

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

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи
магістра
(рівень вищої освіти)

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему: «Аналіз перспективних напрямків удосконалення структури електромеханічної системи рейкового транспорту з метою підвищення енергетичної ефективності його функціонування»

КНУ.МР.141.25.665-05

Виконав студент ІІ курсу, групи ЕПА-24м /Ростислав ЗАСУНЬКО/
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»
(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Керівник:

к.т.н., доцент

_____ /Ірина КАСАТКІНА/

Нормоконтролер:

к.т.н., доцент

_____ /Ірина КАСАТКІНА/

Завідувач кафедри,

д.т.н., професор

_____ /Олег СІНЧУК/

Гарант ОПП:

к.т.н., доцент

_____ /Юрій ОСАДЧУК/

Кривий Ріг
2025 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ЗАСУНЬКО Ростислав Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Аналіз перспективних напрямків удосконалення структури
електромеханічної системи рейкового транспорту з метою підвищення
енергетичної ефективності його функціонування

1. Термін подання студентом роботи: 15 грудня 2025 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є аналіз перспективних
напрямків удосконалення структури електромеханічної системи рейкового
транспорту. Завданням є підвищення енергетичної ефективності
функціонування електромеханічної системи рейкового транспорту.
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Аналіз будови електровоза та дослідження процесу перетворення
електричної енергії на механічну, особливості перетікання потоків
потужності в режимах тяги та гальмування, а також взаємодію основних
елементів системи: джерела живлення, силового обладнання, тягових
двигунів, приводу та ходових частин; II. Аналіз процесу розвитку
локомотивного транспорту та спектр аспектів – від історичного розвитку
електрифікації до аналізу роботи тягових електродвигунів та сучасних
методів керування; III. Аналіз механіки руху поїзда на ряду параметрів: сили
тяги, опору руху, впливу ухилів, кривих, аеродинамічних факторів та

додаткових сил у тунелях.

4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Схема приводу електровоза; II. Локомотив та застосовувані в ньому технології; III. Графіки опору руху різних локомотивів та транспортних засобів.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ірина КАСАТКІНА		
II	Ірина КАСАТКІНА		
III	Ірина КАСАТКІНА		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Локомотив: перетворювач енергії	10.09.25
2	Локомотивобