймають рівною +15 °С. За менші зупинки температуру перегріву визначають за попереднім рейсом як температуру в момент прибуття, знижуючи її за час стоянки по кривій охолодження, що приводиться в ПТР.

*Перевірку тягових електричних машин на нагрівання виконують в*

тому випадку, коли вводиться обмеження швидкості руху на найважчих підйомах або на підході до них.

На ділянках з зосередженими підйомами перевірку нагрівання генератора та тягових двигунів виконують від станції відправлення до проходу останнього пікету підйому. Розрахунок проводиться для літнього та зимового часу.

Найбільше перевищення температури, отримане під час розрахунку, в зимовий час слід привести до розрахункової температури зовнішнього повітря з урахуванням впливу пристрою снігозахисту за формулою:

$$\tau_p = \tau K_{сз} K_{зп},$$

де  $K_{сз}$  – коефіцієнт, що враховує підвищення температури обмоток ТЕД від зниження витрати охолоджуючого повітря фільтрами захисту від снігу, приймається по ПТР. Для зимового періоду  $K_{сз} = 1,1$ , а для літнього –  $K_{сз} = 1,0$ ;

$K_{зп}$  – коефіцієнт приведення температури перевищення обмоток ТЕД до розрахункової температури зовнішнього повітря  $t_{зп}$ .

Значення коефіцієнта  $K_{зп}$  для перерахунку перевищення температури обмоток ТЕД літнього періоду на зимовий наведені в табл. 10.4.

Таблиця 10.4

**Значення коефіцієнта  $K_{зп}$  для перерахунку перевищення температури обмоток ТЕД літнього періоду на зимовий**

Обмотки	Температура атмосферного повітря зимового періоду							
	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35
ТЕД	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35
Полюсів	0,9	0,92	0,94	0,96	0,98	1	1,02	1,04
Якоря	0,94	0,95	0,96	0,98	0,99	1	1,01	1,02

Для випадків, коли тепловоз працює на проміжних позиціях контролера, перевищення температури  $\tau_{\infty}$ , наведене в теплових характеристиках тягових електричних машин, множиться на коефіцієнт  $K_{п}$ . Його значення наведені в табл. 10.5.

**Значення коефіцієнта  $K_{\Pi}$  для визначення температури обмоток ТЕД у разі роботи тепловоза на проміжних позиціях**

Позиція контролера $n_k$	13...12	11	10	9
Коефіцієнт $K_{\Pi}$	1,05	1,08	1,15	1,2

У разі необхідності результати розрахунку перегріву електричних машин слід перевіряти дослідними поїздками. Перед їх проведенням за технічними даними визначають лімітуючу по нагріванню електричну машину. За результатами попередніх випробувань тепловоза – з розподілу охолоджуючого повітря та струмів навантаження по двигунах визначають двигун, що працює в найбільш важких умовах. У дослідних поїздках температуру обмоток заміряють перед відправленням і після прибуття на кінцевий пункт. Місця зупинок для замірів обирають на підставі тягових розрахунків, аналізу профілю колії та даних попередніх дослідних поїздок. Крім того, в тих місцях, де за результатами попередніх розрахунків очікуються максимальні температури та різкі зміни температури нагрівання, також роблять зупинки для визначення температури при зупиненому поїзді.

Попередні розрахунки по нагріванню в цьому випадку можуть бути виконані для найбільш навантаженого двигуна з урахуванням нерівномірного струморозподілу. Для цього характеристику  $I_d = f(v)$  перебудовують з урахуванням підвищення струмів двигуна на певну величину (можливо й різну) на різних ділянках струмового характеристики (ПП, ОП1, ОП2). Розрахунки потім ведуть за звичайною схемою.

## **10.2. Розрахунок нагрівання тягового електродвигуна (головного генератора) аналітичним методом**

Розрахунок нагрівання тягових електричних машин аналітичним методом проводиться за даними кривих швидкості  $v = f(S)$  і часу  $t = f(S)$  руху поїзда з використанням струмових  $I = f(v)$  і теплових характеристик тягових двигунів (головного генератора)  $T = f(I)$  та  $\tau_{\infty} = f(I)$ .

Температура перегріву обмотки тягового двигуна (головного генератора) над температурою навколишнього середовища визначається за формулою:

$$\tau = \tau_{\infty} \frac{\Delta t}{T} + \tau_0 \left( 1 - \frac{\Delta t}{T} \right).$$

Охолодження тягових двигунів (генераторів) під час руху без струму розраховується за формулою:

$$\tau = \tau_0 \left( 1 - \frac{\Delta t}{T} \right).$$

При цьому інтервали по шляху  $\Delta S$  (або  $\Delta t$ ) обирають, дотримуючись умови  $\Delta t/T \leq 0,1$ . Де  $\tau$  – температура перегріву за обраний розрахунковий інтервал, °С;  $\tau_{\infty}$  – усталена температура перегріву за середню швидкість (струм) в розрахунковому інтервалі, °С;  $\tau_0$  – початкова температура перегріву розрахункового інтервалу, °С;  $\Delta t$  – час проходження розрахункового інтервалу, хв;  $T$  – постійна часу за середню швидкість (струм) в розрахунковому інтервалі, хв.

Результати розрахунку представляють у вигляді таблиці (табл. 10.6). В неї:

- $\Delta S$  (графа 1) – розрахункові інтервали по шляху вибирають так само, як і за графічним методом А. І. Матвеєнко, додатково дотримуючись умові  $\Delta t/T \leq 0,1$ ;
- $v_{\text{cp}}$  (графа 2) – середня швидкість руху поїзда на обраному інтервалі, що визначається по кривій швидкості, км/год;
- $I_{\text{cp}}$  (графа 3) – середнє значення струму електричної машини, що визначається за кривою струму по величині  $v_{\text{cp}}$ , А;
- $T$  та  $\tau_{\infty}$  (графи 4 і 5) – теплові характеристики електричної машини, що визначаються за даними (див. рис. 10.2), за середнє значення струму в розрахунковому інтервалі  $I_{\text{cp}}$ , хв та °С відповідно;
- $\Delta t$  (графа 6) – час проходження поїздом розрахункового інтервалу шляху, хв;
- $\tau_0$  та  $\tau_{\text{к}}$  (графи 10 і 12) – початкова та кінцева температури перегріву тягової електричної машини в розрахунковому інтервалі, °С.

Таблиця 10.6

## Розрахунок нагрівання тягових електричних машин аналітичним методом

$\Delta S$	$\nu_{cp}$	$I_{cp}$	$\tau_{\infty}$	$-T$	$\Delta t$	$\Delta t/T$	$\frac{\tau_{\infty} \Delta t}{T}$	$\Delta t/T$	$\tau_0$	$\tau_0(1 - \Delta t/T)$	$\tau_k$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Delta S_1$	$\nu_{cp1}$	$I_{cp1}$	$\tau_{\infty 1}$	$-T_1$	$\Delta t_1$	$\Delta t_1/T_1$	$\frac{\tau_{\infty 1} \Delta t_1}{T_1}$	$\Delta t_1/T_1$	$\tau_{01}$	$\tau_0(1 - \Delta t_1/T_1)$	$\tau_{k1}$
$\Delta S_2$	$\nu_{cp2}$	$I_{cp2}$	$\tau_{\infty 2}$	$-T_2$	$\Delta t_2$	$\Delta t_2/T_2$	$\frac{\tau_{\infty 2} \Delta t_2}{T_2}$	$\Delta t_2/T_2$	$\tau_{02} = \tau_{k1}$	$\tau_0(1 - \Delta t_2/T_2)$	$\tau_{k2}$
$\Delta S_3$	$\nu_{cp3}$	$I_{cp3}$	$\tau_{\infty 3}$	$-T_3$	$\Delta t_3$	$\Delta t_3/T_3$	$\frac{\tau_{\infty 3} \Delta t_3}{T_3}$	$\Delta t_3/T_3$	$\tau_{03} = \tau_{k2}$	$\tau_0(1 - \Delta t_3/T_3)$	$\tau_{k3}$
$\Delta S_4$	—	$I=0$	—	$-T_0$	$\Delta t_4$	$\Delta t_4/T_0$	—	$\Delta t_4/T_0$	$\tau_{04}$	$\tau_0(1 - \Delta t_4/T_4)$	$\tau_{k4}$

Подальші розрахунки виконуються аналогічно розрахункам за методом А.І. Матвєєнко.

### **Запитання для самоконтролю**

- 1. В яких випадках необхідно перевіряти електричні машини на нагрівання?*
- 2. Які підготовчі побудови необхідні для графічного визначення нагріву тягових електродвигунів?*
- 3. Як визначити нагрів обмоток тягових електродвигунів під час зрушення з місця?*
- 4. Як визначається нагрів тягових електродвигунів після виходу на автоматичну характеристику?*
- 5. Як будується крива охолодження в режимі холостого ходу тягового електродвигуна?*

## Визначення витрат енергії на тягу поїздів

### 11.1. Фактори, що впливають на витрату енергії на тягу поїздів

Про важливість нормування та контролю витрати енергії в роботі локомотивних депо говорить хоча б той факт, що витрати енергії на тягу поїздів становлять близько 12...14 % від експлуатаційних витрат на перевізну роботу, а в локомотивному господарстві вони доходять до 40 % від загальних експлуатаційних витрат. Нижче перераховані фактори, які впливають на витрату на тягу.

1. *Вага состава*  $Q$ , кН. На тягу впливає не тільки вага, але і те, з яких типів вагонів сформовано состав, яке осьове навантаження у кожному вагоні в составі, тому що локомотив переміщує не вагу состава, а долає опір руху поїзда. Опір руху состава залежить від типу колії, швидкості руху, типу вагонів в составі та осьового навантаження

$$\omega_0'' = a + \frac{b}{q_0} + \frac{cv}{q_0} + \frac{dv^2}{q_0}, \quad (11.1)$$

де коефіцієнти  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  залежать від типу вагонів, типу підшипників та типу колії.

Наприклад, состав із чотиривісних порожніх вагонів на роликових підшипниках вагою  $Q = 30000$  кН з осьовим навантаженням  $q_0 = 60$  кН на вісь за швидкістю руху  $v = 50$  км/год має повний основний опір руху на прямій горизонтальній колії

$$W_0'' = Q\omega_0'' = Q \left( 0,7 + \frac{30 + v + 0,025v^2}{q_0} \right) =$$



$$= 30000 \left( 0,7 + \frac{30 + 50 + 0,025 \cdot 50^2}{60} \right) = 92250 \text{ Н.}$$

За осьовому навантаженні  $q_0 = 220$  кН/вісь такий же опір буде мати состав вагою

$$Q = \frac{W_0''}{\omega_0''} = \frac{92250}{1,348} = 68450 \text{ кН,}$$

тобто майже в 2,3 важче першого складу.

2. *Схеми формування состава* (цистерни, платформи, криті та т.п.), їх технічний стан і взаємне розташування.

3. *Тип локомотива і число секцій.*

4. *Профіль і план колії.*

5. *Допустимі швидкості руху поїзда по перегонах і станціях, постійні та тимчасові попередження.* На витрати енергії впливає не тільки величина зниження швидкості, але план і профіль ділянки, де поїзд знижує швидкість.

6. *Заданий графік руху:*

а) час ходу по перегонах, тобто задана технічна швидкість руху;

б) число та місця зупинок.

7. *Метеорологічні фактори:*

а) температура зовнішнього повітря. Це підтверджується статистичними даними витрати енергії на тягу (табл. 11.1).

Таблиця 11.1

**Збільшення опору руху вагонів за швидкістю 50 км/год в залежності від температури зовнішнього повітря за різних осьових навантаженнях**

Температура зовнішнього повітря	Збільшення опору руху у разі низьких температур зовнішнього повітря в залежності від осьового навантаження вагона, %	
	$q_0 = 210$ кН/на вісь	$q_0 = 55$ кН/на вісь
0	+1,3	+1,8
-20	+2,9	+4,0
-40	+4,6	+6,5

Якщо збільшується опір руху, то природно повинна збільшитися і витрата енергії на тягу.

б) швидкість і напрям вітру (табл. 11.2).

Таблиця 11.2

**Збільшення витрати енергії на тягу від вітру**

Швидкість вітру $v_v$ , м/с	Збільшення витрати енергії на тягу $\Delta Q$ , %
8...12	5
10...14	7
14...18	14
17...20	17

**8. Режим ведення поїзда.**

Однаковий час ходу по перегону, особливо, якщо він закладений в графік «із запасом», або якщо повний опір складу менше, ніж закладений в розрахунок, можна отримати різними режимами ведення поїзда.

Наприклад, для одного з перегонів залізниці були розраховані варіанти ведення поїзда  $M_Q = 30000$  т тепловозом за постійний час ходу. У цих варіантах час ходу відрізнявся на 0,1 хв (6 с) при загальному часі ходу, що дорівнює 10 хв. Мінімальна витрата палива склала 94 кг, а максимальна – 114 кг. Тобто, різниця в часі склала 1 %, а різниця у витратах палива – 21,3 %. Це підтверджується також і практикою роботи локомотивних депо. Різниця у витраті палива на ведення однакових поїздів в однакових умовах доходить до 20 %.

У Методичних основах визначення витрати електричної енергії та дизельного палива на тягу поїздів наведені дані питомої витрати електроенергії електровозами (табл. 11.3) в пасажирському русі та дані питомої витрати електроенергії електропоїздами (табл. 11.4 і 11.5).

Ці результати є середніми і не відображають конкретні умови руху поїздів, але вони показують вплив конструкції локомотива (електропоїзда) на витрату енергії на тягу.

Таблиця 11.3

**Питома витрата енергії електровозами на вимірювач**

Тип електровоза	ЧС2	ЧС2Т	ЧС6	ЧС7	ЧС4	ЧС4Т	ЧС8	ВЛ65	ЕП10
Питома витрата енергії кВт·год/10 <sup>4</sup> т·км	137,6	122,1	123,5	132,5	154,7	168	176	183,4	118,8

Таблиця 11.4

**Питома витрата енергії електропоїздами на вимірювач**

Електропоїзд	ЕДТ2	ЕТ2	ЕД4	ЕД4М	ЕД2М	ЕД4е	ЕД2и	ЕД6	ЕТД2А	ЕД9Т	ЕД9М	ЕД1	ЕН3
Питома витрата енергії кВт·год/10 <sup>4</sup> т·км	35,7	32,6	34,2	34,2	35,0	31,8	42,9	30,5	30,5	44,0	44,0	59,4	33,0

Таблиця 11.5

**Характеристики та енергетичні показники електропоїздів**

Серія електропоїзда	ЕТ2А	ЕТ2А	ЕД6	ЕМ2І	ЕТ2	ЕД2Т	ЕД4Е	ЕД4М
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Складність	2Г+5М=3П	2Г+4М=4П	2Г+5М=4П	2Г+5М=3П	2Г+5М=3П	2Г+5М=3П	2Г+5М=3П	2Г+5М=3П
Питома потужність, кВт/т	12,35	10,21	12,3	6,13	7,62	7,41	7,30	7,49
Прискорення до 60 км/год, м/с <sup>2</sup>	0,82	0,64	0,63	0,53	0,65	0,67	0,69	0,66
Максимальна швидкість розгону, км/год	91	101	104	90	100	102	99	100
Витрата електроенергії на розгін, кВт·год	75,9	96,1	102,5	72,5	92,5	105,4	97,9	97,3
Швидкість початку гальмування, км/год	78	92	83	85	95	100	91	93
Повернення електроенергії, кВт·год	23,5	25,2	42,5	—	36,5	42,2	42,5	37
Питома витрата електроенергії:								
– Вт·год/т·км	30,52	33,18	30,55	42,86	32,6	35,7	31,76	34,17
– Вт·год/пас·км	12,96	13,66	12,11	17,30	12,60	13,43	12,27	12,87

## 11.2. Визначення витрати палива на ведення поїзда

**Розрахунок витрати палива тепловозом.** Розрахунок витрат палива виконують за побудованими на графіку кривими швидкості та часу руху поїзда на заданій ділянці (або розрахованим аналітичним методом). На кривій швидкості та часу роблять розмітку режимів роботи локомотива – тяга, холостий хід і гальмування. Загальна витрату палива  $E_T$ , кг, тепловозом за поїздку обчислюють за формулою:

$$E_T = \sum_{i=1}^n G_i \Delta t_i + g_x t_x + g_{ct} t_{ct}, \quad (11.2)$$

де  $G_i$  – витрата палива, відповідна швидкості руху поїзда в режимі тяги на певній позиції контролера машиніста на  $i$ -му відрізку шляху, кг/хв;

$\Delta t_i$  – час руху поїзда по  $i$ -му відрізку шляху, хв;

$g_x$  – витрата палива тепловозом на холостому ході, кг/хв;

$t_x$  – час роботи дизеля на холостому ході, хв;

$g_{ct}$  – витрата палива тепловозом на стоянках і під час руху по станційних коліях, кг/хв;

$t_{ct}$  – час роботи дизеля на стоянках і під час руху по коліях станцій, хв.

Витратні характеристики палива тепловозів в режимах тяги та холостого ходу наведені в додатку діючих ПТР. У сучасних тепловозах в режимі тяги витрата палива залежить від позиції контролера та мало залежить від швидкості руху. Як приклад на рис. 11.1 і 11.2 наведені характеристики витрати палива тепловозами 2ТЭ116 та 2ТЭ10Л (В, М, С) в режимі тяги.

Значення  $g_x$  вибирають в залежності від частоти обертання колінчастого вала дизеля за витратними характеристикам для холостого ходу (рис. 11.3).

На стоянках витрата палива  $g_x$  знаходять в табл. 11.6, де наведені значення частоти обертання колінчастого вала тепловозних дизелів на холостому ході. У цій же таблиці дані значення  $g_x$ , прийняті в припущенні про рух одиночних тепловозів по коліях станцій на першій позиції контролера машиніста зі швидкістю 10...15 км/год.

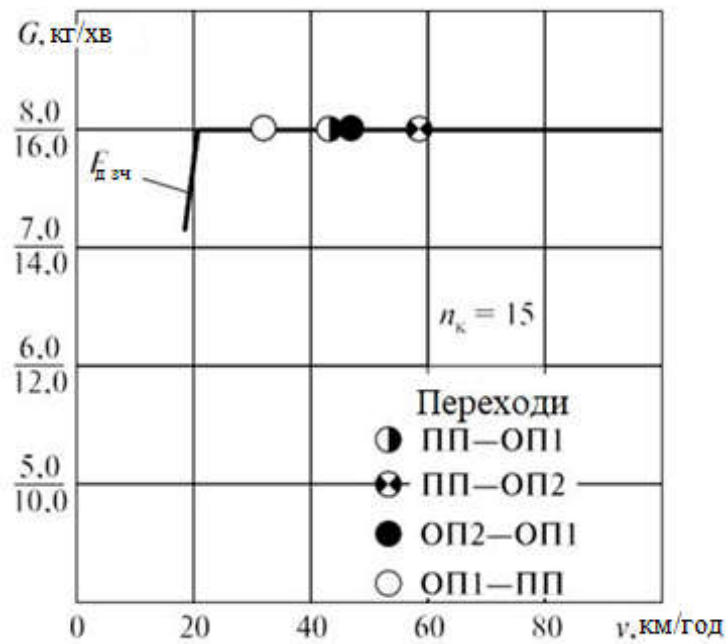


Рис. 11.1. Витрата палива тепловозом 2ТЭ116 в залежності від швидкості (в чисельнику ординат дані відносяться до однієї секції, в знаменнику – до двох секцій) в режимі тяги

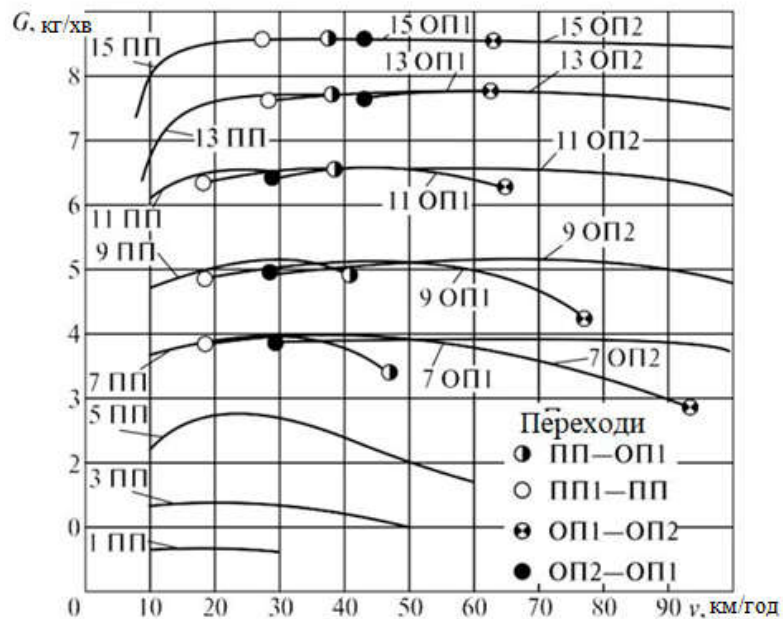


Рис. 11.2. Характеристика витрати палива тепловозами 2ТЭ10Л (В, М, С) в режимі тяги в залежності від позиції контролера машиніста та швидкості руху

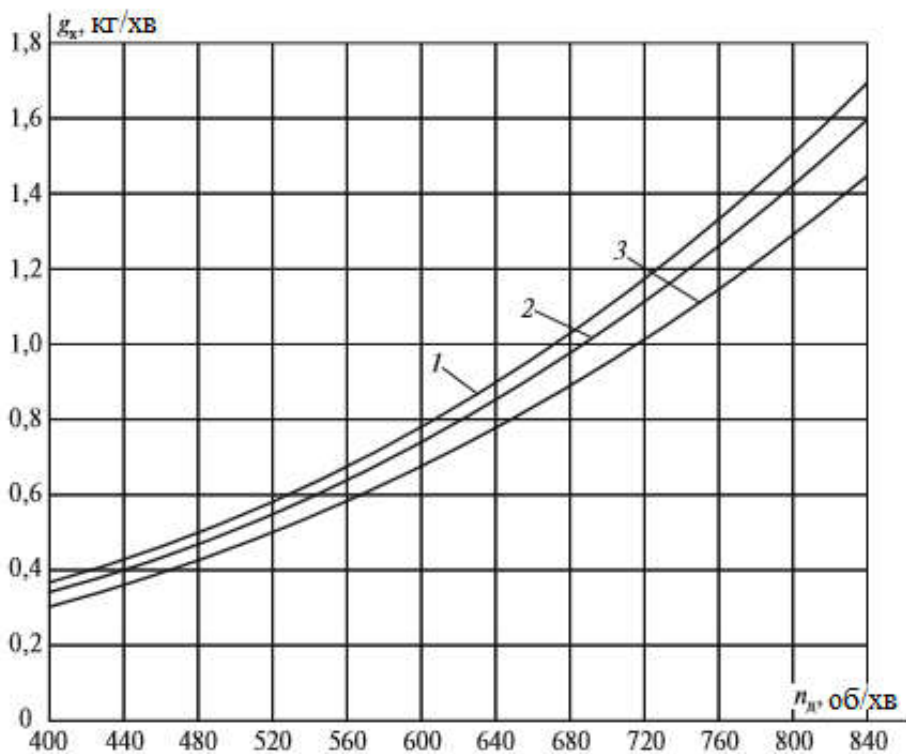


Рис. 11.3. Витрата палива на холосту роботу дизеля в залежності від частоти обертання колінчастого вала:

1 – вентилятор в літньому режимі; 2 – вентилятор в зимовому режимі;  
3 – вентилятор вимкнений

Питому витрату палива знаходять для оцінки та порівняння роботи локомотивів з різними поїздами та на різних напрямках. Для цього загальну витрату палива відносять до вимірника виконаної перевізної роботи та отримують питому витрату палива на вимірник  $e_n$ , кг/( $10^4$  т·км),

$$e_n = \frac{E_T}{M_Q S} \cdot 10^4, \quad (11.3)$$

де  $M_Q$  – маса состава, т;

$S$  – довжина ділянки, км.

Щоб порівняти різні види тяги та витрату різних сортів палива, введено поняття «умовне паливо». Під «умовним паливом» розуміють паливо, питома теплота згоряння якого дорівнює 29,3 МДж/кг.

## Питома витрата палива тепловозами під час роботи на холостому ході

Серія тепловоза (дизель-поїзда)	Холостий хід			Витрата палива у разі руху де- повськими та станційними ко- ліями, кг/хв
	частота обер- тання колінчас- того валу ди- зеля, хв <sup>-1</sup>	витрата палива одним дизелем, кг/хв	витрата палива тепловозом (ди- зель-поїздом), кг/хв	
ТГМЗА	650	0,13	0,13	0,30
ЧМЭ2	350	0,14	0,14	0,30
ЧМЭ3	350	0,15	0,15	0,30
ТЭ1, ТЭМ1	300	0,16	0,16	0,30
ТЭ2	300	0,16	0,32	0,30
ТЭ10, ТЭП10	400	0,38	0,38	0,50
2ТЭ10, 2ТЭ10Л (В, М, С)	400	0,38	0,76	1,00
3ТЭ10М	400	0,38	1,14	1,50
ТЭ3, ТЭ7	400	0,35	0,70	1,20
ТЭП60	400	0,50	0,50	1,00
2ТЭП60	400	0,50	1,00	2,00
ТЭП70	350	0,27	0,27	2,00
ТЭМ2	300	0,10	0,10	0,30
М62	400	0,42	0,42	0,30
2М62	400	0,42	0,84	0,60
2ТЭ116	350	0,25	0,50	2,00
ДР1	700	0,14	0,28	0,30
Д1	530	0,14	0,28	0,30
Д	600	0,33	0,66	0,30

Питома теплота згорання дизельного палива дорівнює 42,7 МДж/кг. Щоб перерахувати витрату дизельного палива в витрату умовного палива, вводиться еквівалент  $E = 42,7/29,3 = 1,45$ . В результаті виходить вираз для розрахунку питомої витрати умовного палива  $e_{\text{умов}}$ , кг/(10<sup>4</sup> т·км),

$$e_{\text{умов}} = e_{\text{п}} E.$$

**Приклад 1.** Визначити витрату палива тепловозом 2ТЭ116 під час руху зі складом масою 4800 т по ділянці довжиною 129 км. Поїзд набрав швидкість до 20 км/год за 0,8 хв, після чого рухався в режимі тяги

1 ч 52 хв і в режимі холостого ходу, включаючи гальмування для зупинки, 44,6 хв.

*Рішення.* Середня швидкість при розгоні поїзда  $v_{cp} = 20/2 = 10$  км/год. З рис. 11.1 цієї швидкості в режимі тяги відповідає витрата палива  $g = 15,2$  кг/хв. Для будь-якої іншої швидкості руху в інтервалі від 12 до 80 км/год  $g = 16,0$  кг/хв. Для режиму холостого ходу питома витрата палива визначається з табл. 11.6 –  $g_x = 0,50$  кг/хв.

Відповідно до (11.2) загальна витрата дизельного палива за виконану роботу тепловозом

$$E_T = 15,2 \cdot 0,8 + 16 \cdot 112 + 0,5 \cdot 44,6 = 1826,46 \text{ кг.}$$

Питома витрата дизельного палива визначається за формулою (11.3)

$$e_{\pi} = \frac{1826,46}{4800 \cdot 129} \cdot 10^4 = 29,5 \frac{\text{кг}}{10^4 \text{ Т} \cdot \text{км}}.$$

Питома витрата умовного палива визначається за формулою (11.4)

$$e_{\text{умов}} = 29,5 \cdot 1,45 = 42,8 \frac{\text{кг}}{10^4 \text{ Т} \cdot \text{км}}.$$

**Розрахунок витрати електроенергії електровозом.** Витрата електроенергії на тягу електровозом, віднесеного до струмоприймачів, визначається за виразом:

$$A = A_p - A_{\text{рг}}, \quad (11.5)$$

де  $A_p$  – витрата електроенергії на рух поїзда за відсутності рекуперації, кВт·год;

$A_{\text{рг}}$  – повернення електроенергії в контактну мережу у разі рекупративного гальмування, кВт·год.

Розрахунок витрати електроенергії виконується за побудованими графоаналітичним методом кривими швидкості  $v(S)$ , часу  $t(S)$  і струму навантаження електровоза постійного струму  $I_e(v)$  або  $I_{\text{да}}(v)$



для електровозів змінного струму, а також  $I_{\text{пр}}(v)$  при рекуперативному гальмуванні.

На рис. 11.4 показані криві зміни швидкості руху, струму та часу в залежності від шляху. За постійному значенні струму протягом відрізка часу та напруги в контактній мережі витрата електроенергії на тягу поїзда складе

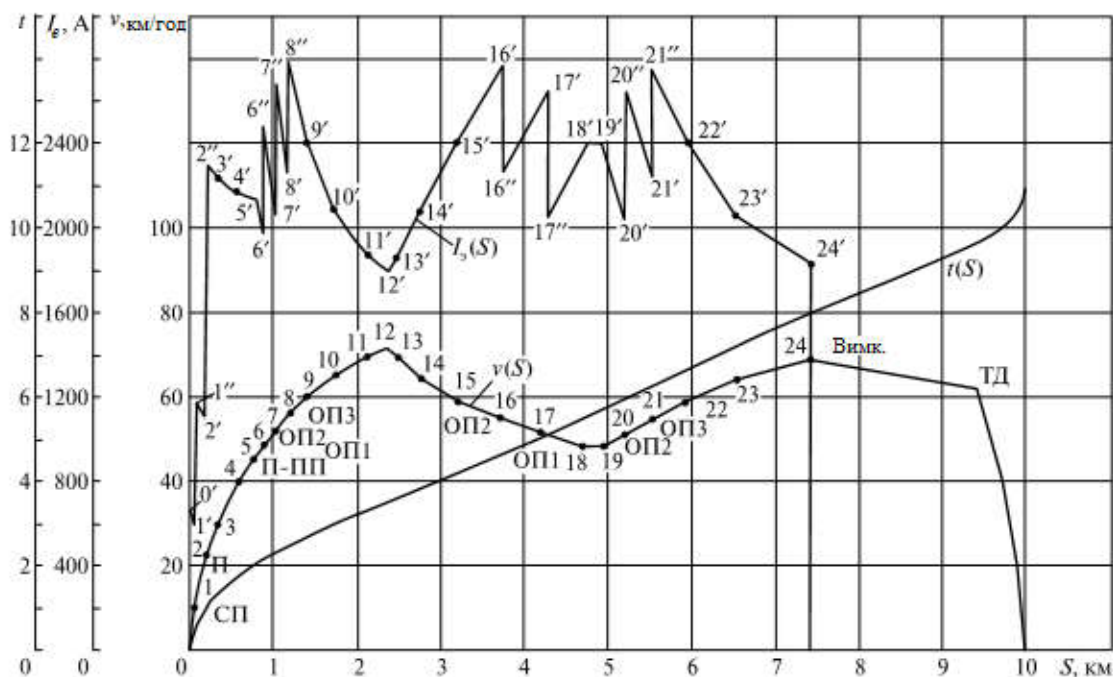


Рис. 11.4. Діаграма кривих швидкості руху, струму та часу на ділянках шляху

$$A_p = U_{\text{км}} I_e \Delta t. \quad (11.6)$$

Розділяючи всю ділянку на окремі інтервали, отримаємо в кінцевих збільшеннях розрахункові вирази для визначення повної витрати електроенергії електровозами постійного струму

$$A_p = \frac{U_{\text{км}} \sum I_{ei}^{\text{cp}} \Delta t_i}{60 \cdot 100}, \quad (11.7)$$

де  $U_{\text{км}} = 3000 \text{ В}$  – напруга в контактній мережі;

$I_{ei}^{\text{cp}}$  – середнє на  $i$ -му інтервалі значення струму, А;

$\Delta t_i$  – час проходження  $i$ -го інтервалу, хв.

Для електровозів змінного струму

$$A_p = \frac{U_{\text{км}} \sum I_{\text{даі}}^{\text{сп}} \Delta t_i}{60 \cdot 100}. \quad (11.8)$$

Кількість електроенергії, яку повертатимуть в контактну мережу під час рекуперації

$$A_p = \frac{U_p \sum I_{pi}^{\text{сп}} \Delta t_i}{60 \cdot 100}, \quad (11.9)$$

де  $U_p = 3300 \text{ В}$  – напруга рекуперації за постійному струму та  $U_p = 25000 \text{ В}$  у разі змінного струму;

$I_{pi}^{\text{сп}}$  – середнє на  $i$ -му інтервалі значення рекуперації, А.

Витрата електроенергії на власні потреби електровоза (допоміжні машини, опалення, освітлення) визначається за середнім значенням електроенергії, споживаної допоміжними машинами одного електровоза (табл. 11.7).

Правила тягових розрахунків рекомендують в опалювальний сезон враховувати витрату електроенергії на опалення виходячи з повного часу роботи електровоза та середнього значення споживання енергії  $0,07 \dots 0,14 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{хв}$  на один електровоз.

Витрата електроенергії на власні потреби електропоїздів, пасажирських і поштово-багажних вагонів визначають виходячи з повного часу їх роботи (табл. 11.8).

Питому витрату електроенергії визначають за формулою:

$$a = \frac{A \cdot 10^3}{M_{\text{ос}} S}, \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{\text{т} \cdot \text{км}}, \text{ або } a = \frac{A \cdot 10^4}{M_{\text{ос}} S}, \frac{\text{Вт} \cdot \text{год}}{10^4 \text{ т} \cdot \text{км}}. \quad (11.10)$$

Величина питомої витрати електроенергії, як і палива, змінюється в широких межах та залежить від багатьох факторів – від осьового навантаження, ваги состава, допустимої швидкості руху та інших факторів. За величиною питомої витрати електроенергії рухомим складом оцінюють ефективність роботи вантажного, пасажирського рухів залізничного транспорту.

Таблиця 11.7

**Питома витрата електроенергії електровозами на власні потреби**

Серія електровоза	Споживання електроенергії на власні потреби, кВт·год/хв	Струм, що споживається на власні потреби, А
ВЛ8	1,67	33
ВЛ10, ВЛ10 <sup>у</sup> , ВЛ11	2,08	42
ВЛ60 <sup>к</sup> , ВЛ60 <sup>р</sup> , ВЛ60 <sup>пк</sup>	3,33	10
ВЛ80 <sup>к</sup>	4,83	14
ВЛ80 <sup>т</sup> , ВЛ82 <sup>с</sup>	5,50	16
ВЛ80 <sup>р</sup>	5,83	18
ВЛ82, ВЛ82 <sup>м</sup>	4,17	12
ЧС2	1,17	23
ЧС2 <sup>т</sup>	1,33	27
ЧС3	0,83	17
ЧС4	2,00	6
ЧС4 <sup>т</sup>	2,33	7

Таблиця 11.8

**Витрата електроенергії на власні потреби електропоїздів, пасажирських і поштово-багажних вагонів**

Склад електропоїзда або тип вагона	Допоміжні машини		Опалення		Освітлення	
	споживання електроенергії, кВт·год/хв	середній струм, А	споживання електроенергії, кВт·год/хв	середній струм, А	споживання електроенергії, кВт·год/хв	середній струм, А
EP1, EP2 (10 вагонів)	0,58	12	2,92	58	0,30	6
EP9 всіх індексів (10 вагонів)	1,08	3	2,92	7	0,30	1
EP22, EP22В (8 вагонів)	1,25	25	3,20	64	0,37	9
Пасажирський вагон	–	–	0,80	16/2*)	–	–
Поштово-багажний вагон	–	–	0,40	8/1*)	–	–

*Примітка.* \*В чисельнику вказано струм при напрузі в контактній мережі  $U_{км} = 3000$  В, а в знаменнику при  $U_{км} = 25\ 000$  В.

Питома витрата електроенергії  $a$ , Вт·год/(т·км) становить:

- 10...20 в вантажному русі;
- 20...30 в пасажирському русі;
- 30...40 в приміському русі;
- більше 60 в швидкісному русі.

### 11.3. Технічне нормування витрат палива та електроенергії

Без знання норм витрати енергії на одиницю виконаної роботи неможливо ні проектування залізниць ні планування експлуатаційної роботи вже існуючих ліній.

Норми витрати енергії на тягу для засобів транспорту поділяють на дві основні групи:

– *планові* норми, необхідні для визначення потреби в паливі та електроенергії на одиницю виконаної роботи в кілограмах або ват-годинах на тонно-кілометр або в кілограмах або ват-годинах на пасажиро-кілометр;

– *технічні* норми, які застосовуються для організації споживання палива та електроенергії й контролю їх використання.

*Поопераційні* норми витрати енергії встановлюють кількість енергії, витрачену на виконання певних операцій технологічного процесу (на кілометр одиночного пробігу, годину виробництва маневрових операцій певної інтенсивності, виконання вантажно-розвантажувальних та господарських робіт та ін.).

Технічні та поопераційні норми дозволяють контролювати фактичну витрату енергії, що сприяє стимулюванню до її економії.

На залізничному транспорті кількість технічних норм з урахуванням сезонних та ситуаційних змінних умов роботи досягає десятків і сотень тисяч, що практично виключає їх застосування для планування. Тому найчастіше планові норми встановлюють виходячи з досягнутих значень з їх коригуванням на умови роботи, що змінюються: поліпшення технічного стану інфраструктури, рухомого та особливо тягового рухомого складу, організації процесу перевезень і структури вантажо- і пасажиропотоку.

Нормування витрати палива та електроенергії локомотивами ґрунтується на даних тягово-енергетичних паспортів локомотивів, а також на загальних формулах та положеннях тягових розрахунків (Інструкція з технічного нормування витрати електричної енергії та палива тепловозами на тягу поїздів). Під час нормування приймаються витрати палива та електроенергії, що відповідають справному стану локомотивів, з урахуванням прогресивних методів обслуговування локомотивів та керування поїздами.

Норму витрати палива на тягу поїздів  $n$ , кг/( $10^4$  т·км) розраховують за формулою:

$$n = n_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_6 + \frac{\sum E_{j\text{зуп}} N_{j\text{зуп}} + \sum E_{j\text{поп}} N_{j\text{поп}} + \sum g_{\text{пкст}} t_{\text{пкст}}}{M_{\varrho} L} \quad (11.11)$$

Тут  $n_0$  – початкова (базова) норма, яка визначається на основі тягово-енергетичного паспорта локомотива, розрахованого за певних умов, в кг/( $10^4$  т · км брутто).

Як правило, для вантажних поїзних локомотивів тягово-енергетичний паспорт розраховується для чотиривісних вантажних вагонів за певну величину осьового навантаження (зазвичай приймається  $q_0 = 175$  кН/вісь), на прямій горизонтальній площадці, при відсутності вітру та плюсових температурах навколишнього повітря. Тягово-енергетичний паспорт локомотива задається графіком залежно від маси состава  $M_{\varrho}$  і технічної швидкості руху поїзда  $v$  або наступною формулою:

$$n_0 = S + \left( R + \frac{T}{M_{\varrho}} \right) \omega_0, \quad (11.12)$$

де  $M_{\varrho}$  – маса состава, т;

$\omega_0$  – питомий основний опір руху поїзда, Н/кН.

Наприклад, для тепловоза 2ТЭ10 коефіцієнти, наведені у формулі, за [1] дорівнюють  $S = 4$ ;  $R = 9,4$ ;  $T = 6800$ .

Коефіцієнт  $K_1$  враховує фактичну вантажопідйомність вагонів. Розрахунки показують [1], що значення  $K_1$  у разі зміни завантаження вагона від порожньої до повної вантажопідйомності коливається приблизно від 2,2 до 0,9.

Коефіцієнт  $K_2$  враховує вплив профілю та плану ділянки, наявність «шкідливих» спусків. Вплив цих факторів визначається величиною еквівалентного ухилу

$$i_e = \frac{\sum i_x l_x + 12 \sum \alpha + \sum (\sum i_{ш} - \omega_{ш}) l_{ш}}{L}, \quad (11.13)$$

де  $i_x$  і  $l_x$  – ухил та довжина елемента профілю відповідно, ‰, м;  
 $i_{ш}$  і  $l_{ш}$  – те ж для шкідливих спусків, ‰, м;  
 $\omega_{ш}$  – питомий основний опір руху поїзда за середню швидкість руху на шкідливому спуску, Н/кН);  
 $\sum \alpha$  – сума центральних кутів кривих на ділянці, °;  
 $L$  – довжина всієї ділянки, м.

У середньо-мережевих умовах коефіцієнт  $K_2$  можна визначати за формулою:

$$K_2 = 1 + ai_e, \quad (11.14)$$

де  $a$  – коефіцієнт, що залежить від технічної швидкості руху по ділянці.

$$a = 0,705 - 0,00452v. \quad (11.15)$$

Коефіцієнт  $K_3$  враховує додаткову витрату палива у разі низьких температурах навколишнього середовища. З достатньою точністю його можна приймати за даними табл. 1 ПТР.

Коефіцієнт  $K_4$  враховує додаткову витрату палива у разі наявності вітру. З достатньою точністю його можна приймати за даними табл. 2 ПТР.

Коефіцієнт  $K_5$  враховує наявність в складі інших вагонів, опір руху яких відрізняється від прийнятих вагонів під час розрахунку енергетичного паспорта. Цей коефіцієнт можна визначити з відношення опору руху поїзда, в складі якого є вагони іншого типу, до опору руху поїзда, прийнятого для розрахунків енергетичного паспорта:

$$K_5 = \frac{\beta_{ін} \omega_{ін} + \beta_0 \omega_0}{\omega_0}, \quad (11.16)$$

де  $\omega_{ін}$  і  $\beta_{ін}$  – питомий основний опір руху вагонів, опір руху яких відрізняється від прийнятого для розрахунку енергетичного

паспорта за середню технічну швидкість руху поїзда на ділянці та частка вагонів у составі по масі відповідно розрахункового поїзда, Н/кН;

$\omega_0$  і  $\beta_0$  – питомий основний опір руху вагонів, прийнятих для розрахунку енергетичного паспорта за середню технічну швидкість поїзда на ділянці та частка вагонів у составі по масі відповідно поїзда, прийнятого в розрахунку енергетичного паспорта, Н/кН.

Коефіцієнт  $K_6$  враховує теплотехнічний стан локомотивів. Він може бути визначений на основі даних експериментальних поїздок або даних реостатних випробувань тепловозів в депо.

У формулі (11.11):

–  $\sum E_{j\text{зуп}} N_{j\text{зуп}}$  – сумарні додаткова витрати палива на зупинки на проміжних станціях в кг. Станції ділянки діляться на кілька категорій залежно від складності профілю, маси состава та умов зупинки на станції. Тут  $E_{j\text{зуп}}$  – додаткова витрата палива на зупинку на станції "j"-ї категорії, а  $N_{j\text{зуп}}$  – кількість станцій цієї категорії на ділянці, на яких зупиняється поїзд. Ці витрати можуть бути визначені шляхом тягових розрахунків або за аналізом результатів дослідних поїздок;

–  $\sum E_{j\text{поп}} N_{j\text{поп}}$  – сумарні додаткові витрати палива на виконання попереджень щодо обмеження швидкості руху в кг. Додаткові витрати палива на виконання певного попередження  $E_{j\text{поп}}$  приймаються в залежності від величини зниження швидкості, ухилу, на якому відбувається це зниження, та маси состава. Ці витрати можуть бути визначені шляхом тягових розрахунків або за аналізом результатів дослідних поїздок.  $N_{j\text{поп}}$  – кількість попереджень даної («j»-ї) категорії;

–  $\sum g_{\text{пкст}} t_{\text{пкст}}$  – сумарна додаткова витрата палива на стоянки на проміжних станціях, кг. Тут  $g_{\text{пкст}}$  – витрата палива тепловозом на стоянці з урахуванням можливої роботи дизеля на проміжних позиціях для прогріву дизеля у разі низьких температур і роботи компресора для живлення витоків повітря в гальмівній магістралі, кг/хв, а  $t_{\text{пкст}}$  – час роботи тепловоза на даній позиції контролера машиніста за поїздку, хв.

Приклади визначення норми витрат палива на тягу поїздів і її коригування за методикою АТ «Укрзалізниця» наведено у додатку Б.

Витрату палива на тягу поїздів за поїздку можна визначити різними способами:

– аналітичними на основі даних швидкостемірної стрічки, норм витрати енергії на одиницю роботи з урахуванням фактичних характеристик поїзда та ділянки, погодних умов, режиму ведення поїзда (виконаного графіка руху) і величини виконаної роботи в тонно-кілометрах брутто;

– аналітичними на основі побудованої кривої швидкості руху поїзда, режиму його ведення та часу роботи локомотива на різних режимах;

– графоаналітичними на основі тягово-теплотехнічних розрахунків.

До числа найбільш поширених методик з визначення витрат енергії на тягу поїздів можна віднести графічні способи побудови кривої витрати палива тепловозом за поїздку А. І. Долінжева і визначення витрати енергії електровозом Я. М. Гаккеля.

#### **11.4. Побудова кривої витрати палива тепловозом графічним способом А. І. Долінжева**

Основою визначення витрати палива за поїздку є крива швидкості руху поїзда  $v = f(S, v)$  по ділянці (див. рис. 11.4) із зазначенням режиму ведення поїзда (включення різних позицій контролера машиніста  $n_k$ , холостого ходу та гальмування), часу руху  $t = f(S, v)$  і витратних характеристик тепловоза  $G = f(v, n_k)$  (рис. 11.5).

Для побудови кривої витрати палива (рис. 11.6) витратну характеристику тепловоза  $G = f(v, n_k)$  розташовують зліва від графіка кривої швидкості так, щоб осі швидкостей збігалися (масштаби швидкості повинні бути однаковими).



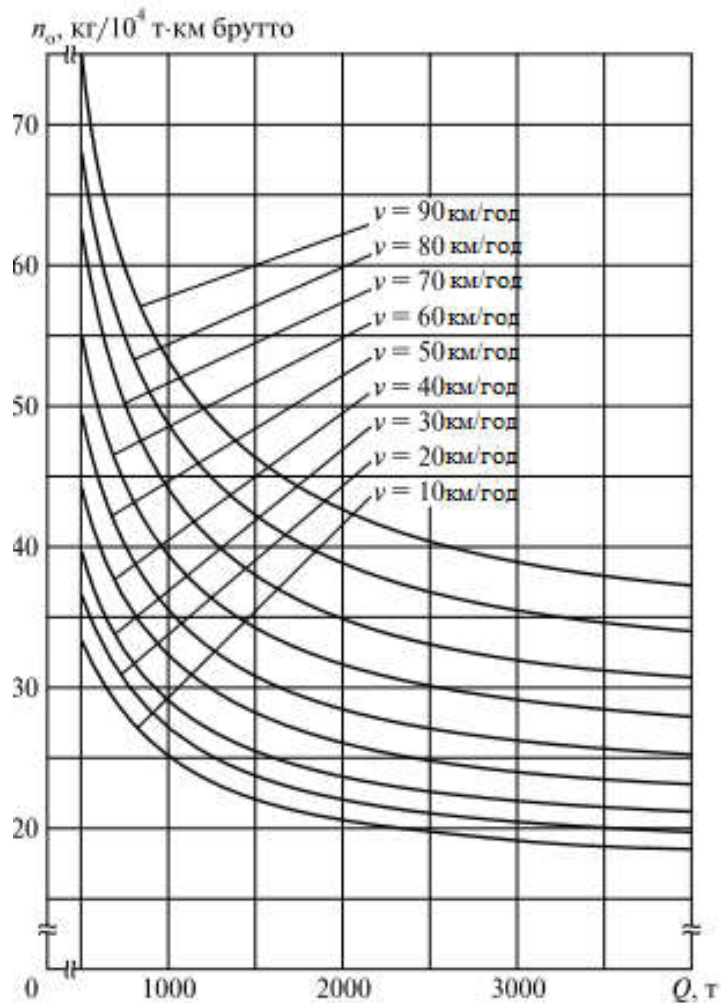


Рис. 11.5. Тягово-енергетичний паспорт локомотива

На осі шляху вибирають відрізки  $\Delta S$  так, щоб їх межі збігалися з переломами кривої швидкості. Як правило, це межі елементів профілю та переходу з режиму на режим (зміна позицій контролера, ступенів ослаблення збудження ТЕД, перехід з режиму тяги на вибіг і назад). Відрізки шляху при зрушенні зі станції  $\Delta S_1, \Delta S_2, \Delta S_3$ ) приймають рівними 2, 3 і 5 мм відповідно. Далі для більшої точності розрахунків довжини відрізків вибирають такими, щоб за обраний відрізок шляху крива швидкості змінилася не більше ніж на 10 мм.

Визначають середню швидкість руху  $v_{\text{ср1}}$  на відрізку  $\Delta S$  і зносять її на витратну криву тепловоза на даній позиції (точка 1). Проводять промінь через точку 1 і 0 витратної характеристики, а до нього в межах відрізка  $\Delta S_1$  відновлюють перпендикуляр. В інтервалах  $\Delta S_2$  і  $\Delta S_3$  побудова кривої  $E_{\text{рх}} = f(v, n_k)$  виконують аналогічно.

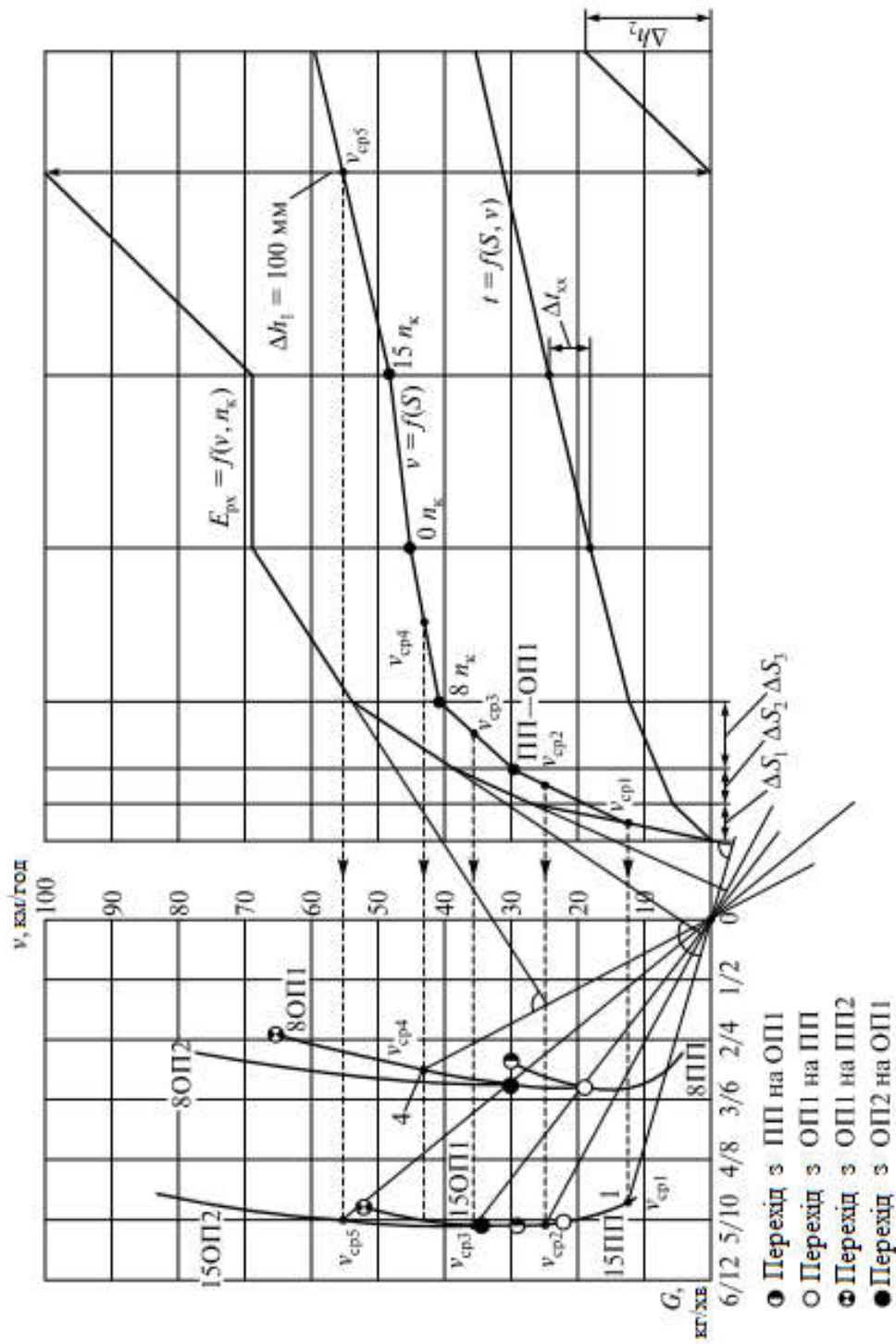


Рис. 11.6. Побудова кривої витрати палива тепловозом за способом А. І. Долінжева

На початку відрізка  $\Delta S_4$  машиніст перейшов на 8-му позицію контролера машиніста (ПКМ), тому середню швидкість руху на відрізку  $\Delta S_4$  зносимо в точку 4 на кривій витрати на 8-ій ПКМ. Під час переходу з однієї гілки збудження на іншу, наприклад, з ПП на ОПІ середні швидкості руху вибирають на відповідній гілці і ПКМ. Під час переходу на холостий хід криву витрати палива тепловозом  $E_{px} = f(v, n_k)$  на планшеті кривої швидкості проводять горизонтально. Витрату палива при їзді на вибігу визначають як суму загального часу руху в режимі холостого ходу та пневматичного гальмування на хвилинну витрату палива при їзді без струму  $g_x$  на певній ПКМ (див. рис. 11.3). Ця ПКМ може бути і не нульова, тому що в зимовий час і для підвищення продуктивності компресора машиніст може, відключивши тягові машини, поставити контролер машиніста на проміжну позицію.

Для визначення витрати палива за поїздку криву  $E_{px} = f(v, n_k)$  витрати зручно обривати на 100 мм по висоті  $\Delta h$ . Якщо ж перед розрахунком стоїть завдання визначення витрати палива поперегонно, то обривати її рекомендується по осях станцій.

Для визначення кількості палива, витраченого за поїздку, необхідно обчислити масштаб кривої витрати палива на робочому ході тепловоза  $E_{px} = f(v, n_k)$ . Він визначається за формулою:

$$c = \frac{ny}{60m}, \quad (11.17)$$

де  $c$  – масштаб кривої витрати палива на робочому ході, мм/кг;

$y$  – масштаб шляху, прийнятий для побудови кривої швидкості поїзда, мм/км;

$m$  – масштаб кривої швидкості, мм/км за 1 год;

$n$  – масштаб видаткової характеристики тепловоза  $E_{px} = f(v, n_k)$ , мм/кг за 1 хв.

Визначивши суму всіх ординат кривої витрати палива на ділянці або перегоні  $\sum \Delta h$ , мм, і розділивши її на масштаб кривої витрати палива –  $c$ , мм/кг, отримаємо витрату палива в режимі тяги за поїздку (або на перегоні):

$$E_{\text{рт}} = \frac{\sum \Delta h}{c}. \quad (11.18)$$

Витрата палива тепловозом під час руху на холостому ходу за поїздки визначається за формулою:

$$E_{\text{хх}} = \sum g_{i\text{хх}} t_{i\text{хх}} + g_0 \sum t_0, \quad (11.19)$$

де  $g_{i\text{хх}}$  – витрата палива на проміжній ПКМ і в режимі роботи вентилятора (див рис. 11.2), кг/хв;

$t_{i\text{хх}}$  – загальний час роботи за поїздки в зазначеному режимі, хв;

$g_0$  – витрата палива на нульовій ПКМ і в режимі роботи вентилятора, кг/хв;

$\sum t_0$  – загальний час роботи (хв) за поїздки на нульовій ПКМ.

Загальна витрата палива тепловозом за поїздки (на перегоні) визначається як сума витрат палива в режимі тяги  $E_{\text{рт}}$  і витрати палива під час руху на вибігу  $E_{\text{хх}}$

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{рт}} + E_{\text{хх}}. \quad (11.20)$$

Однак оцінювати витрату палива за поїздки окремими машиністами та порівнювати показники роботи локомотивів зручніше в кілограмах на одиницю виконаної роботи. За одиницю роботи приймають т·км або збільшений показник –  $10^4$  т·км виконаної роботи, тоді витрата дизельного палива

$$e_{\text{умов}} = \frac{E_{\text{заг}}}{M_0 L} \cdot 10^4, \quad (11.21)$$

де  $M_0$  – маса состава, т;

$L$  – довжина ділянки (перегону), для якої визначається витрата палива, км.

Цю одиницю витрати палива прийнято називати «питомою витра-

тою палива на одиницю виконаної роботи або питомою витратою палива на вимірювач».

Тому що в практиці доводиться мати справу з дизельним паливом різних сортів, що мають різну теплотворну здатність, то в цьому випадку прийнято оцінювати показники витрат дизельного палива в «одиницях умовного палива»

$$e_{\text{умов}} = E e_{\text{диз}} = 1,45 e_{\text{диз}}.$$

## 11.5. Способи зменшення витрати палива та енергії на тягу

На тягу поїздів припадає основна витрата енергоресурсів АТ «Укрзалізниця». Цілеспрямована робота по зниженню енергоємності перевізного процесу призводить до зниження питомих витрат на тягу поїздів. До основних способів зменшення питомої витрати палива та електроенергії на показник відносяться:

- модернізація тепловозів (заміна двотактних на чотиритактні дизелі);
- впровадження систем автоведення поїзда;
- вдосконалення організації контролю розподілу та обліку палива та електроенергії на тягу;
- вдосконалення перевізного процесу повновагомими складами поїздів;
- збільшення середньодобового пробігу локомотива;
- ефективне використання рекуперативного гальмування;
- скорочення гарячого простою тепловозів;
- підвищення надійності за рахунок якісного ремонту локомотивів;
- підвищення кваліфікації локомотивних бригад.

### Запитання для самоконтролю

1. Які фактори впливають на витрату палива на тягу поїздів?
2. Основні принципи розрахунку витрати палива або електроенергії для руху поїзда.

3. Як визначається загальна витрата палива за поїздки по витратним характеристикам?
4. Призначення питомої витрати палива локомотивом.
5. Для яких цілей переводять питому витрату в умовне паливо?
6. Принцип визначення витрати електроенергії електровозом графоаналітичним методом.
7. Як визначити питому витрату електроенергії?
8. Призначення норм витрати палива та електроенергії на тягу поїздів?
9. У чому суть побудови кривої витрати палива графічним способом?
10. Основні напрямки зниження питомої витрати енергії на тягу поїздів.

## Виконання тягових розрахунків на ЕОМ

### 12.1. Загальні відомості та вихідні дані до розрахунків

Тому що тягові розрахунки доводиться виконувати досить часто (до складання графіків руху поїздів, під час проектування нових ділянок залізниць, у разі зміни виду тяги або серії локомотива, що використовується і т.п.), то на їх виконання потрібні значні витрати часу. Для зменшення цих витрат, для підвищення точності та зниження трудомісткості тягових розрахунків використовуються ЕОМ та спеціально розроблені для цього комп'ютерні програми, що виконують відповідні арифметичні та логічні операції. Висока швидкодія ЕОМ дозволяє не тільки зекономити час на тягові розрахунки, а й розширити коло завдань, пов'язаних з тягою поїздів, до завдань, нездійснених у разі ручних розрахунків.

Сучасні ЕОМ дозволяють проводити багатоваріантні розрахунки показників роботи локомотивів та моделювати технологічні процеси керування поїздами з метою оптимізації режимів за рядом критеріїв, одним з яких є енергоефективність.

Однією з обов'язкових умов, що визначають достовірність тягових розрахунків, є підготовка вихідної інформації. Вся інформація повинна бути підготовлена в дискретному вигляді для наступного введення в програму. Вихідну інформацію для тягових розрахунків на ЕОМ можна розділити на чотири групи:

- інформація про залізничну ділянку;
- інформація про вагонний парк;
- інформація про тяговий рухомий склад;
- нормативна та довідкова інформація – завдання на розрахунок.

Інформація про залізничну ділянку повинна містити відомості про:

- профіль ділянки (вказуються довжина та крутизна елементів профілю);

– план ділянки (характеристика кривих ділянок колії – розташування, довжини та радіуси кривих, підвищення зовнішньої рейки, розширення колії в кривих і т.д.);

– роздільні пункти та швидкості руху станційними коліями (вказуються перегонні відстані, відстані від осі станцій до вхідних і вихідних стрілок, допустимі швидкості руху по головній та бічній коліях);

– встановлені швидкості руху на перегонах (в тому числі про тривалі та постійні обмеження швидкості руху із зазначенням координат, довжини ділянки та величини допустимої швидкості, а також про швидкості руху в кривих малого радіусу);

– місця перевірки дії гальм на ефективність;

– тип колії (ланкова, безстикова);

– розстановку сигналів автоблокування;

– підстанції, розташовані на електрифікованих ділянках, а також про розташування та довжини нейтральних вставок.

Інформація про вагонний парк включає:

– загальну інформацію, що характеризує вагонний парк;

– відомості про питомий основний опір вагонів різних типів, про додатковий опір від низьких температур повітря, низьких швидкостей, зустрічного та бічного вітру;

– характеристики розрахункового коефіцієнта тертя гальмівної колодки;

– бібліотеку составів (містить інформацію для кожного типу состава). При цьому вказується: допустима швидкість за станом состава; розрахунковий гальмівний коефіцієнт поїзда; процентний вміст (за масою вагонів) вагонів різних видів, що входять до состава, із зазначенням маси, що припадає на вісь вагона; тип гальмівних колодок, що застосовуються в составі; додатковий опір від підвагонного генератора; вказівка, які з нормативних таблиць слід використовувати для даного типу состава.

Інформація про тяговий рухомий склад, що використовується на залізничній ділянці, готується у вигляді бібліотеки, де кожному типу локомотива або МВРС присвоюється певний номер. Інформація про тяговий рухомий склад повинна містити наступні дані:

– шифр (серія) локомотива, електропоїзда або дизель-поїзда;

– розрахункову масу та зчіпну вагу;

– розрахункову та конструкційну швидкість;

– тягові характеристики для різних позицій контролера;



- характеристики питомого опору в режимі тяги та на холостому ході;
  - коефіцієнт зчеплення;
  - теплові характеристики тягового генератора (у разі тепловозної тяги з електричною передачею потужності) та тягових двигунів (у разі електричної передачі);
  - струмові характеристики тягових двигунів (у разі електричної передачі) та тягових генераторів (у разі тепловозної тяги з електричною передачею потужності) або електровоза та електропоїзда за різних позиціях контролера машиніста;
  - характеристику витрати палива (для тепловозів і дизель-поїздів на всіх позиціях контролера машиніста) або витрати електроенергії (для електровозів і електропоїздів);
  - гальмівні та струмові характеристики реостатного та рекуперативного електричного гальмування (для тягового рухомого складу, що реалізує даний режим);
  - для електровозів і електропоїздів змінного струму коефіцієнт трансформації для кожної позиції контролера, опір трансформатора для кожної позиції контролера, номінальна випрямлена напруга для розрахунку тягових характеристик у разі зміни напруги на струмоприймачі.
- Нормативна та довідкова інформація містить:
- таблиці значень коефіцієнтів  $K_v$  і  $K_{нт}$ , що враховують збільшення основного опору руху поїзда від зустрічного та бічного вітру й низької температури зовнішнього повітря;
  - нормативи регулювального гальмування;
  - норми часу підготовки гальм до дії;
  - нормативи, що визначають порядок перевірки дії гальм на ефективність;
  - допустимі перевищення температури обмоток тягових електричних машин.

Завдання на тяговий розрахунок служить вихідною інформацією для різноманітних тягово-енергетичних розрахунків. Кожне завдання містить шифр ділянки, бібліотечний номер локомотива, кількість секцій або локомотивів, відсоток використання потужності та діапазон, що використовуються під час розрахунку позицій, маси состава та його бібліотечний номер, показники, що визначають початок, закінчення та умови проведення розрахунку. У завданні на розрахунок вказуються також ознаки, на підставі яких обирають режим управління

локомотивом – з використанням максимальних позицій контролера (метод, рекомендований ПТР) або з використанням часткових характеристик, що забезпечують рух із середньою швидкістю.

## 12.2. Порядок розрахунків на ЕОМ

Інформація про ділянку, локомотив і состав вводиться в програму розрахунку. Спрощений алгоритм, який показує послідовність виконання тягових розрахунків на ЕОМ наведено на рис. 12.1.

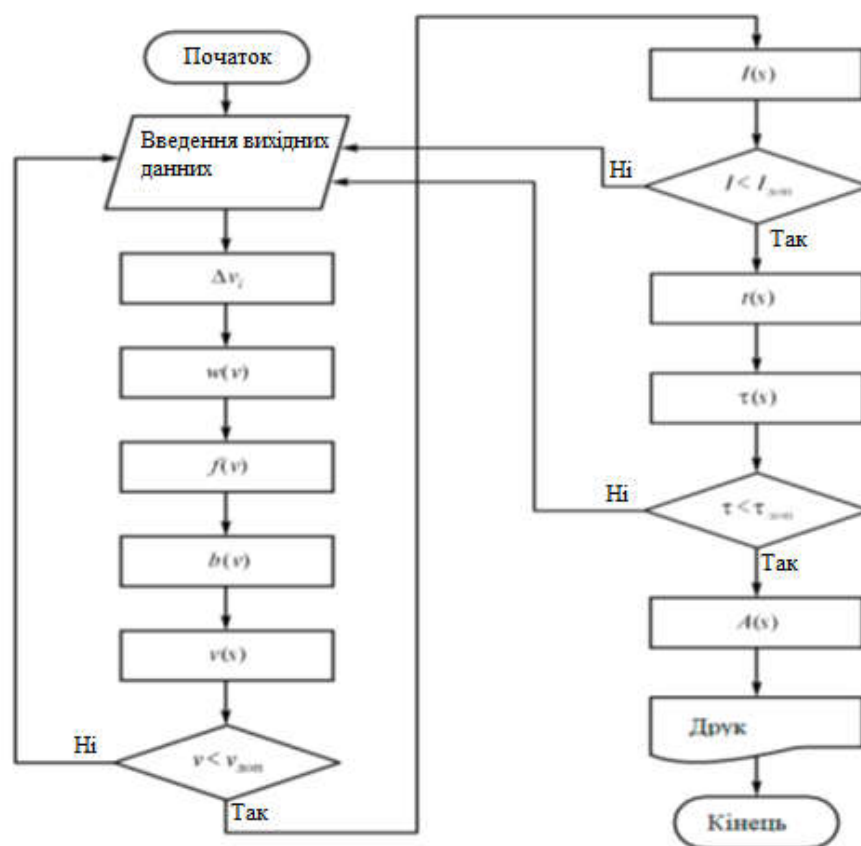


Рис. 12.1. Алгоритм виконання тягових розрахунків на ЕОМ

Після введення вихідних даних програма розраховує для прийнятого інтервалу швидкості питомі сили опору руху, питомі сили тяги та питомі гальмівні сили. Використовуючи ці сили, програма розв’язує

рівняння руху поїзда та визначає швидкість у разі зупинок на станціях та безупинному русі.

Якщо розрахована швидкість не перевищує допустиму, то програма продовжує обчислення, якщо швидкість перевищує допустиму, то програма змінює режим роботи локомотива та розрахунок повторюється.

На другому етапі визначаються струми тягових двигунів і тягового генератора (для тепловоза). Отримані значення струмів порівнюються з допустимими і у разі їх перевищення програма знову змінює режим руху та повторює розрахунок.

На третьому етапі програма визначає перегінний час ходу, а після цього розраховує перегрів обмоток тягових двигунів і тягових генераторів. Отримані значення температури перегріву обмоток порівнюються з допустимими значеннями й у разі їх перевищення програма змінює режим руху.

Після отримання допустимих значень температури перевищення обмоток тягових двигунів програма визначає витрату енергії або палива та виводить отримані результати на друк. Існує можливість виведення на друк результатів розрахунку по всій ділянці або по кожному кроці розрахунку окремо.

ЕОМ відповідно до закладеної програми вирішує рівняння руху поїзда за швидкостях менше 15...25 км/год для інтервалів швидкості не більше 5 км/год. За більш високі швидкості руху розрахунок ведеться для заданих інтервалів шляху за кроком, рівним довжині елемента профілю або його частини.

У програмі передбачені виконання обмежень швидкості з урахуванням довжини поїзда та перевірка гальм на ефективність. Крім основного варіанту, програма розраховує варіанти розрахунків, що відрізняються попередженнями про допустимі швидкості.

Дані розрахунків, виконані на ЕОМ, використовуються для розробки графіків руху поїздів, визначення витрати електроенергії або палива, оцінки використання потужності локомотива та вирішення інших завдань, пов'язаних з експлуатацією локомотивів і рухом поїздів.

### **Запитання для самоконтролю**

*1. З якою метою переходять до виконання тягових розрахунків на ЕОМ?*

*2. Які групи вихідних даних необхідно підготувати для виконання тягових розрахунків на ЕОМ?*

*3. Які відомості про залізничну ділянку необхідно підготувати для виконання тягових розрахунків на ЕОМ?*

*4. Які відомості про вагонний парк необхідні для виконання тягових розрахунків на ЕОМ?*

*5. Які відомості про рухомий склад необхідні для виконання тягових розрахунків на ЕОМ?*

*6. Яка довідкова інформація використовується у разі виконання тягових розрахунків на ЕОМ?*

*7. Перерахуйте основні етапи виконання тягових розрахунків на ЕОМ.*

## Раціональні прийоми керування поїздами

### 13.1. Режимні карти

З метою підвищення кваліфікації машиністів локомотива та навчання їх раціональним прийомам водіння поїздів у багатьох локомотивних депо розробляються режимні карти для найбільш стійких графікових поїздів певних напрямків і ділянок.

Режимні карти складаються на основі тягових розрахунків і статистичного аналізу експлуатації поїздів на конкретних ділянках. У режимних картах рекомендуються найбільш доцільні прийоми управління локомотивом на конкретних перегонах руху поїзда з метою витримки перегонного часу ходу та швидкості руху, подолання важких ділянок профілю та плану колії, визначення місця перевірки ефективності гальмування та можливості економії електроенергії або дизельного палива та інші вказівки.

Режимні карти мають *рекомендаційний характер* з водіння поїздів, тому що навіть один і той же поїзд за графіком і один і той же локомотив і, навіть, одна і та ж бригада не зможуть провести поїзд абсолютно однаковим режимом. Це пов'язано з великою кількістю непередбачених заздалегідь умов, супутніх конкретному поїзду, що рухається, наприклад, зміни атмосферних параметрів.

Профіль залізничних ділянок, на яких устанавлюються обмеження на використання потужності локомотивів по зчепленню, характеризується наявністю підйомів великої крутості, але відносно невеликої довжини. Тому під час розробки режимних карт з метою раціональних прийомів керування поїздами на таких ділянках з реалізацією найбільших сил тяги важливо забезпечувати максимальне використання кінетичної енергії рухомого поїзду. Отже, при підході до важких елементів профілю швидкість поїзда повинна бути найбільшою, що дає можливість пройти частину підйому за рахунок накопиченої на попередніх

елементах профілю кінетичної енергії. Після подолання підйому швидкість поїзда знижується та виникає небезпека боксування колісних пар локомотива. Щоб запобігти цьому, необхідно своєчасно подавати пісок в зону контакту коліс і рейок.

На локомотивах з електропередачею у разі зниження швидкості руху нижче розрахункової та максимальної реалізації сили тяги в енергетичному колі підвищується струм, що призводить до інтенсивного нагріву електродвигунів. У режимних картах даються рекомендації машиністам, які забезпечують правильні прийоми управління локомотивом в цій ситуації та тим самим зберігають справність локомотива.

Режимні карти рекомендують раціональне ведення поїзда за найменших енергетичних витрат. Тягові двигуни локомотивів перетворюють підведену до них електроенергію в механічну роботу, затрачену на пересування поїзда та подолання сил опору руху. Одночасно частина електроенергії втрачається в тягових двигунах, передачах, перетворювальних установках та інших елементах енергетичного кола. Зі збільшенням швидкості руху поїзда збільшуються енергетичні витрати самого локомотива та основний опір руху рухомого складу, який нелінійно зростає від швидкості (рис. 13.1).

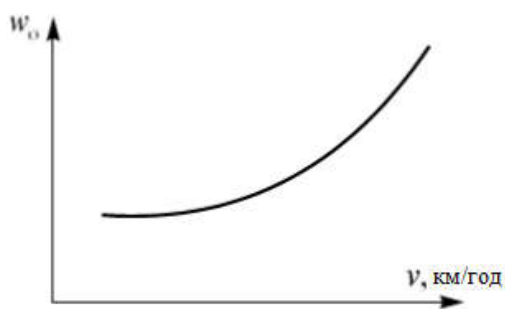


Рис. 13.1. Питомий основний опір

Режимні карти рекомендують машиністам підтримувати певну швидкість руху поїзда на певних ділянках перегонів без застосування регулювального гальмування. Тому що при кожному гальмуванні поїзда відбуваються втрати кінетичної енергії поїзда, отже, нераціонально збільшується витрата палива або електроенергії локомотива. Втрати кінетичної енергії під час регулювального гальмування поїзда на спус-

ках залежать від маси поїзда, його основного опору руху, крутизни та довжини шкідливого спуску. Шкідливими називаються такі спуски, на яких застосовують регулювальні гальмування для підтримки швидкості руху поїзда в допустимих межах. Втрати механічної енергії в гальмах поїзда під час гальмування для зниження швидкості руху на шкідливих спусках залежать від швидкості підходу до шкідливого спуску і, отже, від режиму ведення поїзда на підході до такого спуску (рис.

13.2). За наявності на ділянці декількох шкідливих спусків загальні втрати енергії від гальмування складуть суму втрат на окремих спусках. Режимні карти рекомендують найбільш раціональні прийоми управління рухом поїзда на таких ділянках.

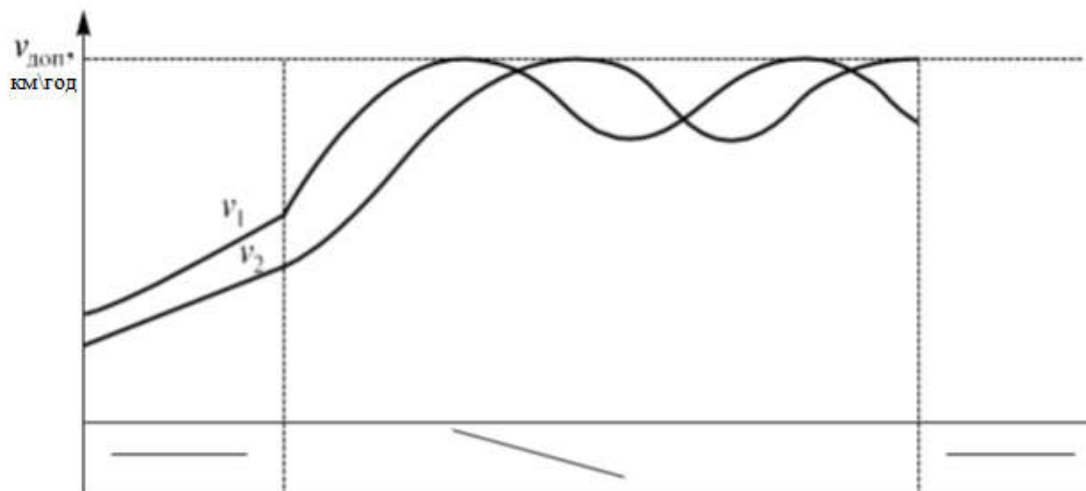


Рис. 13.2. Варіанти подолання шкідливої ділянки шляху типовим (графіковим) поїздом

## 13.2. Системи автоматичного ведення поїздів

Розвиток комп'ютерних технологій та мікропроцесорної техніки в даний час дозволяють вирішувати складні завдання управління та автоматичного ведення поїздів на залізничному транспорті. Розроблено та впроваджено ряд систем управління та автоматичного ведення поїздів для пасажирського та вантажного руху. Ці системи призначені для автоматизованого управління рухомим складом, забезпечення норм безпеки руху, витримки заданого часу ходу та вибору енергетично-раціонального режиму руху. Без таких систем неможливо розвинути високошвидкісний рух поїздів. Основа систем автоматичного ведення поїзда – тяга поїздів.

В даний час розробляються та впроваджуються системи автоматизованого управління електровозами та тепловозами. Ці системи забез-

печують автоматизоване управління тягою та всіма видами гальмування поїзда з метою точного дотримання часу ходу, заданого графіком руху або іншими нормативними документами на основі вибору енергетично раціонального режиму руху.

Автоматизовані системи, крім перерахованих вище функцій, призначені для видачі локомотивній бригаді попереджувальної звукової (мовної) та допоміжної візуальної інформації. Однією з таких систем є універсальна система автоматизованого ведення електровозів пасажирського руху (УСАВПП), що включає в себе три підсистеми:

- підсистема управління тягою;
- підсистема реєстратора параметрів руху та автоведення (РПРА-П);
- підсистема управління пневматичними та ЕПГ.

Локомотив оснащується системою автоведення та реєстрації на основі мікропроцесорних блоків комплексу автоматизованого управління та діагностування. На локомотиві встановлюються датчики шляху та швидкості (ДШШ), датчики тиску пневматичної системи локомотива (ДТ) та інші контрольні прилади (рис. 13.3).



Рис. 13.3 Принцип роботи системи автоведення

Керуюча програма автоматизованого ведення пасажирського поїзда завантажується в бортову мікропроцесорну систему автоведення



на її виконання автоматично після включення системи. Введення програми здійснюється оператором за допомогою клавіатури. Бортова керуюча програма призначена для реалізації алгоритму автоматизованого ведення (автоведення) локомотива, введення необхідної для автоведення інформації, організації взаємодії з машиністом, збору та передачі в РПРА-П записується на картридж інформації. Для введення даних в систему автоведення (база даних за маршрутами, додаткова інформація про поїзд, табельний номер поїзда та машиніста, тимчасові обмеження швидкості і т.п.) використовується картридж, який готується в депо та видається машиністу перед поїздкою.

Реєстратор параметрів руху та автоведення призначений для запису на змінному картриджі значень витраченої енергії, миттєвих значень струмів, напруг, показання вогнів локомотивного світлофора (від КЛУБ-У) та іншої інформації, що надходить від бортової мікропроцесорної системи автоведення та кіл управління локомотивом, електропневматичними та пневматичними гальмами. Одночасно підсистема РПРА-П видає в центральний обчислювач (комп'ютер) поточні значення струму тягових електродвигунів, напруги в контактній мережі та тиску в пневматичних магістралях електровоза, а також показання локомотивного світлофора, число імпульсів датчика шляху та швидкості, стан керуючих кіл локомотива.

У процесі руху система автоведення виконує наступні функції:

- визначає фактичні параметри руху поїзда та виводить їх на екран дисплею;
- розраховує рекомендовані параметри руху поїзда та управляючий вплив в реальному часі;
- управляє тягою та гальмуванням;
- здійснює візуальний і звуковий діалог з машиністом;
- записує реєстровані параметри на картридж;
- тестує апаратуру автоведення та систем локомотива;
- здійснює контроль справності апаратури.

Дисплей (рис. 13.4) системи інформує машиніста про поточні параметри проходження:

- координати, швидкість і час;
- профіль колії;
- сигнал локомотивного світлофора;
- поточний і наступний обмеження швидкості;
- найближчі станції та колійні об'єкти;

- інформація про виконання розкладу;
- та ін.

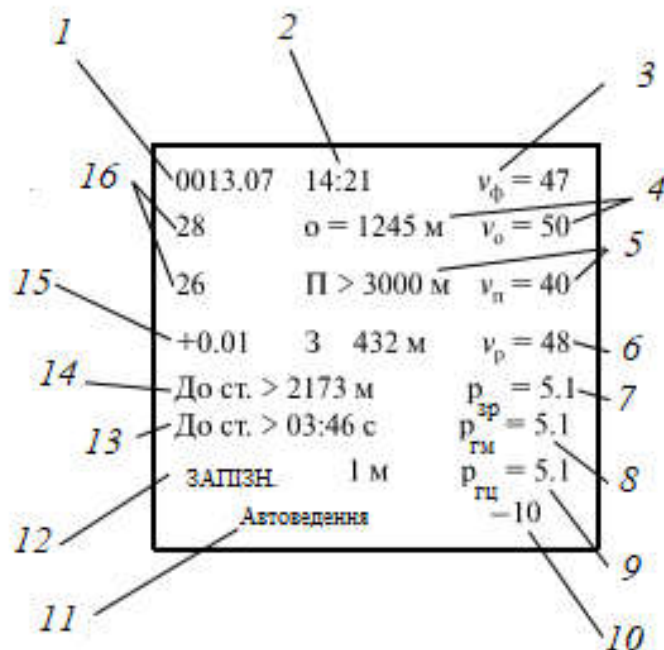


Рис. 13.4. Дисплей системи автоведення поїзда:

- 1 – поточна координата (км. пікет); 2 – поточний час; 3 – швидкість фактична (км/год);
- 4 – поточне обмеження швидкості (км/год) і відстань до його кінця; 5 – наступне місце зниження швидкості (км/год) і відстань до його кінця; 6 – розрахункова швидкість;
- 7 – тиск у зрівняльному резервуарі (атм); 8 – тиск в гальмівній магістралі (атм); 9 – тиск в гальмівному циліндрі (атм); 10 – профіль колії (%); 11 – режим ведення УСАВПЕ-П;
- 12 – відхилення від розкладу; 13 – час ходу, що залишився, до станції за розкладом;
- 14 – відстань до станції (м), що залишилась; 15 – прискорення фактичне ( $m/c^2$ );
- 16 – рекомендована і фактична позиції ГП і ОП

У процесі руху можна оперативно мати інформацію про параметри поїзда, локомотива та системи автоведення. На картридж ведеться запис інформації, отриманої від системи автоведення та приладів безпеки, дані про виконання розкладу, про порушення режиму ведення поїзда та управління гальмами, про витрату електроенергії та дії машиніста. У процесі руху та в разі виявлення несправності машиністу через звукову колонку видається мовна інформація. В картридж протягом усієї поїздки записується інформація про параметри ведення та управління локомотивом.

Системи автоведення:

- спрощують роботу машиністів, дозволяють продовжити стійкий рівень працездатності на 2-3 години та зменшити завантаженість машиніста на найбільш складних етапах його роботи;
- економлять електроенергію або паливо на тепловозах за рахунок енергозберігаючих режимів руху, які розраховуються в реальному масштабі часу безпосередньо на борту локомотива;
- підвищують безпеку руху завдяки точному виконанню швидкісного режиму як за сигналами світлофора, так і по місцях обмеження швидкості, включаючи і тимчасові;
- підтримують якість водіння поїздів на високому рівні незалежно від кваліфікації машиністів;
- контролюють якість роботи локомотивної бригади за результатами розшифровки даних записаних на картридж;
- збільшують швидкість доставки вантажів;
- знижують витрати на експлуатацію та ремонт рухомого складу.

### **13.3. Система автоведення вантажних з'єднаних поїздів**

Система автоведення вантажних з'єднаних поїздів призначена для управління локомотивами з'єднаних поїздів масою до 12000 т в режимі автоведення.

Рух з'єднаних вантажних поїздів організовується для підвищення пропускної та провізної здатності дільниць і напрямків, скорочення затримок поїздів під час виконання ремонтно-колійних і будівельних «вікон», ліквідації наслідків стихійних лих, аварій, катастроф.

Система автоведення дає можливість управляти локомотивами в режимах тяги та гальмування, об'єднаних гальмівних систем, з голови поїзда. Система автоведення встановлюється на всі локомотиви состава. Головний локомотив – ведучий, інші – тягові (рис. 13.5).

Під час руху система автоведення на ведучому локомотиві розраховує режими енергозберігаючого управління для всіх локомотивів состава. По захищеному цифровому каналу за допомогою радіозв'язку режими ведення передаються від ведучого локомотива тяговим, а тягові локомотиви передають ведучому інформацію про свій стан.

Система автоведення може працювати в режимах:

- автоведення – управління тягою та гальмуванням здійснює система автоведення;
- порадника – поїздом управляє машиніст, на екран системи виводиться інформація про оптимальне та поточне ведення;
- кнопочового контролера – машиніст керує поїздом за допомогою клавіатури системи автоведення.

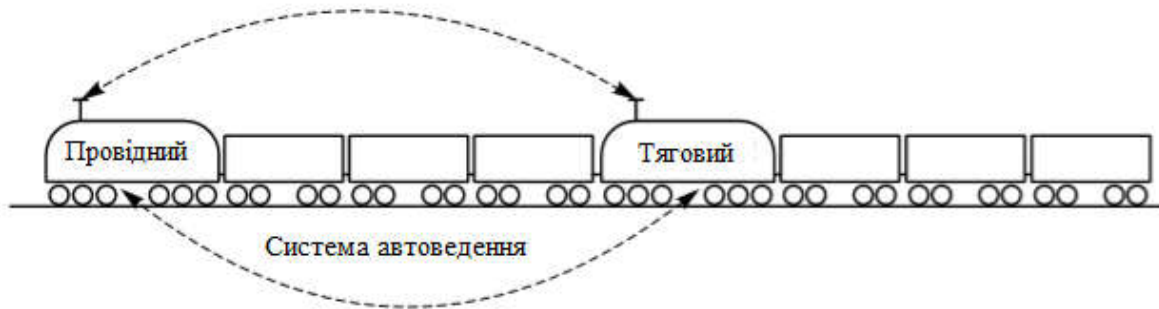


Рис. 13.5. Система автоведення вантажних з'єднаних поїздів

Перед початком руху та під час прямування поїзда система автоведення дозволяє змінювати параметр інтенсивності руху по ділянці, відключати гальмування та управляти тягою локомотива кнопочовим контролером, включати або вимикати мовні повідомлення службового характеру для локомотивної бригади.

Реалізація автоматичного ведення здвоєними або розподіленими по довжині состава локомотивами поїзда призводить до підвищення пропускної спроможності ділянок та маршрутної швидкості, а також до скорочення обороту рухомого складу.

Система автоведення в умовах обмеженої видимості (сніг, туман) значно полегшує роботу машиніста та підвищує безпеку руху поїздів.

### Запитання для самоконтролю

1. Яке призначення режимних карт?
2. Які завдання вирішують режимні карти?
3. Які ділянки колії називаються шкідливими та чому?
4. Призначення систем автоматизованого ведення поїзда.
5. В яких режимах можуть працювати системи автоведення поїзда?
6. Що забезпечує система автоведення?

## Тягові випробування локомотивів

### 14.1. Дослідні поїздки локомотивів і їх завдання

У процесі створення локомотива та після його складання обладнання, агрегати та локомотив в цілому випробовують для з'ясування їх працездатності та перевірки відповідності характеристик технічним умовам і вимогам.

За результатами випробувань оцінюють технічний рівень і надійність дослідних локомотивів, приймають рішення про масовий випуск серії локомотива, продовження доводочних заходів або припинення розробок даного типу локомотивів.

Дослідні зразки локомотивів проходять наступні види випробувань: заводські, тягово-енергетичні для електровозів, тягово-теплотехнічні для тепловозів, по впливу на колію, динамічні, міцності, експлуатаційно-ремонтні та тягово-експлуатаційні.

*Заводські випробування.* Робота окремих видів устаткування та агрегатів локомотива – тягових двигунів, дизелів, тягових генераторів, трансформаторів, допоміжних машин, апаратури – перевіряється в лабораторних умовах на стендах заводу. При цьому проводяться налагодження, перевірка міцності та працездатності обладнання.

На зібраному локомотиві перевіряють якість і правильність монтажу, проводять налагоджувальні роботи. Потім локомотив надходить на спеціальну ділянку залізничної лінії, де проходить заключний етап заводських випробувань – контрольні ходові з поїздами встановленої маси.

Після заводських випробувань локомотив передають залізницям для експлуатації.

*Тягово-теплотехнічні випробування* локомотива (тепловоз, дизель-поїзд, автомотриса, рейковий автобус) проводять науково-дослідні організації залізничного транспорту спільно з заводом-виробником після

пробігу локомотива в експлуатації не менше 5000 км. В процесі цих випробувань визначають основні характеристики та відповідність їх технічним умовам, прийнятим під час проектування, визначають нормативи, використовувані згодом в тягових розрахунках, встановлюють працездатність основних вузлів і взаємодію всіх його агрегатів і систем.

*Тягово-енергетичні випробування* електровоза або електрорухомого складу проводяться з метою визначення тягової характеристики. Крім того, визначаються основні характеристики електричного гальмування, розподіл струмів між паралельними ланцюгами тягових двигунів. Потім визначається коефіцієнт зчеплення коліс з рейками в залежності від швидкості руху, питомий опір руху під струмом і без струму, коефіцієнт потужності для електрорухомого складу змінного струму, загальний ККД електровоза з урахуванням витрат енергії на власні потреби та ін.

*По впливу на колію випробування* проводяться для визначення сил взаємодії між рухомим складом і верхньою будовою колії, для встановлення максимально допустимих швидкостей, що забезпечують безпеку руху. Випробування проводяться на прямих ділянках колії та кривих радіусами 250...300 і 600...700 м, на стрілочних переводах.

За результатами вимірювання сил взаємодії встановлюють найбільші допустимі швидкості руху по впливу на верхню будову колії.

Під час *динамічних випробувань* перевіряють ходові якості локомотива. В процесі випробувань досліджують характер коливань візків і кузова, вимірюють динамічні сили, що виникають в складальних одиницях екіпажної частини під час руху з різними швидкостями. Динамічні процеси реєструють за допомогою перетворювачів механічних параметрів в електричні (метод тензометрії), вимірювальних підсилювачів, магнітографів, аналого-цифрових перетворювачів, накопичувачів і т.д.

Результати випробувань після обробки отриманих даних за спеціальними програмами на ЕОМ призначені для вдосконалення ходових якостей локомотива.

Під час *міцнісних випробувань* детально досліджуються механічні напруження в різних частинах рам візків і локомотива, кузова в статичному стані та під час руху.

Якщо отримують позитивні результати випробувань, локомотив направляють в роботу для проведення експлуатаційних випробувань.

*Експлуатаційно-ремонтні випробування* проводять в період експлуатаційного пробігу локомотивом перших 100...150 тис км після складання. Локомотивні депо та дільниці обороту для експлуатаційно-ремонтних випробувань призначаються департаментом локомотивного господарства. Випробовувані локомотиви для зручності спостережень групуються в одному або обмеженій кількості депо. Експлуатацію дослідних локомотивів з поїздами встановленої маси здійснюють закріплені локомотивні бригади, які пройшли спеціальну підготовку.

В процесі випробувань оцінюють показники безвідмовності, довговічності і ремонтпридатності, ступінь зносу агрегатів, допоміжних машин і складальних одиниць, деталей і локомотива в цілому. Визначається трудомісткість ремонту складальних одиниць і агрегатів, перевіряється технологічність ремонту, пристосованість і доступність монтажу та демонтажу агрегатів, огляду та технічного обслуговування на локомотиві.

*Тягово-експлуатаційні випробування* локомотивів проводять служби локомотивного господарства залізниць із застосуванням тягово-енергетичної лабораторії (замість динамометричного вагона). На відміну від тягово-енергетичних, тягово-теплотехнічних та інших випробувань ці випробування мають на меті визначити практичні режими та результати роботи тягового рухомого складу та окремих його систем в умовах експлуатації та відповідності отриманих результатів тяговим розрахунками.

На основі результатів тягово-експлуатаційних випробувань вирішують завдання вдосконалення експлуатації локомотивів, визначають оптимальні норми маси поїздів, розробляють рекомендації щодо раціональних режимів керування поїздами (розробляються режимні карти) при заданій нормі маси поїзда та мінімальних витратах електроенергії або палива чи більш повному використанні зчіпної ваги локомотива та потужності тягових двигунів. За результатами тягово-експлуатаційних випробувань з'ясовують умови, необхідні для збільшення маси поїзда на конкретній ділянці, досліджують ефективність електричного гальмування, перевіряють результати тягових розрахунків.

Підвищення ефективності використання локомотивного парку в перевізному процесі є найважливішим завданням залізниць.

## 14.2. Методи проведення випробувань локомотивів

Ходові випробування локомотивів виконуються за допомогою тягово-енергетичних лабораторій, які прийшли на зміну динамометричним вагонам, що багато років застосовувалися на залізницях для випробувань тягового рухомого складу. Ці лабораторії є вагонами-лабораторіями, що обладнані необхідними вимірювальними та обчислювальними засобами.

Тягово-енергетичну лабораторію встановлюють в складі поїзда за дослідним локомотивом перед першим вагоном. Вимірювальні датчики, встановлені на дослідному локомотиві, з'єднуються кабелем з вимірювально обчислювальним комплексом вагона-лабораторії.

Для вимірювання поздовжніх сил тяги (гальмування в процесі руху) тягово-енергетична лабораторія обладнується гідравлічним динамометром, як правило, гідравлічним касетним однокамерним динамометром.

Слід зазначити, що гідравлічний касетний однокамерний динамометр має велику інерційність, що призводить до великих похибок результатів випробувань. Крім того, такий динамометр надзвичайно складно тарувати, тобто встановити масштаб, за допомогою якого визначаються фактичні значення отриманих сил тяги в процесі випробувань. Через це та ряд інших причин сучасні тягово-енергетичні лабораторії обладнуються електричними тензометричними динамометрами. В якості електричного тензометричного динамометра використовують хвостовик автозчеплення (рис. 14.1). Деформація хвостовика автозчеплення від сил тяги та гальмування за допомогою тензодатчиків та реєструючої електричні сигнали апаратури дозволяє оцінювати в динаміці тягово-гальмівні сили локомотива в процесі випробувань. Недоліком цього способу слід вважати труднощі тарування динамометричного автозчеплення.

Найбільш доцільно оцінювати тягові властивості досліджуваного локомотива за допомогою «зчіпного пристрою динамометричного вагона» – тензометричного клина автозчеплення. Тензометричний клин в процесі випробувань встановлюється на локомотиві замість штатного клина (рис. 14.2). Блок живлення, тензостанція, осцилограф або комп'ютер можна встановлювати в неробочій кабіні машиніста.



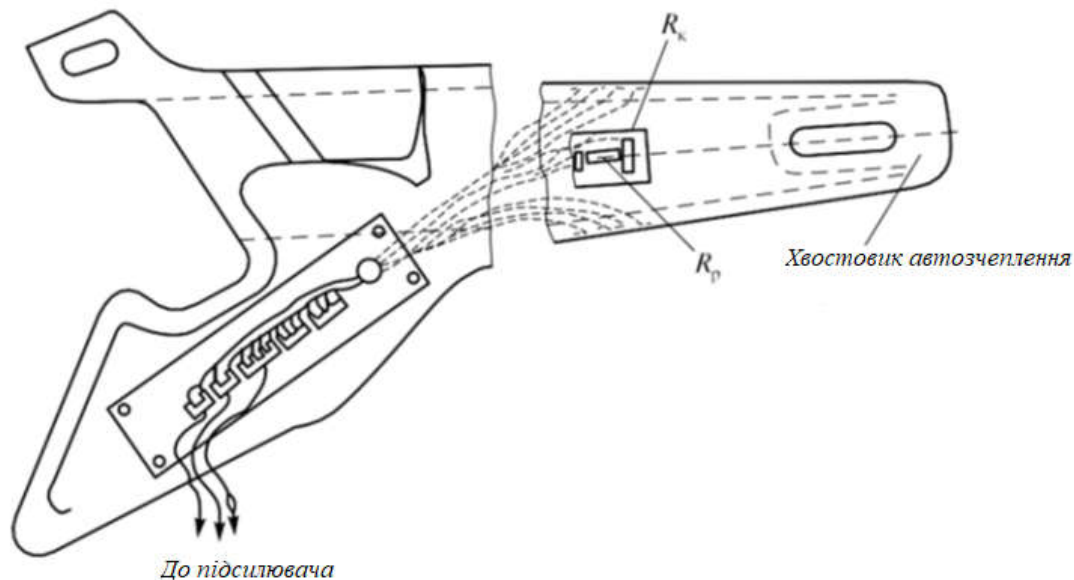


Рис. 14.1. Схема розміщення тензодатчиків на хвостовику динамометричної автозчеплення вагона-лабораторії:  
 $R_p$  – робочий (активний) тензодатчик;  $R_k$  – компенсаційний тензодатчик

Швидкість руху локомотива фіксується на осцилографі або комп'ютері від магнітоелектричного датчика, що встановлюється безпосередньо в буксі колісної пари. Датчик дозволяє вимірювати та фіксувати швидкість руху з великою точністю. Тензометричний клин перед випробуваннями тарують (рис. 14.3) на зразковому пресі від 0 до 100 т. Одночасно підбирають контрольний опір для електротарування, що проводиться в процесі експерименту з метою контролю і отримання достовірних даних у записі сил тяги.

На рис. 14.4 представлений зразок осцилограми із записом сили тяги тепловоза ТГ102-158 з поїздом вагою  $Q = 2800$  т, 142 осі під час зрушення з місця.

Точність результату запису сили тяги в динаміці дозволяє більш достовірно оцінювати тягові властивості локомотива, що випробовується.

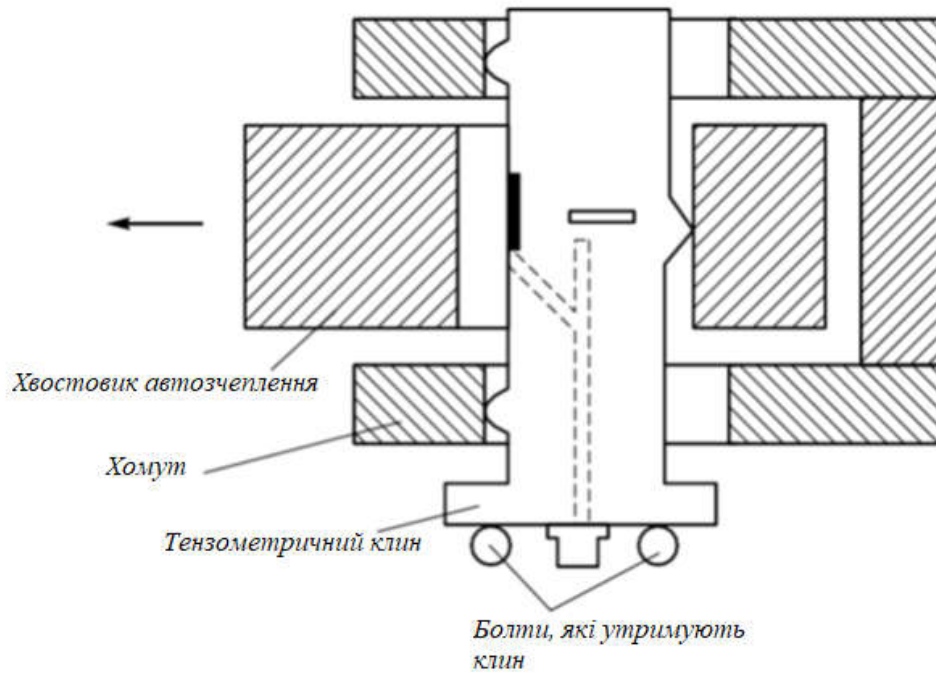


Рис. 14.2. Робота тензометричного клина автозчеплення в режимі тяги

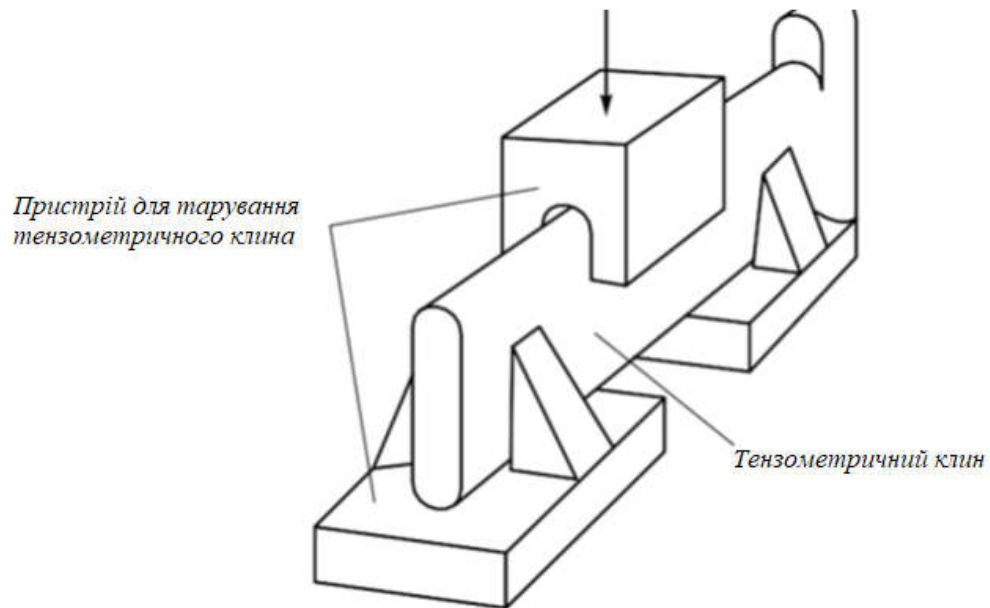


Рис. 14.3. Тарування тензометричного клина на зразковому пресі

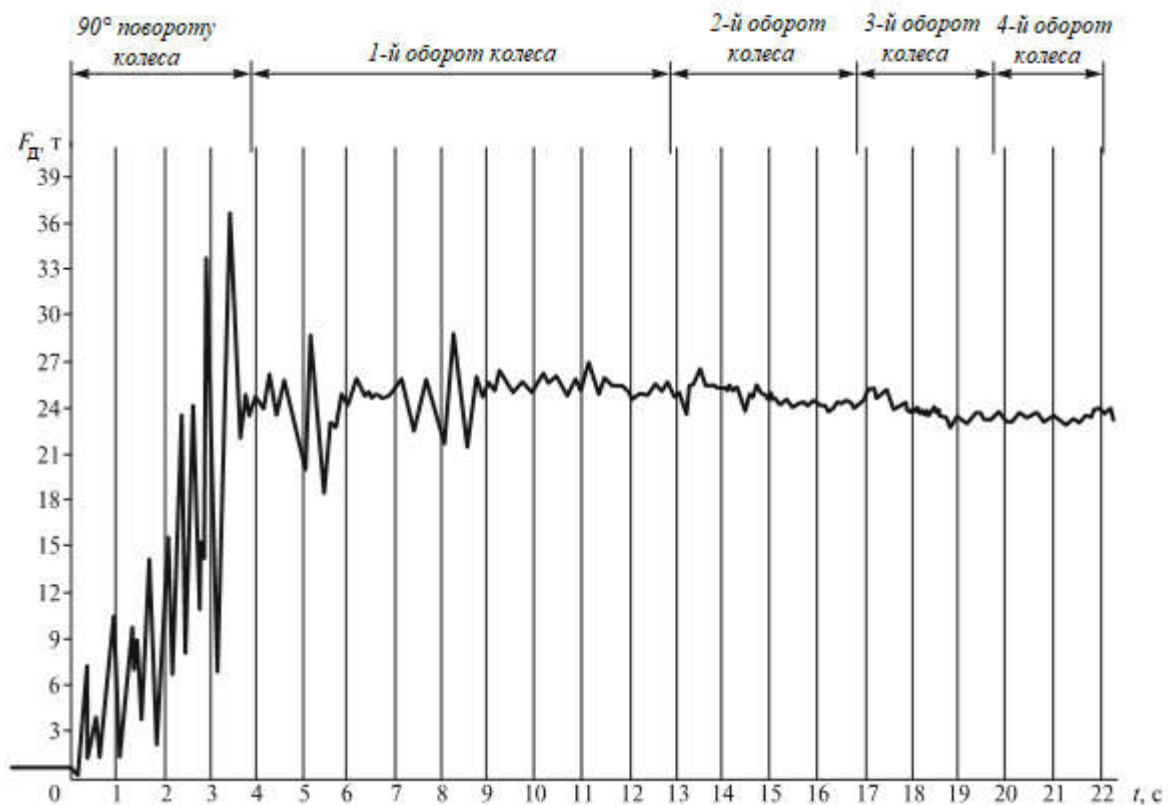


Рис. 14.4. Осцилограма запису сили тяги тепловоза ТГ102 з поїздом під час зрушення з місця

### 14.3. Експериментальне визначення основного опору руху локомотивів та вагонів

Вплив численних факторів на основний опір руху рухомого складу встановити у вигляді аналітичних залежностей неможливо. Тому питомий основний опір руху локомотивів і вагонів визначають експериментальним шляхом, застосовуючи один з методів: динамометричний, скочування, випробування на експериментальному кільці.

*Динамометричний метод.* Основний опір руху типу рухомого складу, що випробовується вимірюють динамометром динамометричного вагона або динамометром тягово-енергетичної лабораторії. Випробування проводяться на ділянці прямого горизонтального шляху великої протяжності. Тягово-енергетичну лабораторію або динамоме-

тричний вагон встановлюють між локомотивом і випробовуваною групою однотипних одиниць рухомого складу. Сила тяги та швидкість руху безперервно фіксуються в процесі випробувань, потім результати записів обробляються за допомогою засобів обчислювальної техніки методами математичної статистики. Це дозволяє встановити закономірності зміни питомого основного опору, в залежності від швидкості руху для типу рухомого складу, що випробовується. Даний метод широко застосовують для визначення основного опору руху вантажних і пасажирських вагонів. Для локомотивів цей метод неточний і економічно не вигідний, так як спотворюється складова основного опору – лобовий опір повітря, що знаходиться в з'єднанні випробовуваних локомотивів. У той же час випробовувати одночасно десятки секцій локомотивів не економічно.

*Методом скочування* визначають основний опір руху будь-якого типу рухомого складу.

Випробування проводять на прямій ділянці колії, що має затяжний спуск постійної крутизни. За допомогою допоміжного локомотива випробовується одиниця рухомого складу розганяється по ділянці до певної швидкості. Допоміжний локомотив відчіпляють, і подальший рух одиниці рухомого складу буде відбуватися за рахунок накопиченої кінетичної енергії та сили від ухилу профілю колії. Швидкість рухомого складу, що випробовується зменшується за рахунок дії сили основного опору руху. Вимірявши уповільнення  $\Delta v/\Delta t$  визначають питомий основний опір руху рухомого складу, що випробовується.

Досліди повторюють кілька разів, їх результати обробляють і представляють для фахівця з технічних розрахунків у вигляді формули для визначення основного питомого опору руху конкретного типу рухомого складу.

Метод скочування найбільш надійний під час визначення питомого основного опору руху локомотивів в режимі холостого ходу.

Питомий основний опір руху локомотива в режимі тяги менше питомого основного опору руху в режимі холостого ходу на сумарні втрати від механічних втрат в тягових електродвигунах, моторно-осьових підшипниках, зубчастих тягових передачах. Ці втрати попередньо визначають під час стендових випробувань колісно-моторних блоків локомотивів. Після відповідного аналізу отриманих результатів випробувань їх обробляють та представляють для користувачів тягових роз-

рахунків у вигляді певних залежностей від швидкості руху. Наприклад, для тепловозів і електровозів на ланкової колії питомий основний опір руху в режимі тяги визначають за формулою:

$$\omega'_0 = 1,9 + 0,01v + 0,003v^2,$$

для тепловозів і електровозів на ланкової колії питомий основний опір руху в режимах холостого ходу (вибігу) і механічного гальмування визначають за формулою:

$$\omega'_x = 2,4 + 0,011v + 0,00035v^2,$$

де  $v$  – швидкість руху локомотива, км/год.

Як за динамометричному, так і за методом скочування фіксуються технічний стан і конструкція колії дослідної ділянки, стан погоди та метеоумови в період випробувань рухомого складу.

*Експериментальний метод на кільці.* Основним недоліком розглянутих вище методів (динамометричного та скочування) є виключення з постійної експлуатації дослідних ділянок на час проведення випробувань рухомого складу. Порушуються графіки руху поїздів, розклади приміського та пасажирського рухів. Крім того, розглянуті методи досить трудомісткі та під час випробувань складно врахувати зміни погодних умов і напрямку вітру, що призводить до похибок експериментальних результатів.

Для усунення перерахованих недоліків динамометричного методу та скочування, випробування по визначенню питомого основного опору руху рухомого складу проводять на експериментальному кільці. В основному застосовується динамометричний метод.

Після обробки результатів експериментів, проведених на кільці, отримуються усереднені залежності питомих основних опорів від швидкості руху та навантаження від колісної пари на рейки різних типів рухомого складу. Отримані залежності питомих основних опорів руху одиниць рухомого складу рекомендовані для застосування в тягових розрахунках.

## **14.4. Перевірка використання потужності локомотива, що вимагається умовами експлуатації на залізничній ділянці**

Основне завдання дослідних поїздок на залізницях – визначення практичних режимів і перевірка використання потужності тягового рухомого складу та окремих його систем в умовах експлуатації, а також відповідності результатів тяговим розрахункам. На основі результатів цих випробувань вирішують завдання вдосконалення експлуатації локомотивів, визначають оптимальні норми маси поїздів, розробляють рекомендації щодо раціональних режимів керування поїздами за задану норму маси поїзда та мінімальних витратах електроенергії або палива, або більш повному використанні зчіпної ваги локомотива та потужності тягових електродвигунів. Під час тягово-експлуатаційних випробувань з'ясовують умови, необхідні для збільшення маси поїзда на даній ділянці, досліджують ефективність електричного гальмування, перевіряють результати тягових розрахунків.

За допомогою дослідних поїздок вивчаються та узагальнюються раціональні методи керування поїздами, намічаються заходи найкращого використання певного типу локомотива на ділянках, що мають складний профіль колії. Крім того, досліджуються тягові властивості та якості локомотива, проводяться порівняльні випробування локомотивів з різними тяговими параметрами.

В окремих випадках дослідними поїздками здійснюється перевірка маси складу за умовами зчеплення коліс локомотива з рейками, визначається час ходу поїзда по перегонам або перевіряється нагрівання тягових електродвигунів за певній масі состава та т.п.

### **Запитання для самоконтролю**

- 1. Для яких цілей проводять випробування локомотивів?*
- 2. Яким видам випробувань піддають локомотиви?*
- 3. Якими методами визначають питомий основний опір руху рухомого складу?*
- 4. Якими способами вимірюють сили тяги локомотива?*

## Список літератури

1. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Москва : Транспорт, 1985. 287 с.
2. Бахолдин В. И., Афонин Г. С., Курилкин Д. Н. Основы локомотивной тяги : учеб. пособ. Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2004. 308 с.
3. Кузьмич В. Д., Руднев В. С., Френкель С. Я. Теория локомотивной тяги : учебник / под ред. В. Д. Кузьмича. Москва : Маршрут, 2005. 448 с.
4. Осипов С. И., Осипов С. С., Феоктистов В. П. Теория электрической тяги : учебник / под ред. С. И. Осипова. Москва : Маршрут, 2006. 436 с.
5. Інструкція по технічному нормуванню витрат електричної енергії і пального локомотивами на тягу поїздів ЦТ-0059 : Наказ Укрзалізниці від 05.03.2003 р. № 62-Ц. Київ : Укрзалізниця, 2003. 85 с.

# Предметний покажчик

- Боксування, 93**
- Витрата електроенергії, 99**
  - витрата палива, 95
- Гальмівна сила, 124**
  - гальмівний шлях, 123, 45
  - гальмівні системи, 121
  - гвинтова характеристика дизеля, 65
  - генераторна характеристика дизеля, 64
  - гідравлічна передача потужності, 69
  - гідродинамічна передача потужності, 72
  - гідромеханічні передачі потужності, 78
  - гідромуфта, 73
  - гідростатична передача потужності, 71
  - гідротрансформатор, 74
  - годинний режим, 52
  - графік рівноважних швидкостей, 17
- Динамічні випробування, 129**
  - динамометрична сила тяги, 18
  - динамометричний метод, 134
  - дійсний гальмівний коефіцієнт, 125
  - дійсний шлях гальмування, 136
  - додатковий опір руху від кривих, 106
  - додаткові опори, 90
  - дотична потужність, 59
  - дотична сила тяги, 17
- Експлуатаційно-ремонтні випробування, 130**
  - екстрене гальмування, 123, 35
  - електрична передача постійного струму, 80
  - електрична стійкість, 38
  - електричне гальмування, 122
  - електродинамічне гальмування, 140
  - електромагнітний момент, 27
  - електромагнітні гальма, 145
  - електромеханічна характеристика, 27
- ЕРС, 26**
  - ефективна потужність дизеля, 60
  - ефективний ККД дизеля, 62
- Зовнішня характеристика дизеля, 64**
  - зовнішня характеристика тягового генератора, 81
- Індикаторна сила тяги, 17**
  - індикаторний ККД дизеля, 61
- Коефіцієнт зчеплення, 17, 20**
  - коефіцієнт корисної дії



- тягового електродвигуна, 27
- коефіцієнт кратності зміни робочих швидкостей, 59
- коефіцієнт приведеної маси, 150
- коефіцієнт приведеної маси поїзда, 149
- крива витрати палива, 107
- крива швидкості, 13
- Магнітна характеристика, 28**
- магнітно-рейкові гальма, 122
- машинна стала моменту, 27
- метод приведення, 125
- метод скочування, 135
- механічна передача, 67
- механічна стійкість, 38
- механічна характеристика, 28
- механічний ККД дизеля, 62
- міцнісні випробування, 129
- Навантажувальна характеристика, 28**
- норми витрати енергії, 103
- Обмеження тягової характеристики, 36**
- опір від кочення коліс по рейках, 92
- опір від тертя ковзання коліс по рейках, 92
- опір від тертя підшипників букс колісних пар, 91
- опір руху від нерівності рейкової колії, 97
- опір руху від повітряного середовища, 97
- опір руху від поглинаючих апаратів автозчепів, 98
- опор рушанню поїзда, 90
- основний опір, 90, 91
- Передача потужності змінно-постійного струму, 84**
- питома витрата електроенергії, 101
- питома витрата палива, 97
- питомий основний опір руху поїзда, 101
- пляма контакту, 92
- повзун, 96
- повне службове гальмування, 123, 34
- повний гальмівний шлях, 134
- принцип малих відхилень, 26
- Регульовальне гальмування, 123**
- режим вибігу, 14
- режим гальмування, 14
- режим тяги, 14
- рекуперативне гальмування, 42
- реостатне гальмування, 122
- реостатний пуск, 50
- рівноважна швидкість, 23
- розрахункова швидкість, 57
- розрахунковий гальмівний коефіцієнт, 132
- розрахунковий коефіцієнт тертя, 125
- розрахунковий підйом, 22
- розрахунковий режим, 52
- Сила опору від ухилу профілю колії, 104**
- тяги, 16
- — дотична, 16
- — тяги на автозчепі, 18
- внутрішні, 13
- зовнішні, 13
- керовані, 13
- некеровані, 13

системи збудження, 25  
службове гальмування, 123  
— ступінчасте гальмування, 34  
ступінь ослаблення поля, 47  
**Температура** нагріву обмоток, 84  
тепловозна характеристика дизеля, 64  
тривалий режим, 52  
тягова характеристика гідродинамічної передачі, 76  
— характеристика ЕРС, 47  
— — локомотива, 37  
тягово-експлуатаційні випробування, 130  
— випробування, 129  
тягово-теплотехнічні випробування, 128  
**Умовне паливо**, 97  
універсальна характеристика гідротрансформатора, 75  
універсальні характеристики дизеля, 65  
уніфікована вага состава, 11  
**Фіктивний підйом**, 108  
фрикційні гальма, 123  
**Характеристики дизеля**, 63  
**Час підготовки гальм до дії**, 135, 46  
часткова характеристика тягового генератора, 81  
часткові характеристики дизеля, 64  
**Швидкісна економічна характеристика дизеля**, 66  
швидкісний підйом, 5  
швидкісні характеристики дизеля, 64  
швидкість виходу на автоматичну характеристику, 57  
швидкість сприйняття, 53  
шлях підготовки гальм до дії, 46  
**Юз**, 96

## ДОДАТОК А

**Приклад тягового розрахунку**

Необхідно виконати порівняльні тягові розрахунки для електровозів ВЛ80<sup>Т</sup> та 2ЕЛ5К та состава поїзда, параметри якого наведені в табл. А.1 на ділянці профіль якої наведено в табл. А.2.

Таблиця А.1

**Вихідні дані для розрахунку**

Найменування показника	Значення
Тип вагонів, з яких складається состав	4-вісні
Маса вагона брутто, т	88
Гальмівних осей в складі поїзда, %	100
Довжина приймально-відправних колій $l_{\text{пвід}}$ , м	1550
Гальмівні колодки	чавун

Таблиця А.2

**Профіль заданої ділянки**

Номер елемента	Крутизна, ‰	Довжина елемента, м	Параметри кривої, м		Станція ділянки
			радіус	довжина	
1	2	3	4	5	6
1	0	1160			А
2	-6,8	300			
3	0	190			
4	2,6	550	540	420	
5	0	720	670	400	
6	1,4	930			
7	2,8	500			
8	5,8	250			
9	1,2	1250			
10	1,5	600			
11	0,6	300			

Продовження табл. А.2

1	2	3	4	5	6
12	1,4	400			
13	2,2	700			
14	1,1	300			
15	2,4	1800	740	800	
16	1,6	400			
17	3,7	600			
18	5,2	400			
19	6,9	300			
20	6	1050			
21	1,6	690			
22	5	440	530	400	
23	3,3	200	520	200	
24	0	1200			Б
25	5	920			
26	6,5	200			
27	5	200			
28	0	200			
29	-2,8	200	480	200	
30	-1	400	520	400	
31	-2,5	300	480	300	
32	-1	1150	400	95	
33	-6	450			
34	-4,7	700			
35	-5,2	1210			
36	-2	390			
37	-1	300			
38	-4,3	200			
39	-5	800			
40	-5,7	300			
41	-4,1	300			
42	-1,1	400	800	380	
43	0	500			
44	-1	300			
45	-4	500			
46	-5	600			
47	-2	300			
48	0	600			
49	1	400			
50	0	200			
51	-1,5	200			
52	0	700			

Продовження табл. А.2

1	2	3	4	5	6
53	-0,3	500			
54	0	800			
55	-3,2	200			
56	-5,3	800			
57	-4	400			
58	-1	250			
59	0	450			
60	1,2	1000	1190	260	В
61	0	300			
62	-4,5	500	630	500	
63	0	200			
64	2,2	250			
65	5	650	950	500	
66	1,5	300	960	300	
67	0,6	400			
68	4	400			
69	5	1300			
70	4	200			
71	5,6	850			
72	1	200			
73	-1	250			
74	-1,7	1350			
75	0	350			
76	0,6	300			
77	0	400			Г
78	0,8	250			
79	0	200			
80	-2,3	330	675	140	
81	-4,6	320	675	320	
82	-7	380	675	300	
83	-9	350			
84	-4,5	220	830	200	
85	-8	400	830	385	
86	-10	200			
87	-7,6	300			
88	-6,2	350			
89	-7	1000	900	300	
90	-7,3	600	708	600	
91	-6,5	250	800	250	
92	-7,1	450	500	450	
93	-6,2	400	500	400	

Закінчення табл. А.2

1	2	3	4	5	6
94	-7,7	400			
95	-7,2	400			
96	-3,6	200			
97	-2	200			
98	0	430			
99	-3,5	320	920	300	
100	-5	200	500	100	
101	-3,5	750	400	650	
102	-1,5	250			
103	0,7	300			
104	0	350			
105	-0,5	200			
106	0	200			
107	-1,8	300			
108	-0,5	400			
109	-2,4	700			Д

Тягові характеристики електровозів наведено на рис. А.1, А. 2.

### А.1. Визначення розрахункового підйому

Проаналізувавши профіль заданої ділянки, можна зробити висновок, що розрахунковим підйомом буде елемент № 71 параметрами  $i_{71} = +5,6 \text{ ‰}$  та  $S_{71} = 850 \text{ м}$ , а швидкісним підйомом буде елемент № 19 з параметрами  $i_{19} = +6,9 \text{ ‰}$  та  $S_{19} = 300 \text{ м}$ , а також керуючий ухил № 86 з параметрами  $i_{86} = -10 \text{ ‰}$  та  $S_{86} = 200 \text{ м}$ .

### А.3 Спрямлення профілю колії

Для спрощення тягових розрахунків, а також для скорочення їх об'єму і відповідно часу на їхнє виконання спрямимо профіль колії згідно методики.

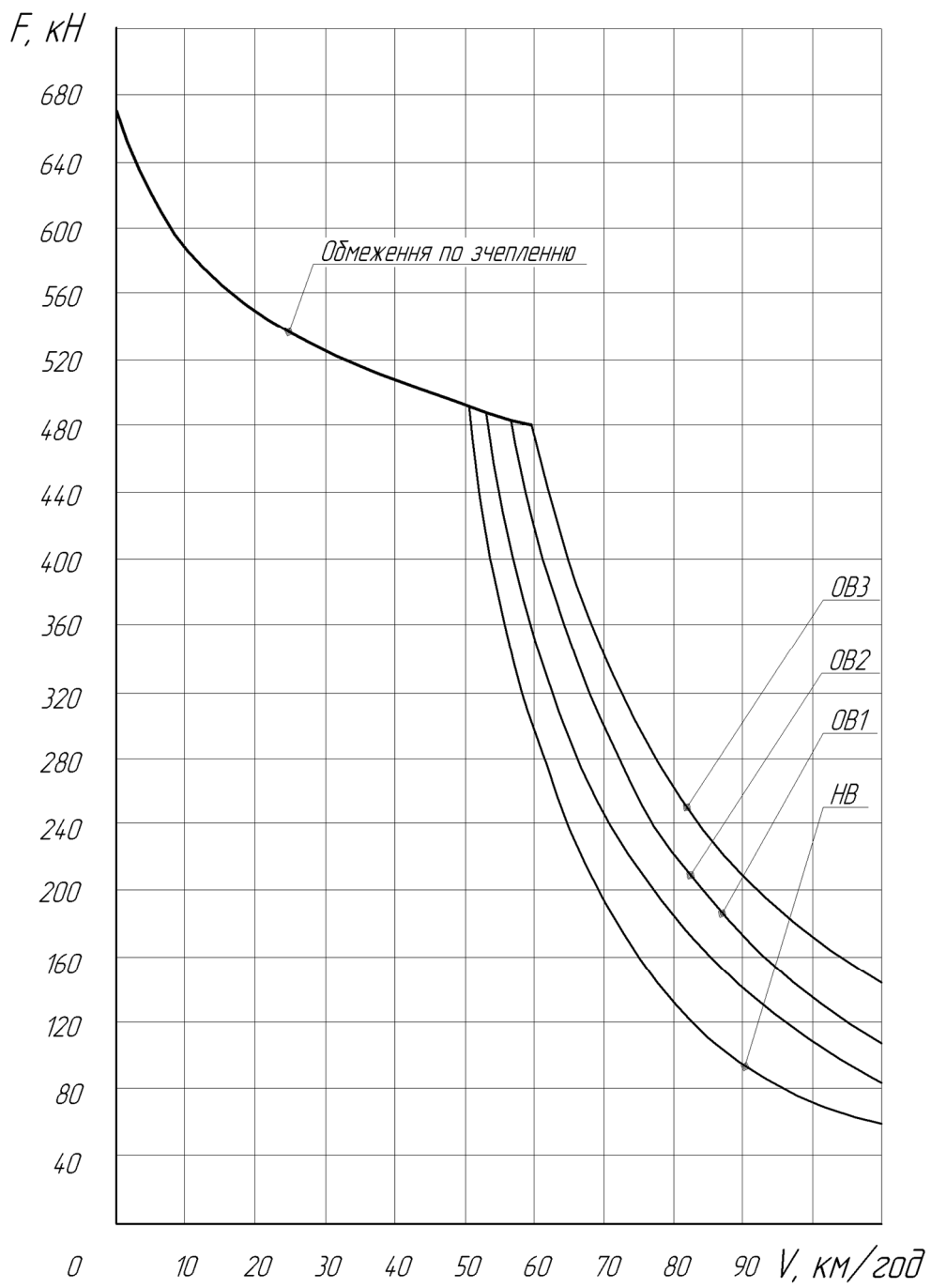


Рис. А.1. Тягова характеристика електровоза ВЛ80Г

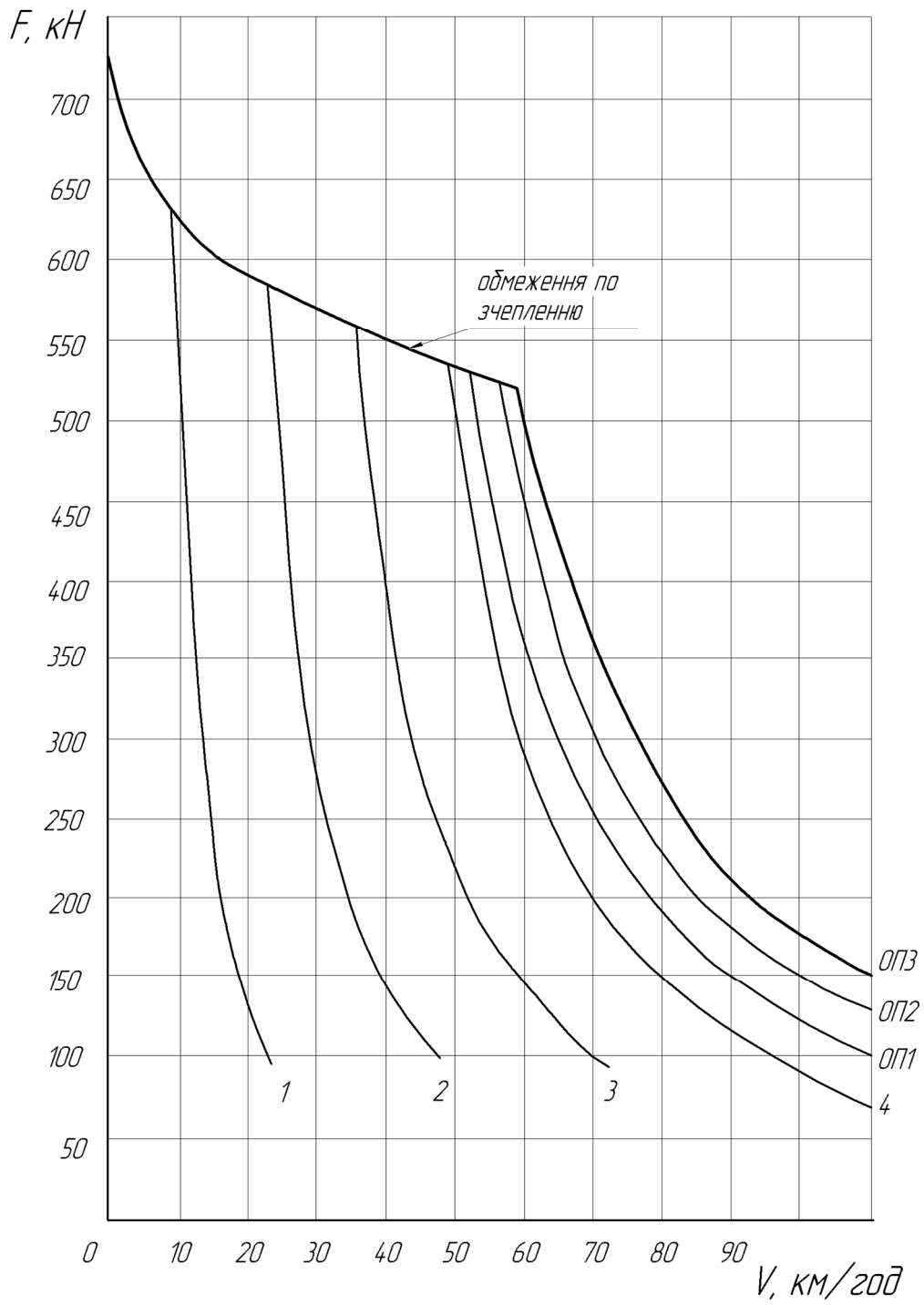


Рис. А.2. Тяговая характеристика электровоза 2ЕЛ5К



Спрямлення профілю полягає в заміні двох або декількох суміжних елементів поздовжнього профілю колії одним елементом, довжина якого  $S_c$  дорівнює сумі довжин елементів, що спрямляються  $(S_1, S_2, \dots, S_n)$ , тобто

$$S_c = S_1 + S_2 + \dots + S_n, \quad (A.1)$$

а крутизна  $i'_c$  розраховується за формулою:

$$i'_c = \frac{i_1 S_1 + i_2 S_2 + \dots + i_n S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}, \quad (A.2)$$

де  $i_1, i_2, \dots, i_n$  – крутизна елементів ділянки, що спрямляється, ‰.

Щоб розрахунки швидкості та часу руху поїзда по ділянці були достатньо точними, необхідно виконувати перевірку можливості спрямлення групи елементів профілю за формулою:

$$S_i \leq \frac{2000}{\Delta i}, \quad (A.3)$$

де  $S_i$  – довжина елемента, що спрямляється, м;

$\Delta i$  – абсолютна величина різниці між ухилом спрямленої ділянки та ухилом елемента, що перевіряється, ‰, тобто  $|i'_c - i_i|$ .

Перевірці за формулою (A.3) підлягає кожний елемент групи, що спрямляється. Чим коротші елементи групи, яка спрямляється, і чим ближче вони за крутизною, тим більш вірогідно, що перевірка їх на задоволення умови (A.3) виявиться достатньою.

У разі однакової крутизни елемента спрямленої ділянки та реального профілю, тобто коли  $\Delta i = 0$ , перевірку за формулою (A.3) можна не проводити, тому що в цьому разі забезпечується максимальна точність розрахунків за спрямленим профілем.

Криві на спрямленій ділянці замінюємо фіктивним підйомом, крутизна якого визначається за формулою:

$$i''_c = \frac{700}{S_c} \sum_{i=1}^n \frac{S_{kpi}}{R_i}, \quad (A.4)$$

де  $S_{\text{кр}i}$  і  $R_i$  – довжина та радіус кривих спрямленої ділянки, м.

Крутизна спрямленої ділянки з урахуванням фіктивного підйому від кривої

$$i_c = i'_c + i''_c. \quad (\text{A.5})$$

Необхідно відзначити, що знак крутизни ухилу  $i'_c$  може бути і додатним (для підйому) і від'ємним (для спусків); знак крутизни фіктивного підйому від кривої  $i''_c$  завжди додатний. Тобто на підйомі крутизна спрямленої ділянки, визначена за формулою (A.5), буде більшою, а на спуску меншою за  $i'_c$ . Це враховується під час обчислень.

Об'єднуються в групу для спрямлення лише близькі за крутизною елементи профілю одного знаку. Горизонтальні елементи (площадки) можуть включатися в групи, що спрямляються, як з елементами, які мають додатний знак крутизни, так і з елементами від'ємної крутизни. Елементи, на яких розташовані роздільні пункти, не спрямлюються.

Не включаються у групи елементів, що підлягають спрямленню, розрахунковий підйом, а також швидкісний підйом, тому що такі дії можуть внести похибку при визначенні маси состава та розрахунку часу руху поїзда. Спрямлений профіль повинен зберегти характерні особливості дійсного профілю.

Спрямлений профіль ділянки А – Д наведений у табл. А.3.

Таблиця А.3

Спрямлений профіль від станції А до станції Д

Номер елемента	Крутизна елемента $i$ , ‰	Довжина елемента $S$ , м	Криві		Довжина спрямленої ділянки $S_c$ , м	Крутизна спрямленої ділянки, ‰	Фіктивний підйом від кривих, ‰	Сумарна крутизна спрямленої ділянки $i_c = i'_c + i''_c$ , ‰		Номер спрямленої ділянки	Станція
			$R$ , м	$S_{\text{кр}}$ , м				туди	звідти		
1	0	1160			1160	0		0	0	1	А
2	-6,8	300			300	-6,8		-6,8	6,8	2	
3	0	190			1460	0,98	0,66	1,64	-0,32	3	
4	2,6	550	540	420							

Продовження табл. А.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	0	720	670	400							
6	1,4	930			4230	1,72		1,72	-1,72	4	
7	2,8	500									
8	5,8	250									
9	1,2	1250									
10	1,5	600									
11	0,6	300									
12	1,4	400			4200	2,65	0,18	2,83	-2,47	5	
13	2,2	700									
14	1,1	300									
15	2,4	1800	740	800							
16	1,6	400									
17	3,7	600									
18	5,2	400			300	6,9		6,9	-6,9	6	
19	6,9	300									
20	6	1050									
21	1,6	690			2380	4,31	0,34	4,65	-3,97	7	
22	5	440	530	400							
23	3,3	200	520	200							
24	0	1200			1200	0		0	0	8	Б
25	5	920			1320	5,23		5,23	-5,23	9	
26	6,5	200									
27	5	200									
28	0	200			2250	-1,27	0,56	-0,71	1,83	10	
29	-2,8	200	480	200							
30	-1	400	520	400							
31	-2,5	300	480	300							
32	-1	1150	400	95							
33	-6	450									
34	-4,7	700									
35	-5,2	1210									
36	-2	390									
37	-1	300									
38	-4,3	200			2500	-3,3	0,13	-3,17	3,43	12	
39	-5	800									
40	-5,7	300			1700	-3,47		-3,47	3,47	13	
41	-4,1	300									
42	-1,1	400	800	380							
43	0	500									
44	-1	300									
45	-4	500									

Продовження табл. А.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
46	-5	600									
47	-2	300									
48	0	600			1200	0,33		0,33	-0,33	14	
49	1	400									
50	0	200									
51	-1,5	200									
52	0	700			2200	-0,2		-0,2	0,2	15	
53	-0,3	500									
54	0	800									
55	-3,2	200									
56	-5,3	800									
57	-4	400			2100	-3,2		-3,2	3,2	16	
58	-1	250									
59	0	450									
60	1,2	1000	1190	260	1000	1,2	0,15	1,35	-1,05	17	В
61	0	300									
62	-4,5	500	630	500	1000	-2,25	0,56	-1,69	2,81	18	
63	0	200									
64	2,2	250									
65	5	650	950	500	1600	2,81	0,37	3,18	-2,44	19	
66	1,5	300	960	300							
67	0,6	400									
68	4	400									
69	5	1300			1900	4,68		4,68	-4,68	20	
70	4	200									
71	5,6	850			850	5,6		5,6	-5,6	21	
72	1	200			200	1		1	-1	22	
73	-1	250									
74	-1,7	1350			1600	-1,59		-1,59	1,59	23	
75	0	350									
76	0,6	300			1500	0,25		0,25	-0,25	24	
77	0	400									Г
78	0,8	250									
79	0	200									
80	-2,3	330	675	140							
81	-4,6	320	675	320	1030	-4,75	0,77	-3,98	5,52	25	
82	-7	380	675	300							
83	-9	350			350	-9		-9	9	26	
84	-4,5	220	830	200							
85	-8	400	830	385	620	-6,11	0,8	-5,31	6,91	27	
86	-10	200			200	-10		-10	10	28	

Закінчення табл. А.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
87	-7,6	300			4150	-7,01	0,54	-6,47	7,55	29	
88	-6,2	350									
89	-7	1000	900	300							
90	-7,3	600	708	600							
91	-6,5	250	800	250							
92	-7,1	450	500	450							
93	-6,2	400	500	400							
94	-7,7	400									
95	-7,2	400									
96	-3,6	200			2350	-2,66	0,7	-1,96	3,36	30	
97	-2	200									
98	0	430									
99	-3,5	320	920	300							
100	-5	200	500	200							
101	-3,5	750	400	650							
102	-1,5	250									
103	0,7	300			300	0,7		0,7	-0,7	31	
104	0	350			1450	-0,58		-0,58	0,58	32	
105	-0,5	200									
106	0	200									
107	-1,8	300									
108	-0,5	400									
109	-2,4	700			700	-2,40		-2,40	2,40	33	Д

#### А.4. Розрахунок маси состава

Маса состава – один з найважливіших показників роботи залізничного транспорту. Збільшення маси состава дозволяє підвищити перевізну здатність залізничних ліній, зменшити витрати пального та електричної енергії, знизити собівартість перевезень. Тому масу вантажного состава визначають виходячи з повного використання тягових та потужностних якостей локомотива.

Для вибраного розрахункового підйому маса состава в тонах визначається за формулою:

$$Q = \frac{F_{\text{др}} - (\omega'_0 + i_p) \cdot P \cdot g}{(\omega''_0 + i_p) \cdot g}, \quad (2.6)$$

де  $F_{\text{др}}$  – розрахункова сила тяги локомотива, Н;

$P$  – розрахункова маса локомотива, т;

$\omega'_0$  – основний питомий опір локомотива, Н/кН;

$\omega''_0$  – основний питомий опір состава, Н/кН;

$i_p$  – крутизна розрахункового підйому, ‰;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Величини  $\omega'_0$  і  $\omega''_0$  визначають для розрахункової швидкості локомотива.

Основний питомий опір локомотива в Н/кН в залежності від швидкості на режимі тяги (у разі руху під струмом) визначається за формулою:

$$\omega'_0 = 1,9 + 0,01 \cdot V + 0,0003 \cdot V^2. \quad (A.7)$$

Тоді

$$\omega'_{0 \text{ ВЛ80T}} = 1,9 + 0,01 \cdot 43,5 + 0,0003 \cdot 43,5^2 = 2,9 \text{ Н/кН};$$

$$\omega'_{0 \text{ 2ЕЛ5К}} = 1,9 + 0,01 \cdot 51 + 0,0003 \cdot 51^2 = 3,19 \text{ Н/кН}.$$

Основний питомий опір складу в Н/кН визначають за формулою:

$$\omega''_0 = \alpha \cdot \omega''_{04} + \beta \cdot \omega''_{06} + \gamma \cdot \omega''_{08}, \quad (A.8)$$

де  $\alpha, \beta, \gamma$  – відповідно частки 4-х, 6-ті та 8-вісних вагонів в составі за масою;

$\omega''_{04}$  – основний питомий опір 4-вісних вантажних вагонів, Н/кН;

$\omega''_{06}$  – основний питомий опір 6-вісних вантажних вагонів, Н/кН;

$\omega''_{08}$  – основний питомий опір 8-вісних вантажних вагонів, Н/кН.

$$\omega''_{04} = 0,7 + \frac{3 + 0,1 \cdot V + 0,0025 \cdot V^2}{q_{04}}, \quad (\text{A.9})$$

де  $q_{04}$  – маса, яка припадає на одну колісну пару 4-вісного вагона, т/вісь;

$$q_{04} = \frac{q_4}{4}, \quad (\text{A.10})$$

де  $q_4$  – маса бруто 4-вісного вагона, т.

Состав складається з чотирьовісних вагонів з підшипниками кочення, тоді

$$q_{04} = \frac{84}{4} = 21 \text{ т/вісь};$$

$$\omega''_{04}^{\text{ВЛ80}^\top} = 0,7 + \frac{3 + 0,1 \cdot 43,5 + 0,0025 \cdot 43,5^2}{21} = 1,28 \text{ Н/кН};$$

$$\omega''_{04}^{2\text{ЕЛ5К}} = 0,7 + \frac{3 + 0,1 \cdot 51 + 0,0025 \cdot 51^2}{21} = 1,4 \text{ Н/кН};$$

$$\omega''_0^{\text{ВЛ80}^\top} = 1 \cdot 1,28 = 1,28 \text{ Н/кН};$$

$$\omega''_0^{2\text{ЕЛ5К}} = 1 \cdot 1,4 = 1,4 \text{ Н/кН}.$$

Маса состава

$$Q^{\text{ВЛ80}^\top} = \frac{502272 - (2,9 + 5,6) \cdot 190 \cdot 9,81}{(1,28 + 5,6) \cdot 9,81} = 7207 \text{ т};$$

$$Q^{2\text{ЕЛ5К}} = \frac{531000 - (3,19 + 5,6) \cdot 192 \cdot 9,81}{(1,4 + 5,6) \cdot 9,81} = 7492 \text{ т}.$$

Розраховані за формулою (А.6) маси составів у відповідності з ПТР

округляться до 50 або 100 т, тоді: для електровоза ВЛ80<sup>Т</sup> –  $Q = 7200$  т;  
для електровоза 2ЕЛ5К –  $Q = 7500$  т.

Тобто, електровоз 2ЕЛ5К спроможний вести по заданій ділянці А–Д состав з масою на 300 т вищою, ніж електровоз ВЛ80<sup>Т</sup>, що дозволить збільшити пропускну здатність ділянки.

### **А.5. Перевірка розрахункової маси складу на можливість надійного подолання короткого підйому крутизною більше розрахункового**

Під час виконання тягових розрахунків виконується перевірка аналітичним методом на можливість подолання швидкісного підйому, з урахуванням використання кінетичної енергії, накопиченої на попередніх «легких» елементах профілю. При цьому приймають гіпотезу про рівноуповільнений рух поїзда в інтервалі швидкості  $\Delta V \leq 10$  км/год і використовують розрахункове співвідношення:

$$S = \frac{4,17(V_k^2 - V_n^2)}{f_{дсер} - \omega_{0сер}}, \quad (A.11)$$

де  $V_n$  – швидкість на початку інтервалу швидкості  $\Delta V$ ; початкова швидкість для першого інтервалу вибирається з умов підходу до елемента підйому, який перевіряється  $i_{пер}$  (для вантажних поїздів можна приймати  $V_n = 70...90$  км/год та не вище конструкційної швидкості заданого локомотива);

$V_k$  – швидкість в кінці інтервалу швидкості  $\Delta V$ , км/год.

Розрахунок пройденого шляху за формулою (А.11) ведуть до тих пір, поки кінцева швидкість останнього інтервалу не буде дорівнювати розрахунковій, тобто  $V_k = V_p$ .

Питому силу тяги  $f_{дсер}$  та питомий опір  $\omega_{0сер}$  в межах вибраного інтервалу зміни швидкостей  $\Delta V$  приймають рівними їхнім значенням за середню швидкість



$$V_{\text{сер}} = \frac{V_{\text{н}} + V_{\text{к}}}{2}. \quad (\text{A.12})$$

Питомі сили  $f_{\text{дсер}}$  та  $\omega_{0\text{сер}}$  вираховують за формулами:

$$f_{\text{дсер}} = \frac{F_{\text{дсер}}}{(P + Q) \cdot g}; \quad (\text{A.13})$$

$$\omega_{0\text{сер}} = \frac{(\omega'_{0\text{сер}} + i_{\text{пер}}) \cdot P \cdot g + (\omega''_{0\text{сер}} + i_{\text{пер}}) \cdot Q \cdot g}{(P + Q) \cdot g}. \quad (\text{A.14})$$

Значення сили тяги локомотива  $F_{\text{дсер}}$  для середньої швидкості  $V_{\text{сер}}$  визначають за тяговою характеристикою локомотива. Для тієї ж середньої швидкості визначають основний питомий опір  $\omega'_{0\text{сер}}$  локомотива за формулою (А.7) і основний питомий опір  $\omega''_{0\text{сер}}$  складу за формулою (А.8) з використанням формул (А.9–А.13). Якщо сума отриманих за формулою (А.11) відстаней, пройдених поїздом у відповідних інтервалах швидкостей  $\Delta V$ , більша або рівна довжині підйому  $S_{\text{пер}}$ , тобто

$$S \geq S_{\text{пер}}, \quad (\text{A.15})$$

то на цьому перевірці закінчується та робиться висновок про те, що за розраховану масу состава  $Q$  поїзд надійно подолає підйом, що перевіряється, крутизною більше розрахункового, з урахуванням використання накопиченої до початку елемента кінетичної енергії.

Проведемо розрахунок для діапазону швидкостей  $V_{\text{н}} = 80$  км/год;  $V_{\text{к}} = 70$  км/год;  $V_{\text{сер}} = 75$  км/год.

$$f_{\text{дсер}}^{\text{2ЕЛ5К}} = \frac{318500}{(192 + 7500) \cdot 9,81} = 4,22 \text{ Н/кН};$$

$$f_{\text{дсер}}^{\text{ВЛ80}^{\text{T}}} = \frac{257022}{(190 + 7200) \cdot 9,81} = 3,55 \text{ Н/кН};$$

$$\omega'_0 = 1,9 + 0,01 \cdot 75 + 0,0003 \cdot 75^2 = 4,34 \text{ Н/кН};$$

$$\omega''_{04} = 0,7 + \frac{3 + 0,1 \cdot 75 + 0,0025 \cdot 75^2}{21} = 1,87 \text{ Н/кН};$$

$$\omega_{0\text{сеп}}^{2\text{ЕЛ5К}} = \frac{(4,34 + 6,9) \cdot 192 \cdot 9,81 + (1,87 + 6,9) \cdot 7500 \cdot 9,81}{(192 + 7500) \cdot 9,81} = 8,83 \text{ Н/кН};$$

$$\omega_{0\text{сеп}}^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = \frac{(4,34 + 6,9) \cdot 190 \cdot 9,81 + (1,87 + 6,9) \cdot 7200 \cdot 9,81}{(190 + 7200) \cdot 9,81} = 8,83 \text{ Н/кН};$$

$$S_1^{2\text{ЕЛ5К}} = \frac{4,17(70^2 - 80^2)}{4,22 - 8,83} = 1357 \text{ м};$$

$$S_1^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = \frac{4,17(70^2 - 80^2)}{3,55 - 8,83} = 1183 \text{ м}.$$

Довжина швидкісного підйому складає  $S_{19} = 300$  м. Це означає, що у обох випадках поїзди надійно подолають швидкісний підйом.

## А.6. Перевірка розрахованої маси складу на зрушення з місця на роздільних пунктах

Профіль складається з п'яти роздільних пунктів з ухилами:  $i_1 = 0$  ‰;  $i_8 = 0$  ‰;  $i_{17} = 1,2$  ‰;  $i_{24} = 0,25$  ‰;  $i_{33} = -2,4$  ‰. Перевірка виконується для більшого за значенням ухилу, тобто у даному випадку для третього пункту. Перевірка виконується за допомогою формули:

$$Q_{\text{зруш}} = \frac{F_{\text{д зруш}}}{(\omega_{\text{зруш}} + i_{\text{зруш}}) \cdot g} - P, \quad (\text{А.16})$$

де  $F_{\text{д зруш}}$  – сила тяги локомотива при зрушенні состава з місця, Н;

$i_{\text{зруш}}$  – крутизна найбільш важного елемента на роздільних пунктах заданої дільниці, ‰;

$\omega_{\text{зруш}}$  – питомий опір поїзда при зрушенні з місця, Н/кН.

$$\omega_{\text{зруш}} = \alpha \cdot (\delta \cdot \omega_{\text{зруш4}}^{\text{коч}} + \varepsilon \cdot \omega_{\text{зруш4}}^{\text{ков}}) + \beta \cdot \omega_{\text{зруш6}}^{\text{коч}} + \gamma \cdot \omega_{\text{зруш8}}^{\text{коч}}, \quad (\text{A.17})$$

де  $\omega_{\text{зруш4}}^{\text{коч}}$  і  $\omega_{\text{зруш4}}^{\text{ков}}$  – питомі опори при рушанні з місця відповідно для 4-вісних вагонів на підшипниках кочення та на підшипниках ковзання, Н/кН;

$\delta$  і  $\varepsilon$  – відповідно частки 4-вісних вагонів з підшипниками кочення та підшипниками ковзання.

Для вагонів на підшипниках кочення

$$\omega_{\text{зруш}}^{\text{коч}} = \frac{28}{q_0 + 7}, \quad (\text{A.18})$$

де  $q_0$  – маса, що приходить на одну колісну пару для даної групи вагонів, т.

Питомий опір 4-вісних вагонів на підшипниках кочення

$$\omega_{\text{зруш4}}^{\text{коч}} = \frac{28}{21 + 7} = 1 \text{ Н/кН},$$

$$\omega_{\text{зруш}} = 1 \cdot 1,0 = 1 \text{ Н/кН}.$$

Тоді

$$Q_{\text{зруш}}^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = \frac{649422}{(1 + 1,2) \cdot 9,81} - 190 = 29900 \text{ т};$$

$$Q_{\text{зруш}}^{\text{2ЕЛ5К}} = \frac{725000}{(1 + 1,2) \cdot 9,81} - 192 = 33400 \text{ т}.$$

Можлива маса поїзда при рушенні з місця перевищує фактичну масу поїзда, отже, перевірка виконана.

## А.7. Перевірка маси состава по довжині приймально-відправних колій

Довжина поїзда  $l_{\Pi}$  не повинна перевищувати довжину приймально-відправних колій  $l_{\Pi} = 1550$  м.

Довжину поїзда визначаємо за формулою:

$$l_{\Pi} = 20 \cdot m_8 + 17 \cdot m_6 + 15 \cdot m_4 + l_{\text{л}} + 10, \quad (\text{A.20})$$

де  $m_8, m_6, m_4$  – кількість вагонів 8-вісних, 6-вісних та 4-вісних відповідно;

$l_{\text{л}}$  – довжина локомотива, м;  $l_{\text{л}}^{2\text{ЕЛ5К}} = 35$  м;  $l_{\text{л}}^{\text{ВЛ80}^{\text{T}}} = 33$  м;

10 – допуск на установку поїзда, м.

Кількість вагонів визначаємо за формулою:

$$m_4 = \frac{\alpha \cdot Q}{q_{04}}; \quad (\text{A.21})$$

Кількість вагонів состава для електровоза ВЛ80<sup>T</sup>

$$m_4^{\text{ВЛ80}^{\text{T}}} = \frac{1 \cdot 7200}{84} = 85,7;$$

приймаємо  $m_4^{\text{ВЛ80}^{\text{T}}} = 86$  вагонів.

Кількість вагонів состава для електровоза 2ЕЛ5К

$$m_4^{2\text{ЕЛ5К}} = \frac{1 \cdot 7500}{84} = 89,3;$$

приймаємо  $m_4^{2\text{ЕЛ5К}} = 90$  вагонів.

Тоді довжини поїздів

$$l_{\Pi}^{\text{ВЛ80}^{\text{T}}} = 20 \cdot 0 + 17 \cdot 0 + 15 \cdot 86 + 33 + 10 = 1333 \text{ м};$$

$$l_{\Pi}^{2\text{ЕЛ5К}} = 20 \cdot 0 + 17 \cdot 0 + 15 \cdot 90 + 35 + 10 = 1395 \text{ м}.$$

Довжини поїздів менше довжини приймально-відправних колії 1550 м, отже, перевірка виконана.

## А.8. Побудова діаграми питомих рівнодіючих сил

Для побудови діаграми питомих рівнодіючих сил попередньо складається таблиця за формою приведеною нижче для трьох режимів ведення поїзда по прямій горизонтальній ділянці:

а) для режиму тяги  $f_d - \omega_0 = f_1(V)$ ;

б) для режиму холостого ходу  $\omega_{0x} = f_2(V)$ ;

в) для режиму гальмування:

– у разі службового регульовального гальмування

$$\omega_{0x} + 0,5b_r = f_3(V),$$

– у разі екстреного гальмування  $\omega_{0x} + b_r = f_4(V)$ .

Приведемо розрахунок для швидкості 10 км/год для електровоза ВЛ80<sup>Т</sup>.

Основний питомий опір локомотива визначається за формулою (А7)

$$\omega'_0 = 1,9 + 0,01 \cdot 10 + 0,0003 \cdot 10^2 = 2,03 \text{ Н/кН}.$$

Повний опір локомотива визначається за формулою:

$$W'_0 = \omega'_0 P g, \quad (\text{А.22})$$

$$W'_0{}^{\text{ВЛ80}^{\text{Т}}} = 2,03 \cdot 190 \cdot 9,81 = 3784 \text{ Н};$$

$$W'_0{}^{\text{2ЕЛ5К}} = 2,03 \cdot 192 \cdot 9,81 = 3824 \text{ Н}.$$

Основний питомий опір 4-вісних вагонів на підшипниках кочення визначається за формулою (А.10):

$$\omega''_{04\text{коч}} = 0,7 + \frac{3 + 0,1 \cdot 10 + 0,0025 \cdot 10^2}{21} = 0,9 \text{ Н/кН}.$$

Основний питомий опір вагонів визначається за формулою (А.8)

$$\omega_0'' = 1 \cdot 0,9 = 0,9 \text{ Н/кН.}$$

Основний опір вагонів визначається за формулою:

$$W_0'' = \omega_0'' Q g, \quad (\text{A.23})$$

$$W_0''^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = 0,9 \cdot 7200 \cdot 9,81 = 63569 \text{ Н;}$$

$$W_0''^{2\text{ЕЛ5К}} = 0,9 \cdot 7500 \cdot 9,81 = 66218 \text{ Н.}$$

Повний основний опір поїзда визначається за формулою:

$$W_0 = W_0' + W_0'', \quad (\text{A.24})$$

$$W_0^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = 3784 + 63569 = 67353 \text{ Н;}$$

$$W_0^{2\text{ЕЛ5К}} = 3824 + 66218 = 70042 \text{ Н.}$$

Прискорююче зусилля

$$F_{\text{д}}^{\text{ВЛ80}^\Gamma} - W_0^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = 585265 - 67353 = 517912 \text{ Н;}$$

$$F_{\text{д}}^{2\text{ЕЛ5К}} - W_0^{2\text{ЕЛ5К}} = 625000 - 70042 = 554958 \text{ Н.}$$

Питоме прискорююче зусилля визначається за формулою:

$$f_{\text{д}} - \omega_0 = \frac{F_{\text{д}} - W_0}{(P + Q) \cdot g}, \quad (\text{A.25})$$

$$f_{\text{д}}^{\text{ВЛ80}^\Gamma} - \omega_0^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = \frac{517912}{(190 + 7200) \cdot 9,81} = 7,14 \text{ Н/кН;}$$

$$f_{\text{д}}^{2\text{ЕЛ5К}} - \omega_0^{2\text{ЕЛ5К}} = \frac{554958}{(192 + 7500) \cdot 9,81} = 7,35 \text{ Н/кН.}$$

Основний питомий опір локомотива на холостому ході

$$\omega_x = 2,4 + 0,01 \cdot V + 0,00035 \cdot V^2; \quad (\text{A.26})$$

$$\omega_x = 2,4 + 0,01 \cdot 10 + 0,00035 \cdot 10^2 = 2,55 \text{ Н/кН}.$$

Опір локомотива на холостому ході

$$W_x = \omega_x P g, \quad (\text{A.27})$$

$$W_x^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = 2,55 \cdot 190 \cdot 9,81 = 4753 \text{ Н};$$

$$W_x^{2\text{ЕЛ5К}} = 2,55 \cdot 192 \cdot 9,81 = 4803 \text{ Н}.$$

Опір поїзда на холостому ході

$$W_x^{\text{ВЛ80}^\Gamma} + W_0''^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = 4753 + 63569 = 68322 \text{ Н};$$

$$W_x^{2\text{ЕЛ5К}} + W_0''^{2\text{ЕЛ5К}} = 4803 + 66218 = 71021 \text{ Н}.$$

Основний питомий опір поїзда на холостому ході

$$\omega_{0x} = \frac{W_x + W_0''}{(P + Q) \cdot g}, \quad (\text{A.28})$$

$$\omega_{0x}^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = \frac{68322}{(190 + 7200) \cdot 9,81} = 0,94 \text{ Н};$$

$$\omega_{0x}^{2\text{ЕЛ5К}} = \frac{71021}{(192 + 7500) \cdot 9,81} = 0,94 \text{ Н}.$$

Питомі гальмові сили поїзда визначаються за формулою:

$$b_\Gamma = 1000 \varphi_{\text{кр}} \vartheta_p, \quad (\text{A.29})$$

де  $\varphi_{\text{кр}}$  – розрахунковий коефіцієнт тертя колодок о колесо у разі

чавунних колодок.

$$\varphi_{кр} = 0,27 \frac{V + 100}{5V + 100}, \quad (\text{A.30})$$

$$\varphi_{кр} = 0,27 \frac{10 + 100}{5 \cdot 10 + 100} = 0,198;$$

$\vartheta_p$  – розрахунковий гальмівний коефіцієнт состава.

$$\vartheta_p = \frac{\sigma(k_{p4}n_4 + k_{p6}n_6 + k_{p8}n_8)}{Qg}, \quad (\text{A.31})$$

де  $n_4, n_6, n_8$  – число осей відповідно в групах 4-, 6- та 8-вісних вагонів состава:

$$n_4^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = 4m_4 = 4 \cdot 86 = 344;$$

$$n_4^{2\text{ЕЛ5К}} = 4m_4 = 4 \cdot 90 = 360;$$

$k_{p4}, k_{p6}, k_{p8}$  – розрахункові сили натискання гальмівних колодок відповідно на вісь 4-, 6- та 8-вісного вагона (при чавунних колодках  $k_p = 68,5$  кН/вісь);

$\sigma$  – частка гальмівних осей у составі.

$$\vartheta_p^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = \frac{1(68,5 \cdot 344 + 68,5 \cdot 0 + 68,5 \cdot 0)}{7200 \cdot 9,81} = 0,334 \text{ Н/кН};$$

$$\vartheta_p^{2\text{ЕЛ5К}} = \frac{1(68,5 \cdot 360 + 68,5 \cdot 0 + 68,5 \cdot 0)}{7500 \cdot 9,81} = 0,335 \text{ Н/кН};$$

$$b_r^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = 1000 \cdot 0,198 \cdot 0,334 = 66,1 \text{ Н/кН};$$

$$b_r^{2\text{ЕЛ5К}} = 1000 \cdot 0,198 \cdot 0,335 = 66,4 \text{ Н/кН}.$$

Питома гальмівна сила у разі службового регулювального гальмування



$$\omega_{0x}^{\text{ВЛ80}^\Gamma} + 0,5 \cdot b_{\Gamma}^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = 0,94 + 0,5 \cdot 66,1 = 34 \text{ Н/кН};$$

$$\omega_{0x}^{2\text{ЕЛ5К}} + 0,5 \cdot b_{\Gamma}^{2\text{ЕЛ5К}} = 0,94 + 0,5 \cdot 66,4 = 34,1 \text{ Н/кН}.$$

Питома гальмівна сила у разі екстреного гальмування

$$\omega_{0x}^{\text{ВЛ80}^\Gamma} + b_{\Gamma}^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = 0,94 + 66,1 = 67,04 \text{ Н/кН};$$

$$\omega_{0x}^{2\text{ЕЛ5К}} + b_{\Gamma}^{2\text{ЕЛ5К}} = 0,94 + 66,4 = 67,34 \text{ Н/кН}.$$

Результати розрахунку питомих рівнодіючих сил наведено в табл. А.4 та А.5. За результатами розрахунку будується діаграму питомих прискорюючих зусиль, що наведена на рис. А.3.

### А.9. Вирішення гальмівної задачі

Перед тим, як будувати криві швидкості та часу ходу поїзда по ділянці, необхідно розв'язати гальмівну задачу, яка полягає в визначенні максимально допустимих швидкостей руху поїзда по елементах за заданих гальмівних засобах та прийнятому гальмівному шляху. Ця задача розв'язується графічним способом (рис. А.4, А.5).

Повний (розрахунковий) гальмівний шлях визначається за формулою:

$$S_{\Gamma} = S_{\Pi} + S_{\text{д}}, \quad (\text{А.32})$$

де  $S_{\Pi}$  – шлях підготовки гальм до дії, протягом якого гальма поїзда умовно приймаються недіючими (від моменту встановлення ручки крана машиніста в гальмівне положення до включення гальм поїзда), м;

$S_{\text{д}}$  – дійсний гальмівний шлях, на протягом якого поїзд рухається з діючими в повну силу гальмами, м.

Результати розрахунку питомих рівнодіючих сил для состава масою 7200 т та електровоза ВЛ80<sup>Т</sup>

V, км/год	Режим																
	ТЯГИ							ХОЛОСТОГО ХОДУ							ГАЛЬМУВАННЯ		
	$F_d, Н$	$\omega'_0, Н/кН$	$W'_0, Н$	$\omega''_0, Н/кН$	$W''_0, Н$	$W_0, Н$	$F_d - W_0, Н$	$f_d - \omega_0, Н/кН$	$\omega_x, Н/кН$	$W_x, Н$	$W_x + W''_0, Н$	$\omega_{0x}, Н/кН$	$\varphi_{кр}$	$b_T, Н/кН$	$\omega_{0x} + 0,5b_T, Н/кН$	$\omega_{0x} + b_T, Н/кН$	
0	649422	2,03	3784	0,90	63569	67353	582069	8,03	2,55	4753	68322	0,94	0,27	90,1	46	91,04	
10	585265	2,03	3784	0,90	63569	67353	517912	7,14	2,55	4753	68322	0,94	0,198	66,1	34	67,04	
20	548938	2,22	4138	0,99	69926	74064	474874	6,55	2,76	5144	75070	1,04	0,162	54	28	55,04	
30	525512	2,47	4604	1,09	76989	81593	443919	6,12	3,05	5685	82674	1,14	0,14	46,7	24,5	47,84	
40	508570	2,78	5182	1,22	86171	91353	417217	5,76	3,4	6337	92508	1,28	0,126	42	22,3	43,28	
43,5	502272	2,9	5405	1,28	90409	95814	406458	5,61	3,54	6598	97007	1,34	0,122	40,7	21,7	42,04	
50	490951	3,15	5871	1,38	97472	103343	387608	5,35	3,83	7139	104611	1,44	0,116	38,7	20,8	40,14	
56,5	481181	3,42	6375	1,49	105242	111617	369564	5,1	4,14	7717	112959	1,56	0,11	36,7	19,9	38,26	
60	423792	3,58	6673	1,56	110186	116859	306933	4,23	4,32	8052	118238	1,63	0,108	36	19,6	37,63	
70	296262	4,07	7586	1,76	124312	131898	164364	2,27	4,89	9114	133426	1,84	0,102	34	18,8	35,84	
80	217782	4,62	8611	1,99	140558	149169	68613	0,95	5,52	10289	150847	2,08	0,097	32,4	18,3	34,48	
90	169713	5,23	9748	2,24	158216	167964	1749	0,02	6,23	11612	169828	2,34	0,093	31,03	17,9	33,37	
100	134397	5,9	10997	2,51	177286	188283	-53886	-0,74	7	13047	190333	2,63	0,09	30	17,6	32,63	
110	105948	6,63	12358	2,81	198476	210834	-104886	-1,45	7,85	14632	213108	2,94	0,087	29	17,4	31,94	

Результати розрахунку питомих рівнодіючих сил для состава масою 7500 т та електровоза 2ЕЛ5К

$V$ , км/год	Режим																
	ТЯГИ							ХОЛОСТОГО ХОДУ							ГАЛЬМУВАННЯ		
	$F_d$ , Н	$\omega'_0$ , Н/кН	$W'_0$ , Н	$\omega''_0$ , Н/кН	$W''_0$ , Н	$W_0$ , Н	$F_d - W_0$ , Н	$f_d - \omega_0$ , Н/кН	$\omega_x$ , Н/кН	$W_x$ , Н	$W_x + W''_0$ , Н	$\omega_{0x}$ , Н/кН	$\varphi_{кр}$	$b_r$ , Н/кН	$\omega_{0x} + 0,5b_r$ , Н/кН	$\omega_{0x} + b_r$ , Н/кН	
0	725000	2,03	3824	0,90	66218	70042	654958	8,68	2,55	4803	71021	0,94	0,27	90,5	46,2	91,44	
10	625000	2,03	3824	0,90	66218	70042	554958	7,35	2,55	4803	71021	0,94	0,198	66,4	34,1	67,34	
20	592500	2,22	4181	0,99	72839	77020	515480	6,83	2,76	5199	78038	1,03	0,162	54,3	28,2	55,33	
30	568000	2,47	4652	1,09	80197	84849	483151	6,4	3,05	5745	85942	1,14	0,14	46,9	24,6	48,04	
40	550000	2,78	5236	1,22	89762	94998	455002	6,03	3,4	6404	96166	1,27	0,126	42,2	22,4	43,47	
50	534000	3,15	5933	1,38	101534	107467	426533	5,65	3,83	7214	108748	1,44	0,116	38,9	20,9	40,34	
51	531000	3,19	6008	1,40	103005	109013	421987	5,59	3,87	7289	110294	1,46	0,115	38,5	20,7	39,96	
58,5	520000	3,51	6611	1,53	112570	119181	400819	5,31	4,24	7986	120556	1,6	0,109	36,5	19,9	38,1	
60	500000	3,58	6743	1,56	114777	121520	378480	5,02	4,32	8137	122914	1,63	0,108	36,2	19,7	37,83	
70	362000	4,07	7666	1,76	129492	137158	224842	2,98	4,89	9210	138702	1,84	0,102	34,2	18,9	36,04	
80	275000	4,62	8702	1,99	146414	155116	119884	1,59	5,52	10397	156811	2,08	0,097	32,5	18,3	34,58	
90	212000	5,23	9851	2,24	164808	174659	37341	0,49	6,23	11734	176542	2,34	0,093	31,2	17,9	33,54	
100	175000	5,9	11113	2,51	184673	195786	-20786	-0,28	7	13185	197858	2,62	0,09	30,2	17,7	32,82	
110	150000	6,63	12488	2,81	206746	219234	-69234	-0,92	7,85	14786	221532	2,94	0,087	29,2	17,5	32,14	

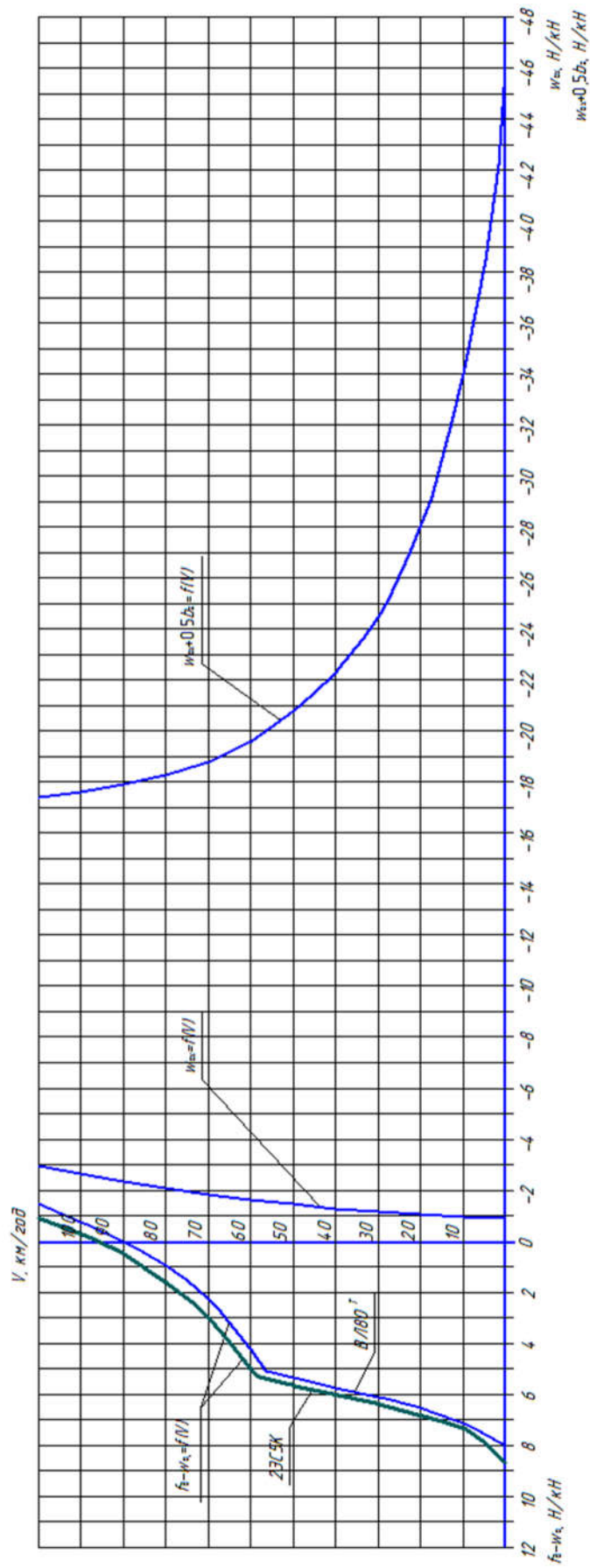


Рис. А.3. Диаграмма питомих прискорюючих зусиль

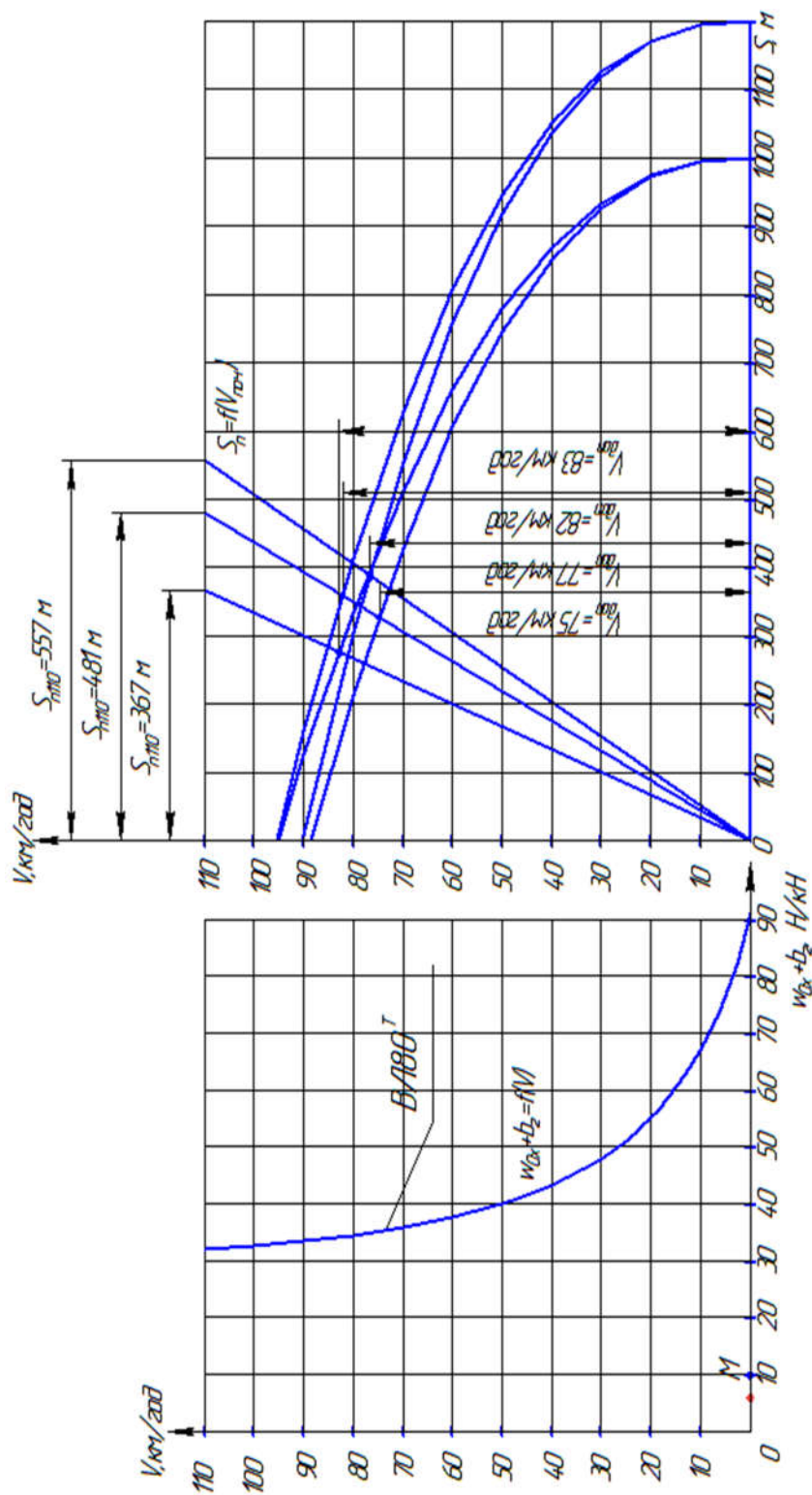


Рис. А.4. Розв'язання гальмівної задачі для електровоза ВЛ80Т

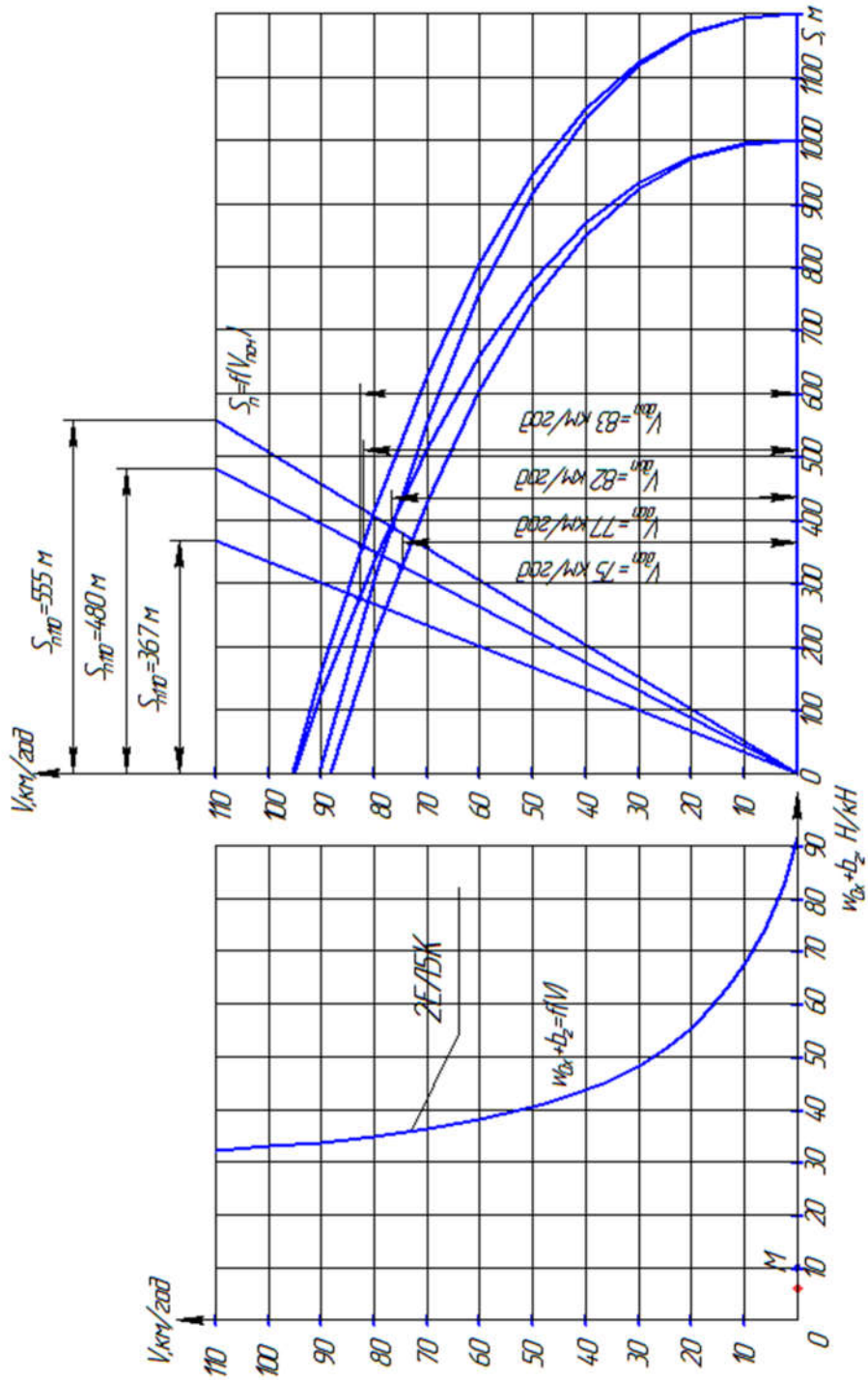


Рис. А.5. Розв'язання гальмівної задачі для електровоза 2ЕЛ15К

Рівність (А.32) дозволяє знайти допустиму швидкість як величину, що відповідає точці перетину графічних залежностей підготовчого шляху  $S_{\text{п}}$  і дійсного гальмівного шляху  $S_{\text{д}}$  від швидкості руху поїзда в режимі гальмування.

За даними розрахункової таблиці питомих рівнодіючих сил будуються по точках залежність питомих сповільнюючих сил у разі екстреного гальмування від швидкості  $\omega_{\text{x}} + b_{\text{r}} = f(V)$ , а поруч, справа, встановлюється у відповідних масштабах система координат  $V - S$  (див. рис. А.4, А.5).

Осі швидкостей  $V$  в обох системах координат встановлюються паралельно, а осі питомих сил  $(\omega_{\text{x}} + b_{\text{r}})$  і шляху  $S$  – на одній прямій. Масштаби для графічних побудов при гальмівних розрахунках відповідають рекомендаціям ПТР.

На цей же графік наноситься залежність підготовчого гальмівного шляху від швидкості

$$S_{\text{п}} = 0,278V_{\text{поч}}t_{\text{п}}, \quad (\text{А.33})$$

де  $V_{\text{поч}}$  – швидкість на початку гальмування, км/год;

$t_{\text{п}}$  – час підготовки гальм до дії, с; цей час для автогальм вантажного типу рівний для поїзда довжиною більше 300 осей:

$$t_{\text{п}} = 12 - \frac{18i_{\text{r}}}{b_{\text{r}}}, \quad (\text{А.34})$$

де  $i_{\text{r}}$  – крутизна ухилу, для якого розв'язується гальмівна задача (для спусків зі знаком мінус), ‰;

$b_{\text{r}}$  – питома гальмівна сила за початкову швидкість гальмування.

Результати розв'язання гальмівної задачі враховуються під час побудови кривої швидкості руху поїзда  $V = f(S)$  з тим, щоб ніде не перевищити швидкості, яка допускається по гальмах, тобто щоб поїзд міг бути завжди зупинений на відстані, яка не перевищує довжини повного гальмівного шляху.

Розрахунки проводяться для найкрутішого спуску на ділянці  $i_{\text{r}} = -10$  ‰ та для  $i_{\text{r}} = -6$  ‰ та  $i_{\text{r}} = 0$  ‰.

Приймаємо швидкість на початку гальмування  $V_{\text{поч}}$  для електро-  
возів ВЛ80<sup>Т</sup> та 2ЕЛ5К рівною 110 км/год.

Час підготовки гальм до дії  $t_{\text{п}}$ :

– для ухилу –10 ‰:

$$t_{\text{п}}^{\text{ВЛ80}^{\text{T}}} = 12 - \frac{18 \cdot (-10)}{29} = 18,21 \text{ с};$$

$$t_{\text{п}}^{\text{2ЕЛ5К}} = 12 - \frac{18 \cdot (-10)}{29,2} = 18,16 \text{ с};$$

– для ухилу – 6 ‰

$$t_{\text{п}}^{\text{ВЛ80}^{\text{T}}} = 12 - \frac{18 \cdot (-6)}{29} = 15,72 \text{ с};$$

$$t_{\text{п}}^{\text{2ЕЛ5К}} = 12 - \frac{15 \cdot (-6)}{29,2} = 15,7 \text{ с};$$

– для 0 ‰

$$t_{\text{п}}^{\text{ВЛ80}^{\text{T}}} = 12 - \frac{18 \cdot 0}{29} = 12 \text{ с};$$

$$t_{\text{п}}^{\text{2ЕЛ5К}} = 12 - \frac{18 \cdot 0}{29,2} = 12 \text{ с}.$$

Довжина підготовчого шляху  $S_{\text{п}}$ :

– для ухилу –10 ‰

$$S_{\text{п}}^{\text{ВЛ80}^{\text{T}}} = 0,278 \cdot 110 \cdot 18,72 = 557 \text{ м};$$

$$S_{\text{п}}^{\text{2ЕЛ5К}} = 0,278 \cdot 110 \cdot 18,16 = 555 \text{ м};$$

– для ухилу – 6 ‰

$$S_{\text{п}}^{\text{ВЛ80}^{\text{T}}} = 0,278 \cdot 110 \cdot 15,72 = 481 \text{ м};$$



$$S_{\Pi}^{2\text{ЕЛ5К}} = 0,278 \cdot 110 \cdot 15,7 = 480 \text{ м};$$

– для 0‰

$$S_{\Pi}^{\text{ВЛ80}^T} = 0,278 \cdot 110 \cdot 12 = 367 \text{ м};$$

$$S_{\Pi}^{2\text{ЕЛ5К}} = 0,278 \cdot 110 \cdot 10 = 306 \text{ м}.$$

Графічне розв'язування гальмівної задачі зображено на рис. А.4., А.5. Зведені результати розв'язку гальмівної задачі наведені у табл. А.6.

Таблиця А.6

#### Зведені результати розв'язку гальмівної задачі

Ухил $i$ , ‰	Допустимий гальмівний шлях $S_{\Gamma}$ , м	Значення $V_{\text{доп}}$ для електровоза серії	
		ВЛ80 <sup>T</sup>	2ЕЛ5К
0	1000	83	83
– 6	1000	75	75
– 6	1200	82	82
– 10	1200	77	77

У результаті графічного розв'язку гальмівної задачі побудовано графік рис. А.6, за яким можна визначити допустиму швидкість руху поїзда по усіх спусках ділянки.

#### А.10. Побудова кривих швидкості та часу ходу поїзда

Побудова кривих виконується методом А.І. Ліпеца вперше опрацьованим та прийнятим Міністерством шляхів сполучення.

У відповідності з ПТР поїзд розглядається як матеріальна точка, в якій зосереджена вся маса та до якої прикладені зовнішні сили, діючи на реальний об'єкт. Умовно приймається, що ця матеріальна точка розташована в середині поїзда.

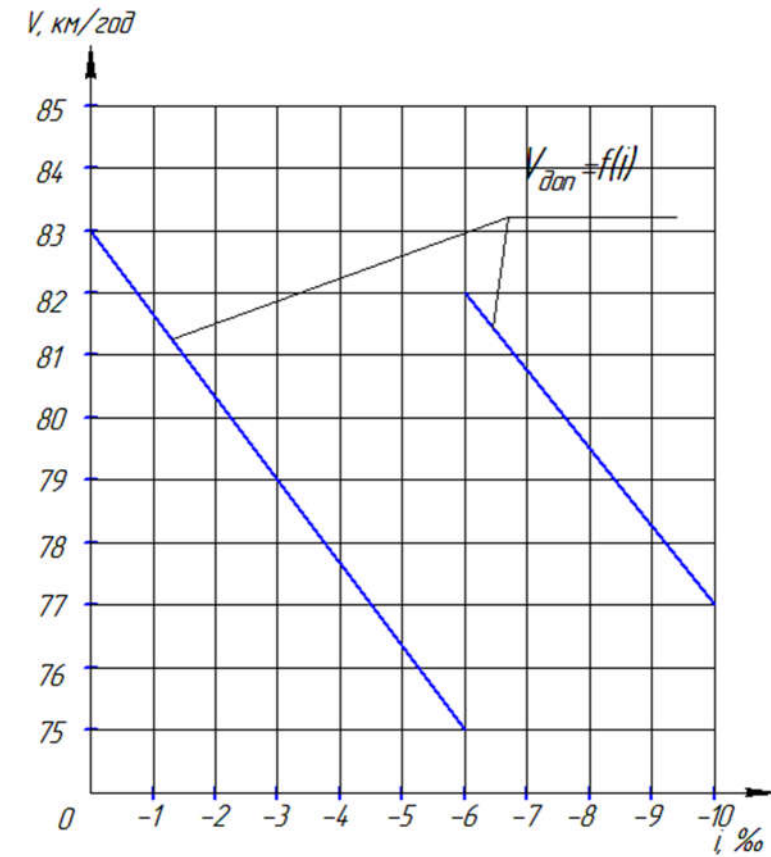


Рис. А.6 Графік залежності допустимої швидкості від величини ухилу

Швидкість поїзда по вхідних стрілках станції не повинна перевищувати 50 км/год внаслідок можливого прийому поїзда на бокову колію для схрещування або обгону.

Обмеження по швидкості обирається як найменшу швидкість з обмежень: конструкційної швидкості вагонів, конструкційної швидкості локомотива, найбільшої допустимої швидкості поїзда по міцності верхньої будови колії, найбільшої допустимої швидкості поїзда по гальмівних засобах поїзда.

Побудова кривих швидкості та часу є результатом графічного інтегрування рівняння руху поїзда, і здійснюється за допомогою діаграм питомих рівнодіючих сил. Крива швидкості будується аналогічно рішення гальмової задачі. Крива часу будується, на базі кривої швидкості та допоміжної осі часу, проведений лівіше від осі початку руху на 30 мм. Для кожного швидкісного інтервалу визначається середня швидкість, потім з попередньої точки кривої часу відкладається перпендикуляр до прямої, що з'єднує точку нуля на осі початку руху та середньої швидкості на осі часу. У разі досягнення кривої часу 10 хв умовно

опускається крапка до нульової оцінки часу та продовжується побудова.

По кривій швидкості за допомогою токової характеристики локомотива будується крива струму. Криви швидкості та часу ходу представлені на рис. А.7 та А.8.

### А.11. Визначення витрат енергоресурсів локомотивами

Витрати електроенергії на переміщення поїзда ділянкою у кВт·год визначаються за формулою:

$$A' = \frac{U_e \sum (I_{da\ cep} \cdot \Delta t)}{60 \cdot 1000}, \quad (A.35)$$

де  $U_e$  – напруга в контактній мережі;  $U_e = 25000$  В;

$I_{da\ cep}$  – середнє значення активного струму для відрізка кривої

$I_{da} = f(S)$  між сусідніми точками перелому кривої, А;

$\Delta t$  – відповідний проміжок часу, який визначається по кривій  $t = f(S)$ , хв.

Розрахунки наведено в табл. А.7 та А.8.

Таблиця А.7

Витрати електроенергії електровозом ВЛ80Г

Номер ділянки	$V_{cep}$ , км/год	$I_{da\ cep}$ , А	$\Delta t$ , хв	$I_{da\ cep} \cdot \Delta t$ , А·хв
1	2	3	4	5
0–1	5	73	0,66	48,18
1–2	15	126	0,74	93,24
2–3	25	178	0,79	140,62
3–4	35	231	0,84	194,04
4–5	40,75	262	0,15	39,3
5–6	45,75	288	0,34	97,92
9–10	35	231	1,16	267,96
10–11	43	273	0,74	202,02
11–12	51	316	1,4	442,4

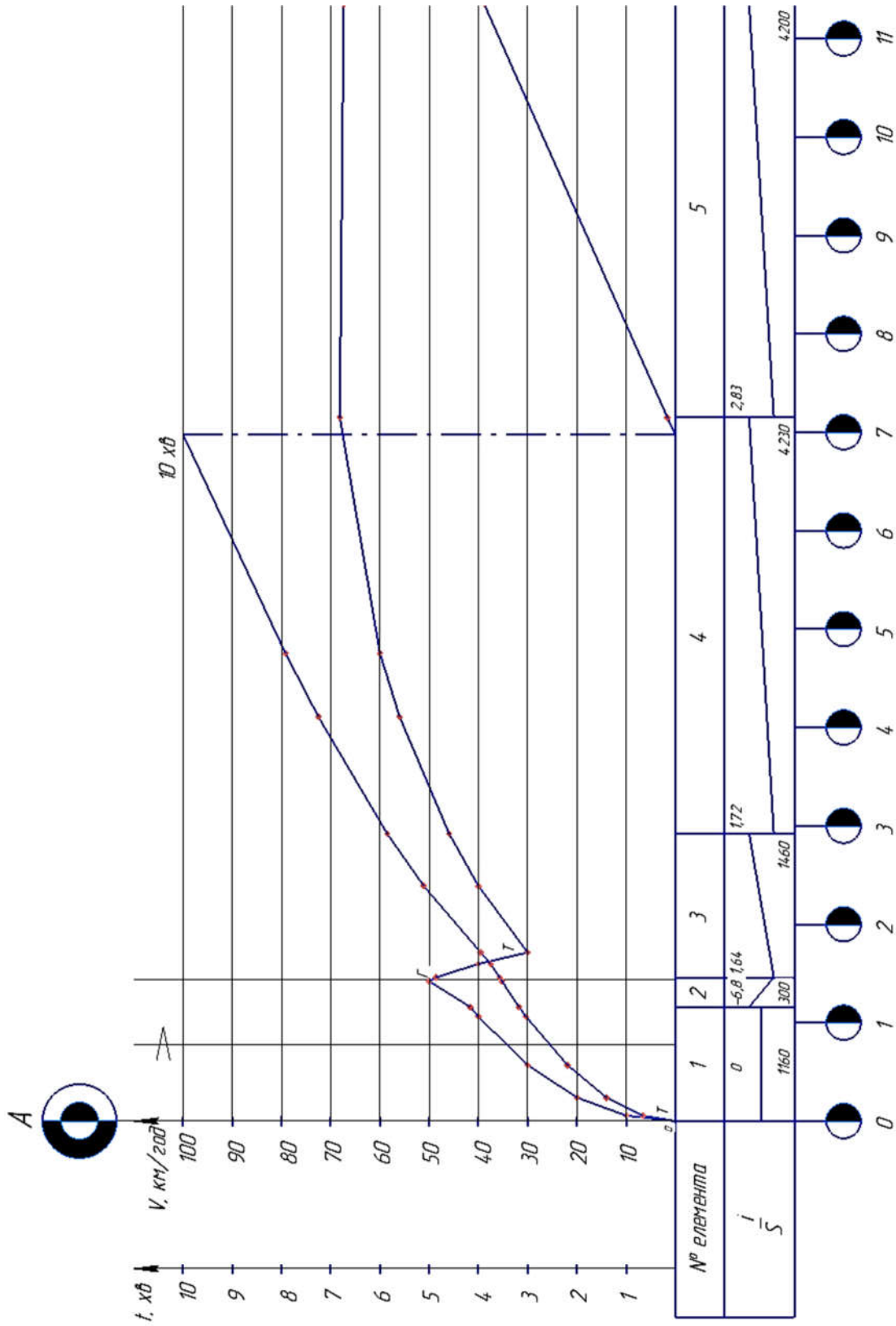
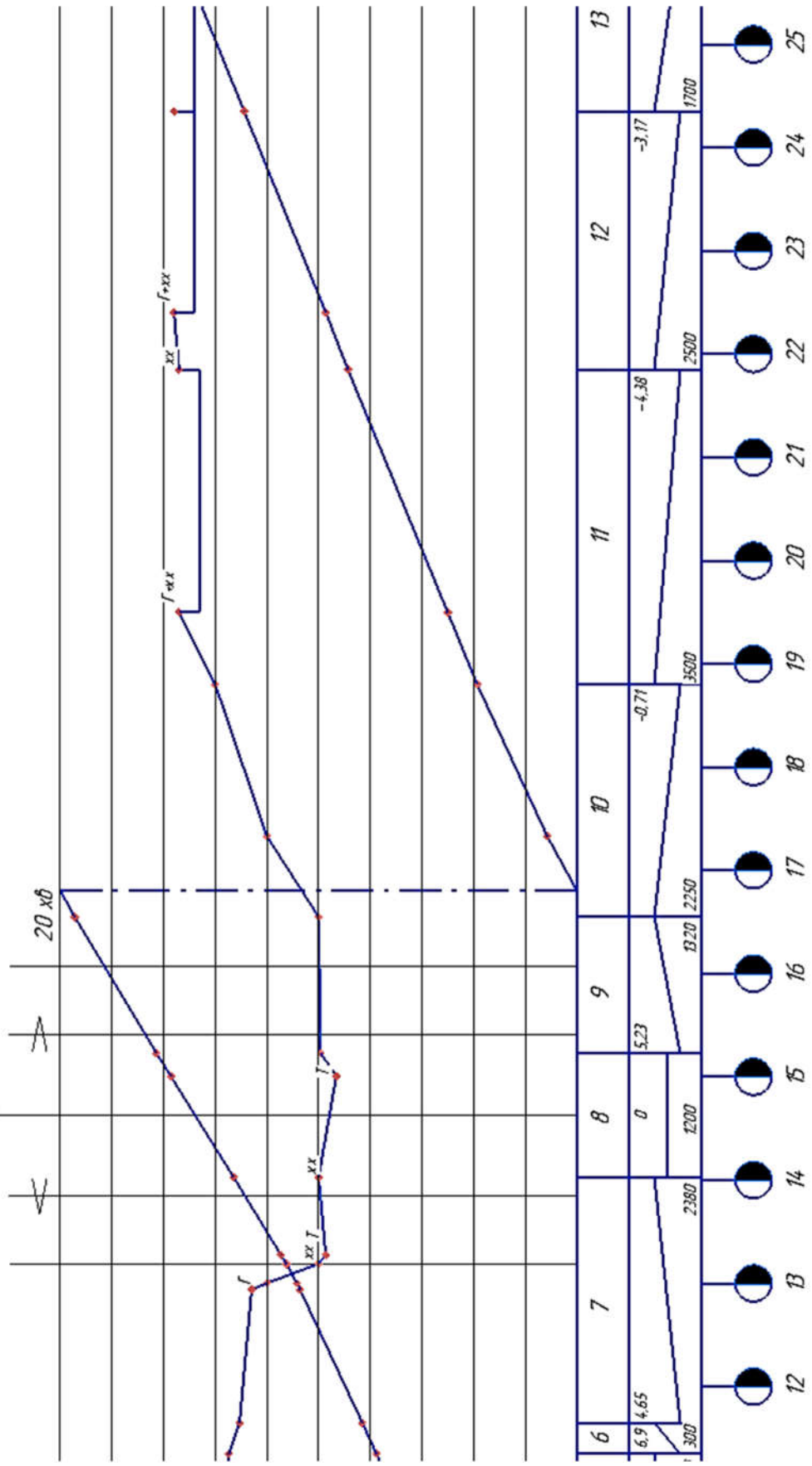
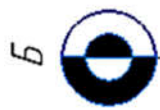
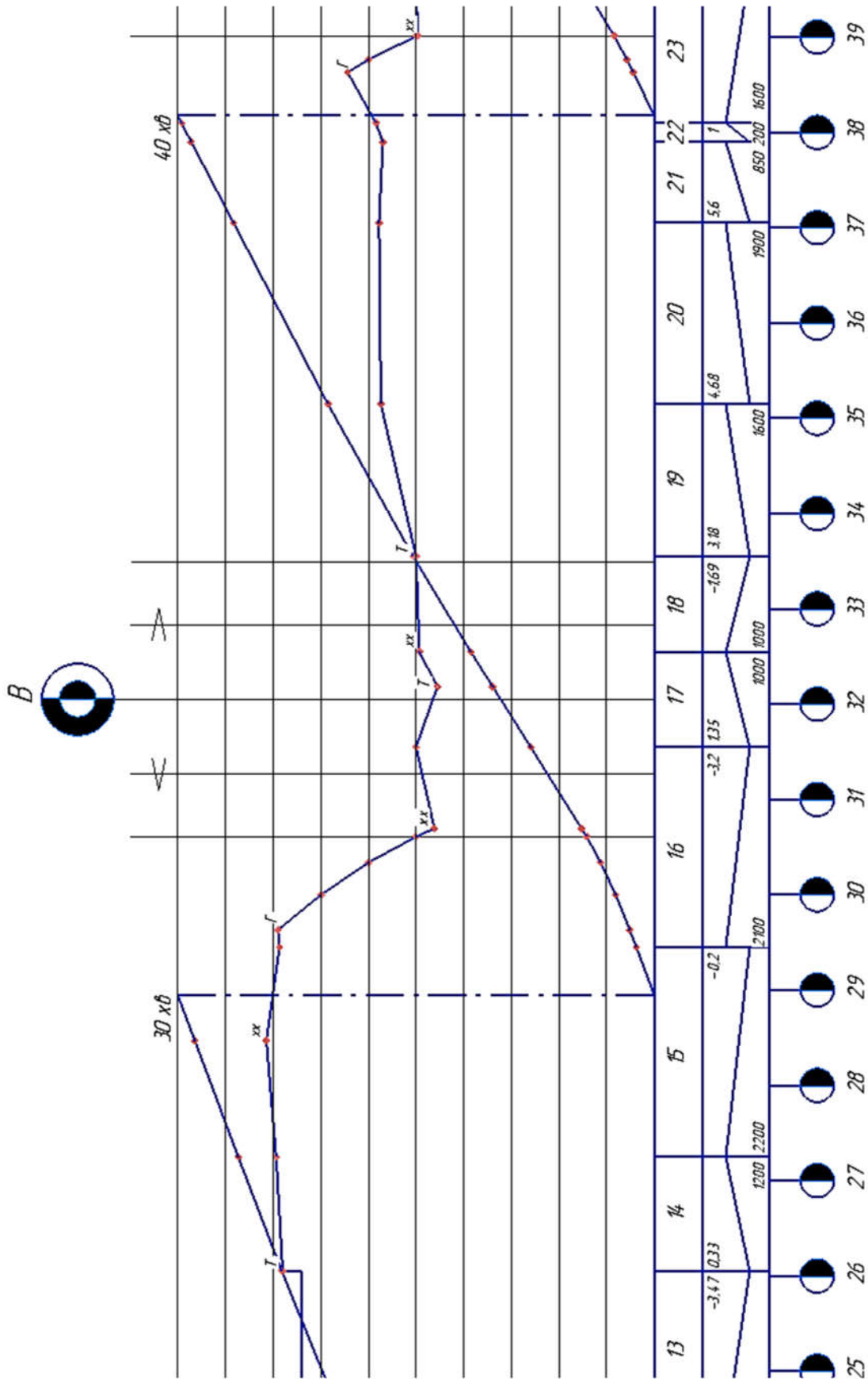
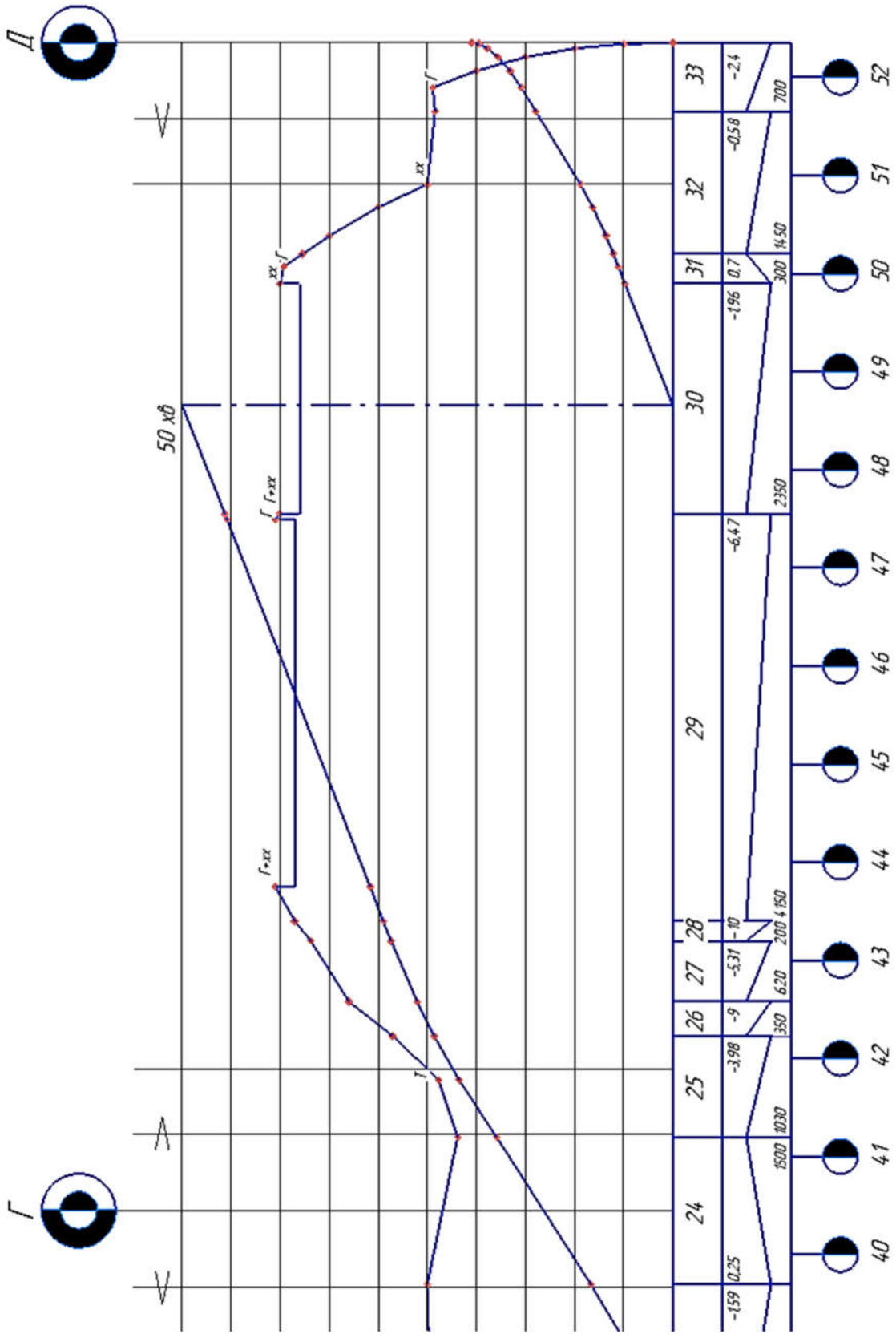


Рис. А.7. Криві швидкості та часу ходу для електровоза ВЛ80<sup>Г</sup> та маси состава 7200 т







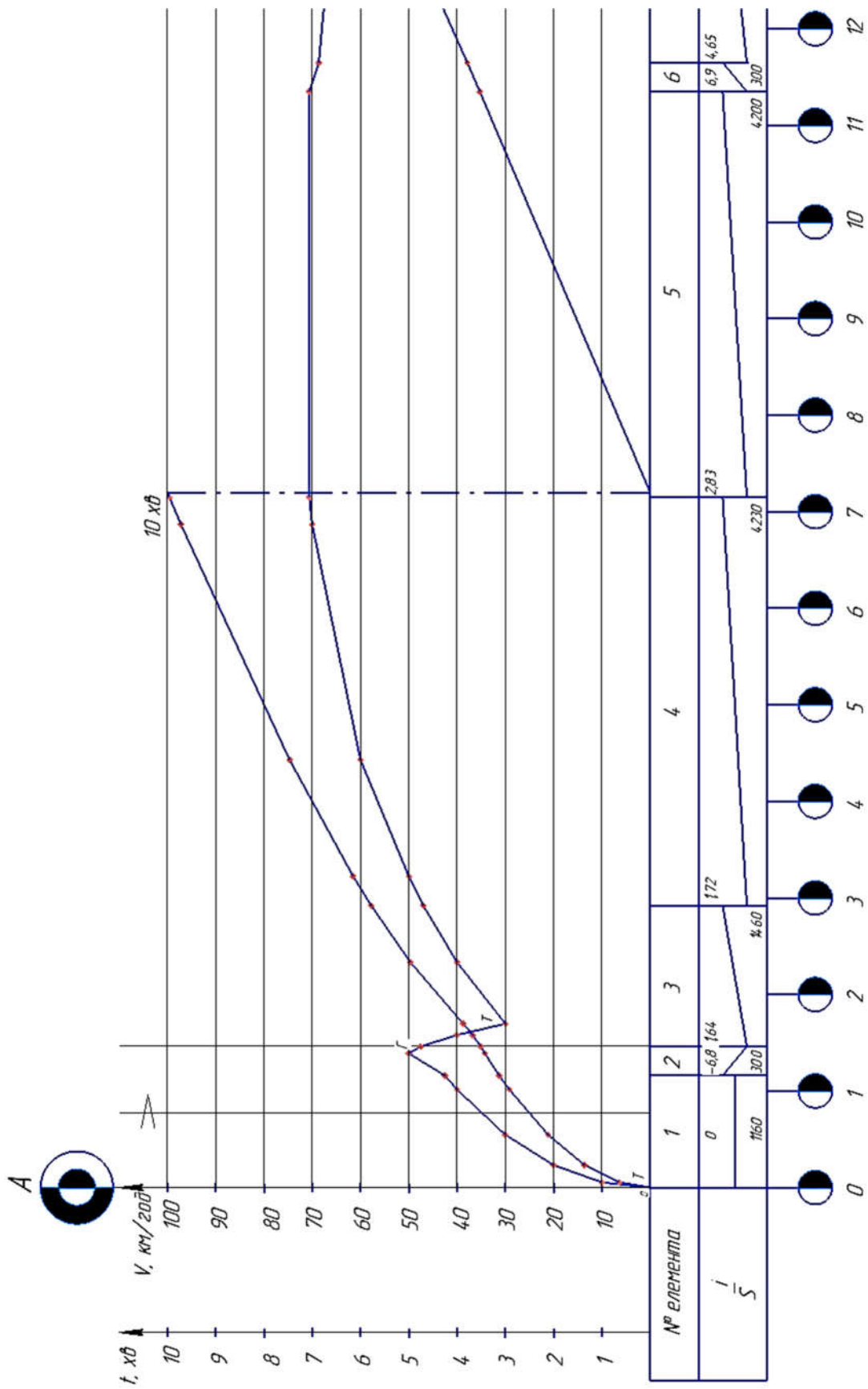
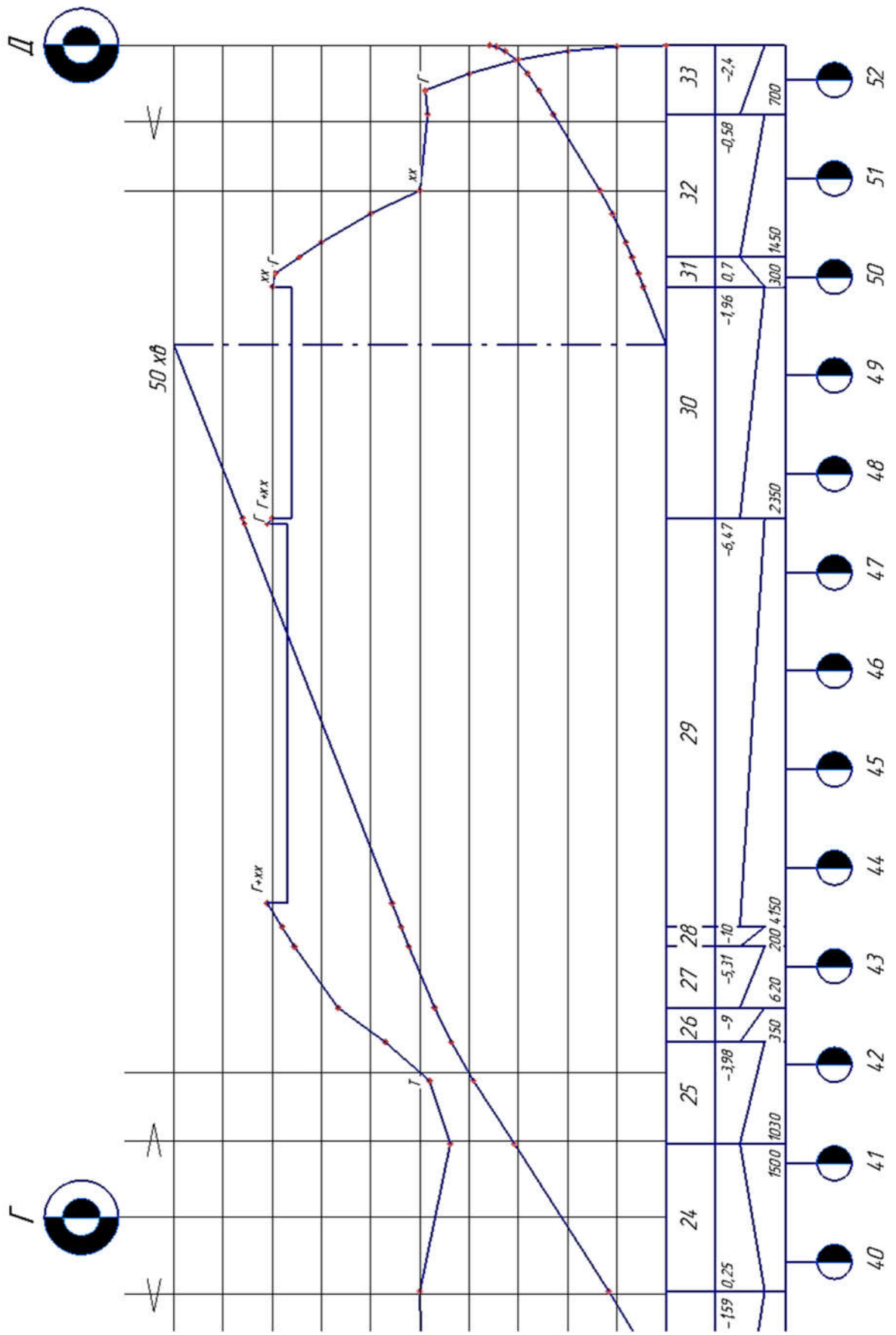


Рис. А.8. Криві швидкості та часу ходу для електровоза 2ЕЛ5К та маси состава 7500 т









Закінчення табл. А.7

1	2	3	4	5
12-13	58	353	0,67	236,51
13-14	64	326	2,24	730,24
14-15	67,75	302	3,72	1123,44
15-16	66,25	311	0,27	83,97
16-17	64	326	1,21	394,46
20-21	49,25	306	0,92	281,52
0-1	5	73	0,66	48,18
1-2	15	126	0,74	93,24
2-3	25	178	0,79	140,62
3-4	35	231	0,84	194,04
4-5	40,75	262	0,15	39,3
5-6	45,75	288	0,34	97,92
9-10	35	231	1,16	267,96
10-11	43	273	0,74	202,02
11-12	51	316	1,4	442,4
12-13	58	353	0,67	236,51
13-14	64	326	2,24	730,24
14-15	67,75	302	3,72	1123,44
15-16	66,25	311	0,27	83,97
16-17	64	326	1,21	394,46
20-21	49,25	306	0,92	281,52
22-23	48	300	0,28	84
23-24	49,75	309	1,58	488,22
24-25	55	337	0,85	286,45
25-26	65	319	1,36	433,84
26-27	73,5	273	0,57	155,61
31-32	78,75	252	0,91	229,32
32-33	80,5	246	0,91	223,86
41-42	47,5	297	0,46	136,62
43-44	53,75	330	1,79	590,7
44-45	57,75	351	1,98	694,98
45-46	57,5	350	0,89	311,5
46-47	57,75	351	0,21	73,71
47-48	61,5	343	0,51	174,93
54-55	52,25	322	0,52	167,44
55-56	61,5	343	0,33	113,19
56-57	70	290	0,54	156,6
57-58	75,5	265	0,16	42,4
58-59	79	251	0,27	67,77
Усього				8807

## Витрати електроенергії електровозом 2ЕЛ5К

Номер ділянки	$V_{\text{сеп}}$ , КМ/ГОД	$I_{\text{да сеп}}$ , А	$\Delta t$ , ХВ	$I_{\text{да сеп}} \cdot \Delta t$ , А·ХВ
0–1	5	73	0,65	47,45
1–2	15	126	0,71	89,46
2–3	25	178	0,75	133,5
3–4	35	231	0,81	187,11
4–5	41,25	264	0,21	55,44
5–6	46,25	291	0,29	84,39
9–10	35	231	1,09	251,79
10–11	43,5	276	0,81	223,56
11–12	48,5	302	0,37	111,74
12–13	55	337	1,32	444,84
13–14	65	319	2,25	717,75
14–15	70,25	289	0,24	69,36
15–16	70,5	287	3,57	1024,59
16–17	69,5	293	0,26	76,18
17–18	67,5	304	1,05	319,2
21–22	49	305	0,91	277,55
23–24	47,25	296	0,18	53,28
24–25	49,25	306	1,61	492,66
25–26	55	337	0,82	276,34
26–27	65	319	1,06	338,14
27–28	71	285	0,3	85,5
28–29	74,5	269	0,37	99,53
33–34	79	251	0,91	228,41
34–35	81	245	0,68	166,6
43–44	47,25	296	0,45	133,2
45–46	54	331	1,78	589,18
46–47	59	358	1,94	694,52
47–48	59,75	357	0,83	296,31
48–49	60,25	353	0,22	77,66
49–50	63,5	329	0,44	144,76
56–57	52,5	324	0,44	142,56
57–58	61,75	342	0,34	116,28
58–59	71	285	0,53	151,05
59–60	76,75	260	0,15	39
60–61	79,5	250	0,18	45
Усього				8283,9

$$A'^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = \frac{25000 \cdot 8807}{60 \cdot 1000} = 3669,6 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

$$A'^{\text{2ЕЛ5К}} = \frac{25000 \cdot 8283,9}{60 \cdot 1000} = 3451,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Витрати електроенергії електровозом змінного струму на власні потреби  $A''$  визначаються за формулою:

$$A'' = r \cdot t, \quad (\text{A.36})$$

де  $r$  – середня витрата електроенергії на власні потреби електровоза за одиницю часу, кВт·год/хв;

$t = t_1 + t_2$  – повний час роботи електровоза на ділянці, хв.

$$A''^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = r \cdot t = 5,5 \cdot 54,1 = 297,6 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

$$A''^{\text{2ЕЛ5К}} = r \cdot t = 3,33 \cdot 53,6 = 178,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Повна витрата електроенергії розраховується за формулою:

$$A = A' + A'', \quad (\text{A.37})$$

$$A^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = 3669,6 + 297,6 = 3967,2 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

$$A^{\text{2ЕЛ5К}} = 3451,6 + 178,5 = 3630,1 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Питома витрата електроенергії розраховується за формулою:

$$a = \frac{A \cdot 1000}{Q \cdot L}, \quad (\text{A.38})$$

де  $Q$  – маса состава, т;

$L$  – довжина ділянки, для якої виконується тяговий розрахунок, км.

$$a^{\text{ВЛ80}^\Gamma} = \frac{3967,2 \cdot 1000}{7200 \cdot 52,3} = 10,54 \text{ кВт} \cdot \text{год/ткм};$$

$$a^{2\text{ЕЛ5К}} = \frac{3630,1 \cdot 1000}{7500 \cdot 52,3} = 9,25 \text{ кВт} \cdot \text{год/ткм.}$$

У результаті розрахунків встановлено, що електровоз 2ЕЛ5К спроможний вести состав на 300 т важче ніж електровоз 2ЕЛ5К на заданій ділянці. Крім цього, виконано перевірки розрахункових мас поїздів на можливість подолання короткого підйому крутизною більше розрахункового, на зрушення з місця на роздільних пунктах та за довжиною приймально-відпраних колій. Побудована діаграма питомих рівнодійючих сил, на основі якої побудовані криві швидкості руху та часу ходу, а також визначені витрати електроенергії на тягу поїздів. Встановлено, що за рахунок використання електровоза 2ЕЛ5К можливо заощадити 218 кВт·год електроенергії на заданій ділянці. Скорочення питомої витрати електроенергії склало 1,29 кВт·год/ткм, або 12,2%.

## Визначення норми витрат палива на тягу поїздів і її коригування

### Б.1. Визначення вихідної (базової) норми витрат ПЕР

Нормою витрат електроенергії або палива на поїзну роботу є плановий показник витрат на виробництво одиниці транспортної продукції, який включає всі затрати, пов'язані з пересуванням поїзда, локомотива та його обслуговуванням в процесі работ із поїздом.

За вихідні (базові) норми витрат ПЕР на тягу поїздів приймаються питомі витрати електроенергії або палива локомотивів даної серії, визначенні по тягово-енергетичних паспортах в залежності від вагових норм поїздів і швидкості їх руху.

Вихідна норма витрат палива визначається тягово-енергетичним паспортом локомотива (ТЕПЛ). ТЕПЛ являє собою аналітичну залежність величини питомої витрати палива від маси поїзда, сформованого з чотиривісних вантажних вагонів масою 70 тон, що відповідає навантаженню на вісь 17,5 т (для пасажирських вагонів масу приймають рівною 56 тон) і технічної швидкості поїзда по прямій горизонтальній ділянці колії за температури зовнішнього середовища +15 °С.

Рівняння паливно-енергетичного паспорту тепловоза має наступний вигляд

$$n_0 = S + R \cdot v + T \frac{v}{m_c}, \quad (\text{Б.1})$$

де  $S$ ,  $R$ ,  $T$  – коефіцієнти рівняння, розраховані за певною методикою (значення коефіцієнтів наведені у табл. Б.1);

$v$  – технічна швидкість руху поїзда по дільниці, км/год;

$m_c$  – маса состава поїзда, т.



## Коефіцієнти рівняння паливно-енергетичного паспорта тепловозів

Серія тепловоза	Коефіцієнти рівняння		
	<i>S</i>	<i>R</i>	<i>T</i>
2М62	4,880	0,191	147,445
2ТЭ10	10,210	0,105	199,071
3ТЭ10М	12,334	0,077	310,246
2ТЭ116	9,490	0,098	186,047
ТЭП70	6,449	0,191	171,746

*Приклад визначення вихідної норми за аналітичними розрахунками*

Визначити вихідну норму для тепловоза 2ТЭ116 при масі поїзда 3000 т і заданій швидкості 46 км/год.

$$n_0 = 9,49 + 0,098 \cdot 46 + 186,047 \cdot \frac{46}{3000} = 16,85 \text{ кг/10 тис ткм брутто.}$$

При розрахунках норм витрати палива на поїзд для визначення вихідної (базової) норми  $n_0$  допускається також користуватись табл. 1–17, які наведені у [5, с. 69–85]. При цьому, якщо маса поїзда та швидкість руху його відрізняється від приведених в паспорті величин, вихідну норму слід визначати застосовуючи інтерполяцію.

*Приклад визначення вихідної норми за енергетичним паспортом*

Визначити вихідну норму для тепловоза 2ТЭ116 при масі поїзда 3000 т і заданій швидкості 46 км/год.

По енергетичному паспорту тепловоза 2ТЭ116 [5, табл. 15] вихідна норма  $n_0$  при швидкості 40 км/год дорівнює 17,6 кг/10 тис ткм брутто, а при швидкості 50 км/год – 18,2 кг/10 тис ткм брутто. Тоді, за допомогою інтерполяції, вихідна норма при заданій швидкості 46 км/год становить:

$$n_0 = 17,6 + \frac{(18,2 - 17,6) \cdot (46 - 40)}{(50 - 40)} =$$

$$= 17,6 + 0,36 = 17,96 \text{ кг/10 тис ткм брутто.}$$

## Б.2. Визначення норми витрат палива поїзда заданої моделі

У разі розрахунку норми витрати палива для поїзда заданої моделі на конкретній нормованій дільниці вихідна норма витрат палива уточнюється за допомогою поправочних емпіричних коефіцієнтів, що дозволяють враховувати витрати енергоресурсів на поповнення витрат кінетичної енергії поїзда, пов'язаних з зупинками, витрати енергії на розгін поїзда, на роботу двигуна та допоміжних машин локомотива на холостому ході, а також враховуючих індивідуальні особливості формування поїзда, ступінь використання вантажопідйомності вагонів, складність профілю колії, температурно-метеорологічні умови та інше.

Розрахунок норм витрат палива на поїзд виконується за формулою:

$$n = n_0 k_w k_q k_i k_t k_{Tc} + z' \Delta n_T + k_x n_x + \Theta_c k_x' n_x, \quad (\text{Б.2})$$

- де  $k_w$  – коефіцієнт, який враховує зміну опору поїзда залежно від особливостей його формування;
- $k_q$  – коефіцієнт впливу ступеню використання вантажопідйомності вагонів;
- $k_i$  – коефіцієнт складності нормованої дільниці;
- $k_t$  – температурний коефіцієнт нормованого періоду;
- $k_{Tc}$  – коефіцієнт, що враховує технічний стан локомотива;
- $k_x$  – коефіцієнт холостого ходу локомотива, виражений відношенням часу холостого ходу до загального часу руху поїзда;
- $k_x'$  – коефіцієнт холостої роботи дизеля, виражений відношенням часу роботи дизеля за добу до загальної тривалості стоянок;
- $z'$  – кількість зупинок, які передбачені графіком руху поїздів на 100 поїздо-км;
- $\Delta n_T$  – витрати палива на відновлення кінетичної енергії, витраченої під час гальмування, віднесеної до 10 тис ткм бруто;
- $n_x$  – витрати палива на холостий хід при  $k_x = 1$ ;
- $\Theta_c$  – коефіцієнт стояночного часу; визначається як відношення часу зупинок, передбачених розкладом руху, до загального часу руху поїзда.

### **Вплив опору поїзда**

Вихідна норма витрат палива у разі нормування поїздів, склад яких відрізняється від типової моделі (тобто включають не тільки 4-вісні вагони на роликових підшипниках), коригується коефіцієнтом  $k_w$

$$k_w = 1 + k'_w. \quad (\text{Б.3})$$

Коефіцієнт, що характеризує зміну опору поїзда від наявності в ньому вагонів різного типу визначається з виразу:

$$k'_w = k''_w \cdot k_{\text{л}}, \quad (\text{Б.4})$$

де  $k''_w$  – коефіцієнт, що враховує зміну основного питомого опору нормованих вагонів відносно опору вихідних вагонів за умови відсутності впливу опору локомотива;

$k_{\text{л}}$  – коефіцієнт, що характеризує вплив опору локомотива на опір поїзда.

Значення коефіцієнта  $k''_w$  залежно від типу вагонів, з яких сформований поїзд, і швидкості руху поїзда у разі руху по **ланковій колії** наведені у табл. Б.2.

*Таблиця Б.2*

**Залежність коефіцієнта  $k''_w$  від швидкості та типу вагона у разі руху по ланковій колії**

Тип вагона	Швидкість, км/год									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Порожні 4-вісні	0,537	0,886	1,162	1,352	1,5	1,594	1,663	1,693	1,711	1,708
Вантажні 8-вісні	0,137	0,081	0,034	0,011	0,046	0,075	0,099	0,118	0,132	0,146
Пасажирські	0,401	0,438	0,455	0,461	0,467	0,476	0,473	0,467	0,462	0,462
Вантажні 4-вісні на підшипниках ковзання	0,295	0,267	0,238	0,213	0,184	0,159	0,142	0,124	0,110	0,097

У разі руху поїзда по **безстиковій колії** величина коефіцієнта  $k''_w$  визначається по табл. Б.3.

**Залежність коефіцієнта  $k_w''$  від швидкості і типу вагонів у разі руху по безстиківій колії**

Тип вагона	Швидкість, км/год									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Порожні 4-вісні	0,516	0,809	1,042	1,202	1,303	1,363	1,39	1,391	1,389	1,361
Вантажні 8-вісні	0,126	0,057	0	-0,06	-0,11	-0,15	-0,18	-0,21	-0,23	-0,25
Пасажи́рські	–	0,39	0,387	0,371	0,355	0,337	0,316	0,298	0,281	0,264
Вантажні 4-вісні на підшипниках ковзання	0,279	0,233	0,191	0,142	0,099	0,063	0,033	0,002	-0,02	-0,04

Значення коефіцієнта  $k_{л}$  залежить від відносної маси состава поїзда  $Q'$ , що визначається за формулою:

$$Q' = \frac{Q}{P}, \quad (\text{Б.5})$$

де  $Q$ ,  $P$  – величини маси состава поїзда та локомотива відповідно, т.

Значення коефіцієнта  $k_{л}$  наведені в табл. Б.4.

У тому випадку, коли на дільниці немає явно вираженого порожнього напрямку і обертаються поїзда, що мають певну середню кількість порожніх осей  $N_{п}$ , %, величина коефіцієнта  $k_w''$ , залежно від швидкості руху поїзда та процентного вмісту (чи частки) по масі в составі порожніх вагонів, визначається за табл. Б.5.

У тих випадках, коли виявлені значення частки по масі або швидкості знаходяться між даними, наведеними в таблиці, коефіцієнт  $k_w''$  знаходять інтерполяцією.

**Приклад.** Знайти величину  $k_w''$  для поїзда, що рухається по ділянці з заданою графіком швидкістю 50 км/год і має у своєму складі 33 % по масі 4-вісних порожніх вагонів.

**Розв'язок.** Коефіцієнт, що враховує зміну основного питомого опору нормованих вагонів відносно опору вихідних вагонів у разі відсутності впливу опору локомотива

$$k_w'' = 0,5743 + \frac{(0,7657 - 0,5743)}{0,1} \cdot (0,33 - 0,3) = 0,6317.$$

За наявності в складі поїзда 8-вісних вагонів, коефіцієнт  $k_w''$ , залежно від частки по масі складу поїзда 8-ми вісних вагонів, визначається по табл. Б.6.

Таблиця Б.4

**Залежність коефіцієнта  $k_{\text{л}}$  від швидкості та відносної маси состава поїзда**

Відносна маса поїзда	Швидкість, км/год									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
2	0,483	0,486	0,488	0,49	0,491	0,492	0,493	0,493	0,493	0,494
3	0,584	0,587	0,588	0,590	0,591	0,592	0,593	0,593	0,593	0,594
4	0,652	0,654	0,655	0,657	0,659	0,659	0,66	0,661	0,661	0,661
5	0,701	0,702	0,703	0,705	0,707	0,708	0,708	0,709	0,709	0,709
6	0,737	0,739	0,741	0,742	0,743	0,744	0,744	0,745	0,745	0,746
8	0,789	0,791	0,792	0,793	0,794	0,795	0,795	0,796	0,796	0,796
10	0,824	0,825	0,826	0,827	0,828	0,829	0,829	0,83	0,830	0,830
12	0,849	0,850	0,851	0,852	0,853	0,853	0,853	0,854	0,854	0,854
14	0,867	0,869	0,870	0,871	0,872	0,872	0,872	0,872	0,872	0,873
16	0,883	0,883	0,884	0,885	0,886	0,886	0,886	0,886	0,886	0,887
18	0,894	0,895	0,896	0,896	0,897	0,897	0,897	0,898	0,898	0,898
20	0,903	0,904	0,905	0,906	0,906	0,906	0,907	0,907	0,907	0,907
22	0,912	0,912	0,913	0,914	0,914	0,914	0,914	0,915	0,915	0,915
24	0,918	0,919	0,920	0,920	0,921	0,921	0,921	0,921	0,921	0,922
26	0,924	0,925	0,925	0,926	0,926	0,927	0,927	0,927	0,927	0,927
28	0,929	0,929	0,930	0,931	0,931	0,931	0,931	0,932	0,932	0,932
30	0,934	0,935	0,935	0,935	0,935	0,935	0,935	0,936	0,936	0,936

За наявності в составі  $n$  різнотипних за величиною опору вагонів середній опір руху состава визначається з урахуванням частки кожного типу вагонів за формулою:

$$k_{\text{вср}}'' = \sum_{x=1}^n \alpha_x k_{wi}'', \quad (\text{Б.6})$$

де  $\alpha_x$  – частка маси однотипних вагонів від маси всього состава.

**Коефіцієнт  $k_w''$  для порожніх 4-вісних вагонів на роликівих підшипниках при різній їхньої частки по масі в складі поїзда**

Частка (відсоток) по масі	Швидкість, км/год									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0,05(5%)	0,0542	0,0695	0,0814	0,0898	0,0957	0,0992	0,1011	0,1017	0,1020	0,1010
0,1(10%)	0,1084	0,1390	0,1629	0,1794	0,1914	0,1984	0,2022	0,2035	0,2041	0,2020
0,2(20%)	0,2168	0,2781	0,3259	0,3588	0,3828	0,3969	0,4045	0,4071	0,4082	0,4041
0,3(30%)	0,3221	0,4171	0,4889	0,5382	0,5743	0,5954	0,6068	0,6106	0,6123	0,6062
0,4(40%)	0,4337	0,5561	0,6519	0,7176	0,7657	0,7939	0,8091	0,8142	0,8165	0,8083
0,5(50%)	0,5421	0,6952	0,8148	0,8970	0,9572	0,9924	1,0113	1,0177	1,0206	1,0104
0,6(60%)	0,6505	0,8342	0,9778	1,0764	1,1486	1,1909	1,2136	1,2213	1,2247	1,2125
0,7(70%)	0,7589	0,9733	1,1408	1,2558	1,3401	1,3894	1,4159	1,4248	1,4288	1,4145
0,8(80%)	0,8674	1,1066	1,3038	1,4352	1,5315	1,5879	1,6182	1,6284	1,6330	1,5958
0,9(90%)	0,9758	1,2514	1,4668	1,6146	1,7230	1,7864	1,8205	1,832	1,8371	1,8187
1(100%)	1,0842	1,3904	1,6297	1,7940	1,9144	1,9849	2,0227	2,0355	2,0412	2,0208

$$\alpha_x = \frac{Q_x}{Q}. \quad (\text{Б.7})$$

Аналогічно враховується наявність на ділянці частки безстикової колії. При цьому коефіцієнт  $k_w''$  залежно від типу вагонів і швидкості руху поїзда визначається за табл. Б.6.

***Вплив навантаження на вісь***

Сила опору, що діє на поїзд, залежить від навантаження на вісь вагона. У разі відхилення статичних навантажень поїздів від 17,0–17,5 т вихідна норма множиться на коефіцієнт  $k_q$

$$k_q = 1 + k'_\mu. \quad (\text{Б.8})$$

Значення  $k'_\mu$  залежно від швидкості руху та осьового навантаження наведено в табл. Б.7.

Таблиця Б.6

Коефіцієнт  $k_w''$  у разі різній частці за масою в составі поїзду 8-вісних вагонів

Частка по масі 8-вісних вагонів	Швидкість, км/г									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0,05	0,0068	0,004	0,0017	0,0005	0,0025	0,0020	0,0049	0,0058	0,0065	0,0072
0,1	0,0157	0,0080	0,0034	0,0011	0,0046	0,0057	0,0098	0,0117	0,0131	0,0145
0,2	0,0273	0,0161	0,0068	0,0022	0,0092	0,0132	0,0197	0,0235	0,0263	0,0291
0,3	0,0410	0,0242	0,0102	0,0033	0,0138	0,0207	0,0296	0,0353	0,0394	0,0437
0,4	0,0547	0,0323	0,0136	0,0044	0,0184	0,0282	0,0394	0,0471	0,0526	0,0583
0,5	0,0684	0,0404	0,0170	0,0056	0,0230	0,0357	0,0493	0,0588	0,0658	0,0729
0,6	0,0821	0,0485	0,0204	0,0067	0,0276	0,0433	0,0592	0,0706	0,0789	0,0875
0,7	0,0957	0,0566	0,0238	0,0078	0,0322	0,0508	0,0691	0,0824	0,0921	0,1020
0,8	0,1094	0,0647	0,0272	0,0089	0,0368	0,0583	0,0789	0,0942	0,1053	0,1166
0,9	0,1231	0,0728	0,0306	0,0101	0,0414	0,0658	0,0888	0,1060	0,1184	0,1312
1,0	0,1368	0,0809	0,0340	0,0112	0,0460	0,0733	0,0987	0,1177	0,1316	0,1458

Таблиця 1.7

Коефіцієнт  $k_{\mu}'$  впливу ступенів використання вантажопідйомності вагонів

$q_0$ , т/вісь	Швидкість руху поїзда, км/год									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
6	0,5044	0,6387	0,7748	0,9116	1,0338	1,1431	1,2372	1,3201	1,3893	1,4504
7	0,3948	0,3500	0,6065	0,7136	0,8093	0,8948	0,9684	1,0335	1,0875	1,1354
8	0,3126	0,3959	0,4802	0,5650	0,6408	0,7085	0,7668	0,8182	0,8611	0,8990
9	0,2486	0,3148	0,3818	0,4493	0,5095	0,5633	0,6097	0,6506	0,6847	0,7148
10	0,1974	0,2500	0,3033	0,3568	0,4047	0,4474	0,4843	0,5167	0,5438	0,5678
11	0,1555	0,1969	0,2389	0,2810	0,3187	0,3524	0,3814	0,4070	0,4283	0,4472
12	0,1206	0,1528	0,1853	0,2181	0,2473	0,2734	0,2959	0,3158	0,3323	0,3470
13	0,0911	0,1154	0,1399	0,1646	0,1867	0,2064	0,2234	0,2384	0,2509	0,2620
14	0,0658	0,0833	0,1011	0,1189	0,1349	0,1491	0,1614	0,1722	0,1813	0,1892
15	0,0439	0,0556	0,0674	0,0793	0,0899	0,0994	0,1076	0,1148	0,1209	0,1262
16	0,0247	0,0312	0,0379	0,0446	0,0506	0,0559	0,0605	0,645	0,0679	0,0709
17	0,0077	0,0098	0,0119	0,0140	0,0159	0,0175	0,0190	0,0203	0,0213	0,0223
17,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	-0,0073	-0,0093	-0,0112	-0,0132	-0,0150	-0,0166	-0,0179	-0,0192	-0,0202	-0,0210
19	-0,0208	-0,0263	-0,0319	-0,0375	-0,0426	-0,0471	-0,0509	-0,0544	-0,0572	-0,0597
20	-0,0329	-0,0417	-0,0505	-0,0595	-0,0674	-0,0746	-0,0807	-0,0861	-0,0906	-0,0946
21	-0,0439	-0,0555	-0,0674	-0,0793	-0,0899	-0,0994	-0,1076	-0,1148	-0,1208	-0,1261
22	-0,0538	-0,0682	-0,0827	-0,0973	-0,1103	-0,1220	-0,1320	-0,1409	-0,1483	-0,1548
23	-0,0629	-0,0797	-0,0967	-0,1137	-0,1290	-0,1426	-0,1544	-0,1647	-0,1733	-0,1810

### **Вплив складності профілю колії**

Для врахування характеру профілю колії вихідна норма, яка визначена за умови руху поїзда на площадці відповідно до конкретних умов, змінюється з урахуванням введення в норму коефіцієнта  $k_i$ , що визначає зміну витрат палива внаслідок збільшення механічної роботи, що затрачується на подолання підйомів і кривих ділянок певної ділянки.

Коефіцієнт складності профілю  $k_i$  залежить від величини еквівалентного підйому  $i_e$ , маси поїзда та швидкості руху та визначається за виразом:

$$k_i = 1 + \alpha \cdot i_e, \quad (\text{Б.9})$$

де  $i_e$  – еквівалентний підйом (умовний, що вважається однаковим протягом заданої ділянки та дорівнює за довжиною нормованій ділянці, на якій механічна робота на пересування поїзда еквівалентна механічній роботі, що затрачується на нормованій ділянці при проведенні поїзда однакової маси з однаковою швидкістю), ‰;

$\alpha$  – коефіцієнт, що залежить від швидкості руху; значення коефіцієнта  $\alpha$  наведені в табл. Б.8.

*Таблиця Б.8*

**Коефіцієнт  $\alpha$  для вантажних поїздів**

Швидкість поїзда, км/год	30	40	50	60	70	80	90	100
$\alpha$	0,570	0,523	0,479	0,433	0,389	0,343	0,298	0,255

Величина еквівалентного підйому визначається за формулою:

$$i_e = i_{\pi} - \Delta i_i, \quad (\text{Б1.10})$$

де  $i_{\pi}$  – величина відносної роботи без урахування сил інерції поїзда, Н/кН;

$\Delta i_i$  – величина відносної роботи сил інерції поїзда, Н/кН; значення величин відносної роботи сил інерції поїзда залежно від  $i_{\pi}$  наведені в табл. Б.9; проміжні значення визначаються методом інтерполяції.



$$i_{\Pi} = \frac{\sum i_x \cdot l_x + \sum \frac{57,3 \cdot l_k}{R_k} + \sum (i_{\text{ш}} - \omega_{\text{ш}}) \cdot l_{\text{ш}}}{L}, \quad (\text{Б.11})$$

- де  $i_x, l_x$  – величини ухилів у ‰ і їх довжина в метрах відповідно;  
 $l_k$  – довжина кривої ділянки колії, м;  
 $R_k$  – радіус кривої ділянки колії, м;  
 $i_{\text{ш}}$  – величина шкідливого спуску (спуск, на якому виконується гальмування поїзда), ‰; до шкідливих спусків відносяться всі спуски, крутіші за 6 ‰;  
 $l_{\text{ш}}$  – довжина шкідливого спуску, м; у розрахунках приймається 0,7 їх довжини;  
 $\omega_{\text{ш}}$  – основний питомий опір поїзда на шкідливому спуску при швидкості, що відповідає руху по ним нормованого поїзда, Н/кН;  
 $L$  – загальна довжина ділянки, м.

Таблиця Б.9

**Величина відносної роботи сил інерції поїзда, Н/кН**

$i_{\Pi}$	0	+0,2	+0,4	+0,6	+0,8	+1,0	+1,2	+1,4	+1,6	+1,8	+2,0	+2,5	+3,0
$\Delta i_i$	0,2	0,21	0,22	0,225	0,22	0,22	0,218	0,215	0,213	0,18	0,16	0,05	0,00

У разі від'ємного значення еквівалентного підйома, величину відносної роботи сил інерції поїзда в розрахунок не приймають.

Основний питомий опір складу поїзда на 4-вісних вагонах на роликових підшипника при швидкості, що відповідає руху по ньому нормованого поїзда (задано  $V = 60$  км/год) визначається за формулами:

– для локомотива

$$\omega'_0 = 1,9 + 0,01V + 0,0003V^2, \quad (\text{Б.12})$$

– для 4-вісного вагона

$$\omega''_{04} = 0,7 + \frac{3 + 0,1V + 0,0025V^2}{17,5}, \quad (\text{Б.13})$$

– для складу поїзда

$$\omega_{\text{ш}} = \frac{m_{\text{л}}\omega'_0 + m_{\text{с}}\omega''_{04}}{m_{\text{л}} + m_{\text{с}}}, \quad (\text{Б.14})$$

де  $\omega'_0$  – основний питомий опір руху локомотива, Н/кН;

$\omega''_{04}$  – основний питомий опір вагонів, Н/кН;

$m_{\text{л}}$ ,  $m_{\text{с}}$  – розрахункові маси відповідно локомотива та состава поїзда, т.

**Приклад.** Визначити еквівалентний підйом спрямленого профілю, наведеного в табл. Б.10. Припустима швидкість руху поїзда на шкідливих спусках ділянки становить 60 км/год. Маса бруто состава  $m_{\text{с}}$  – 3000 т, локомотив 2ТЭ10М ( $m_{\text{л}}=276$  т).

Таблиця Б.10

Вихідні дані нормованої ділянки

$i_x$ , ‰	0	2,5	– 6,0	1,0	– 8,0	9,0	8,0	– 7,0	8,0	0
$l_x$ , м	3000	2000	2000	1000	2500	2000	1500	3000	2000	1000
$l_k$ , м			800				350			
$R_k$ , м			1500				900			

**Розв'язок.** Проміжні результати розрахунків еквівалентного підйому наведено в табл. Б.11.

$$i_{\text{п}} = \frac{52000 - 53000 + 52,84 + 21454}{11500 + 7500} = 1,079 \text{ ‰}.$$

Еквівалентний підйом позитивний, тому при розрахунку застосовуємо значення величини відносної роботи сил інерції поїзда, що наведені в табл. Б.9.

Методом інтерполяції отримуємо:

$$\Delta i_i = 0,22 + \frac{0,218 - 0,22}{1,2 - 1} \cdot (1,079 - 1) = 0,219 \text{ ‰}.$$

Таблиця Б.11

## Проміжні результати розрахунку еквівалентного ухилу нормованої ділянки

Підйоми та площади		Ухили			Криві ділянки			Шкідливі спуски						
$i_x, ‰$	$l_x, \text{м}$	$i_x, ‰$	$l_x, \text{м}$	$i_{x^*}, ‰$	$i_{x^*} l_{x^*}$	$l_k, \text{м}$	$R_k, \text{м}$	$\frac{57,3 \cdot l_k}{R_k}$	$i_{ш}, ‰$	$l_{ш}, \text{м}$	$V_{ш}, \text{км/год}$	$\frac{H}{KН}$	$ i_{ш1} - i_{ш2} $	$i_{ш1} \cdot (S_{ш1} - S_{ш2})$
0	3000	0	2000	-6,0	-12000	800	1500	30,56						
2,5	2000	5000	2500	-8,0	-20000				-8,0	1750	60	1,88	6,12	10702
1,0	1000	1000	3000	-7,0	-21000				-7,0	2100	60	1,88	5,12	10752
9,0	2000	18000												
8,0	1500	12000				350	900	22,28						
8,0	2000	16000												
	11500	52000	7500		-53000			52,84						21454

З урахуванням  $\Delta i_i$

$$i_e = 1,079 - 0,219 = 0,86 \text{ \%}.$$

Відповідь: еквівалентний підйом дорівнює 0,86 %.

У випадках, коли навантаження на вісь вагона менше або більше, ніж 17,5 т і застосовується коефіцієнт  $k'_u$  величина коефіцієнту складності профілю  $k_i$  визначається за формулою:

$$k_i = 1 + C_a \cdot \alpha \cdot i_e, \quad (\text{Б.15})$$

де  $C_a$  – коефіцієнт, що визначається залежно від навантаження на вісь для навантаженого поїзда та залежно від швидкості для порожнього поїзда; значення коефіцієнта  $C_a$  наведені в табл. Б.12, Б.13.

Таблиця Б.12

**Значення коефіцієнта  $C_a$  залежно від навантаження на вісь для составів навантаженого поїзда**

Навантаження на вісь, т	6	8	10	12	14	16	18	20	22	23
$C_a$	0,605	0,680	0,750	0,825	0,900	0,970	1,025	1,060	1,075	1,08

Таблиця Б.13

**Значення коефіцієнта  $C_a$  залежно від швидкості для порожнього состава**

Швидкість руху, км/год	30	40	50	60	70	80
$C_a$	0,570	0,540	0,510	0,490	0,470	0,460

### **Вплив температурних умов**

Величину вихідної норми витрат палива приймають для температури зовнішнього середовища  $\tau = +15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для обліку температурних умов у розрахунок норми вводиться температурний коефіцієнт  $k_\tau$ . Значення температурного коефіцієнта  $k_\tau$  наведені в табл. Б.14.

Коефіцієнт  $k_\tau$  для тепловозної тяги

$\tau, ^\circ\text{C}$	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0
$k_\tau$	1,115	1,102	1,089	1,076	1,064	1,051	1,038
$\tau, ^\circ\text{C}$	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35
$k_\tau$	1,025	1,012	1,0	0,985	0,972	0,959	0,945

**Вплив технічного стану локомотивів**

Знос вузлів і деталей тепловозів та зміна їх характеристик у процесі тривалої експлуатації викликає збільшення витрат палива, що враховується при нормуванні коефіцієнтом  $k_{\text{тс}}$ . Значення коефіцієнта  $k_{\text{тс}}$  залежить від віку тепловозів та їх загального пробігу між черговими деповськими ремонтами ПР-3.

Значення коефіцієнта  $k_{\text{тс}}$  наведені в табл. Б.15.

**Додаткові витрати палива, пов'язані із зупинками поїзда**

Витрати палива, пов'язані з відновленням кінетичної енергії поїзда, втраченої в процесі гальмування  $\Delta n_\tau$ , також враховують у нормі. Величина цих витрат на одну зупинку, що приходить на 100 поїздо-км, наведені залежно від маси поїзда та швидкості початку гальмування в [5, с. 32–34] у вигляді таблиць. Величини витрат на одну зупинку, що приходить на 100 поїздо-км, приведених залежно від маси поїзда та швидкості початку гальмування для вантажних тепловозів наведені у табл. Б.16.

Частка витрат палива, пов'язана з гальмуванням та подальшим розгоном, визначається за формулою:

$$z' = \frac{100z}{L}, \quad (\text{Б.16})$$

де  $z$  – кількість зупинок за графіком;

$L$  – довжина ділянки, км.

Залежність коефіцієнта  $k_{тс}$  від віку тепловозів та їх напрацювання

Серія тепловоза	Період експлуатації													
	до ПР-3						між 1ПР-3 та 2ПР-3						після 2ПР-3	
	до 100 тис км	100...200 тис км	більш 200 тис км	до 100 тис км	100...200 тис км	більш 200 тис км	до 100 тис км	100...200 тис км	більш 200 тис км	до 100 тис км	100...200 тис км	більш 200 тис км		
<i>виготовлення – КР-1</i>														
2ТЭ10 <sup>В/1</sup>	–	1,027	1,031	1,025	1,033	1,047	1,034	1,042	1,056					
М62, 2М62	–	1,018	1,022	1,015	1,024	1,036	1,026	1,034	1,045					
2ТЭ116	–	1,022	1,025	1,016	1,026	1,040	1,028	1,037	1,048					
ТЭП70	–	1,025	1,028	1,021	1,029	1,042	1,032	1,040	1,052					
<i>КР-1–КР-2</i>														
2ТЭ10 <sup>В/1</sup>	1,036	1,055	1,064	1,048	1,062	1,088	1057,	1,086	1,109					
М62, 2М62	1,028	1,046	1,060	1,040	1,056	1,074	1,048	1,078	1,103					
2ТЭ116	1,030	1,049	1,062	1,042	1,060	1,080	1,053	1,081	1,105					
ТЭП70	1,034	1,052	1,063	1,044	1,060	1,082	1,054	1,083	1,107					
<i>після КР-2</i>														
2ТЭ10 <sup>В/1</sup>	1,085	1,112	1,138	1,103	1,126	1,144	1,110	1,149	1,168					
М62, 2М62	1,072	1,102	1,125	1,090	1,115	1,132	1,102	1,138	1,162					
2ТЭ116	1,077	1,108	1,132	1,091	1,121	1,140	1,104	1,142	1,165					
ТЭП70	1,082	1,110	1,133	1,092	1,123	1,142	1,106	1,145	1,166					

**Питома величина витрат палива, пов'язана з відновленням кінетичної енергії поїзда, втраченої на гальмування поїзда при зупинці, кг/10 тис. ткм брутто**

Маса поїзда, т	Швидкість, км/год						
	30	40	50	60	70	80	90
500	0,515	0,916	1,431	2,061	2,791	3,664	4,638
800	0,451	0,802	1,245	1,803	2,454	3,205	4,056
1000	0,429	0,762	1,191	1,716	2,335	3,049	3,860
1500	0,400	0,711	1,111	1,600	2,178	2,845	3,601
2000	0,386	0,685	1,072	1,543	2,100	2,743	3,471
2500	0,377	0,671	1,047	1,508	2,052	2,681	3,392
3000	0,372	0,660	1,031	1,485	2,022	2,641	3,343
3500	0,368	0,653	1,020	1,469	1,999	2,611	3,305
4000	0,364	0,648	1,012	1,460	1,984	2,591	3,279
4500	0,361	0,643	1,005	1,447	1,970	2,572	3,256
5000	0,358	0,639	0,999	1,440	1,958	2,557	3,235

***Витрати електроенергії та палива для холостого ходу і на стоянках з поїздами***

У норму витрат палива для тепловоза включаються витрати (роботу дизеля в режимі холостого ходу, віднесено до 10 тис ткм брутто. Відсоток холостого ходу в розрахунок норми вводиться як коефіцієнт  $k_x$ .

Цей коефіцієнт для кожної конкретної ділянки визначається як середня величина з даних дослідних поїздок, проведених кваліфікованими машиністами по кожному з напрямків.

Коефіцієнт холостого ходу визначається також для порожніх поїздів. В цьому випадку величина  $k_x$  приймається тільки при розрахунках норм витрат для порожніх поїздів.

Для попередніх розрахунків коефіцієнт холостого ходу тепловозів можна приймати за даними табл. Б.17.

Питомі витрати палива на холостому ході, що враховуються в нормі, дорівнюють добутку  $k_x \cdot n_x$ , де  $n_x$  – відносна годинна величина витрат палива на холостий хід; значення  $n_x$  залежно від швидкості руху, маси поїзда та серії тепловоза наведені в [5, с. 37–40].

Таблиця Б.17

Величина коефіцієнта  $k_x$ 

Швидкість, км/год	Еквівалентний ухил $i_e$ , ‰										
	-2	-1,5	-1	-0,5	0	+0,5	+1	+1,5	+2	+2,5	+3
30	0,645	0,605	0,566	0,526	0,487	0,448	0,408	0,369	0,329	0,289	0,26
40	0,635	0,574	0,513	0,452	0,391	0,330	0,269	0,208	0,147	0,086	0,023
50	0,623	0,541	0,459	0,377	0,295	0,213	0,131	0,049	–	–	–
60	0,613	0,510	0,406	0,302	0,199	0,096	–	–	–	–	–
70	0,603	0,478	0,353	0,228	0,103	–	–	–	–	–	–
80	0,593	0,447	0,300	0,154	0,007	–	–	–	–	–	–

**Приклад.** Розрахувати норму витрат дизельного палива на поїзну роботу тепловоза 2ТЭ116 для таких вихідних умов, що наведені у табл. Б.18.

Таблиця Б.18

## Вихідні дані

Параметр	Значення
Пробіг після КР-1	150 тис км
Маса тепловоза $P$	276 т
Дільниця нормування $L$	145 км
Еквівалентний підйом без урахування сил інерції $i_{\Pi}$	+ 0,585 ‰
Маса поїзда $Q$	3600 т
Технічна швидкість $V_T$	50 км/год
Середній відсоток 8-вісних вагонів	10 %
Середнє навантаження на вісь вагонів	16 т
Середньорічна температура нормованого періоду $\tau$	+ 2,5 °С
Кількість зупинок, що закладена у графік	1
Середня швидкість початку гальмування	50 км/год

**Розв'язок.** Вихідна (базова) норма за формулою (Б.1)

$$n_0 = 9,49 + 0,098 \cdot 50 + 186,047 \cdot \frac{50}{3600} = 16,97 \text{ кг/10 тис ткм бруто.}$$

Коефіцієнт  $k_w$ , що враховує вплив 8-вісних вагонів розраховується



за формулами (Б.3) і (Б.4), а також за допомогою табл. Б.2 і Б.4 (коефіцієнт  $k_{\text{л}}$  при  $Q' = \frac{3600}{276} = 13,04$  знаходиться за табл. Б.4,  $k_{\text{л}} = 0,863$ ; коефіцієнт  $k_w''$  за табл. Б.2 буде дорівнювати  $k_w'' = 0,046$ . Тоді

$$k_{w_{\text{ср}}}'' = 0,1 \cdot 0,0046 + 0,9 \cdot 0,046 = 0,042. \quad k_w' = 0,042 \cdot 0,863 = 0,0362;$$

$$k_w = 1 + 0,0362 = 1,036.$$

Коефіцієнт впливу вантажопідйомності вагонів

$$k_q = 1 + 0,0506 = 1,0506.$$

Коефіцієнт складності нормованої ділянки

$$k_i = 1 + 0,97 \cdot 0,479 \cdot (0,585 - 0,225) = 1,167.$$

Температурний коефіцієнт  $k_{\tau}$  за даними табл. Б.14 дорівнює 1,032.

Коефіцієнт технічного стану тепловоза визначаємо за табл. Б.15;  
 $k_{\text{тс}} = 1,049$ .

Приведене число зупинок

$$z' = \frac{100 \cdot 1}{145} = 0,69.$$

Питомі витрати палива на приведену зупинку при швидкості 50 км/год за табл. Б.16

$$z' \cdot \Delta n_{\text{т}} = 0,69 \cdot 1,0184 = 0,703 \text{ кг.}$$

Питомі витрати палива на холостому ході дизеля під час руху поїзда

$$k_x \cdot n_x = 0,236 \cdot 1,668 = 0,394 \text{ кг/10 тис ткм бр.}$$

Норма витрат на поїзд

$$n = 16,97 \cdot 1,036 \cdot 1,0506 \cdot 1,167 \cdot 1,032 \cdot 1,049 + \\ + 0,703 + 0,394 = 24,43 \text{ кг/10 тис ткм бр.}$$

Навчальне видання

*Бобирь Дмитро Валерійович, Грищенко Микола Анатолійович,  
Сердюк Володимир Никандрович*

## **Теорія локомотивної тяги**

Підручник

Підписано до друку 05.07.21.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 20,12. Обл.-вид. арк.12,57.  
Тираж 50 прим. Зам. № 152 від 03.05.2022 р.

Видавець: Український державний університет науки і технологій,  
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, ауд. 263 (наукова бібліотека)  
м. Дніпро, 49010.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Надруковано у підприємстві ТОВ "Дріант"  
м. Дніпро, просп. С. Нігояна, 55  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6593 від 28.01.2019 р.

Відповідно до програми освітньої компоненти у підручнику розглянуто загальні питання механіки транспортного руху, сили, що діють на залізничний поїзд під час його руху (сили тяги, основного та додаткового опору та гальмівні), та фактори, що їх визначають.

Наведено необхідні дані та методики для розрахунку цих сил. Дано відомості про тягові характеристики локомотивів. Наведено аналіз рівняння руху поїзда та можливостей його розв'язання за різних умов. На цій основі викладено традиційну технологію тягових розрахунків, зокрема з використанням ЕОМ.

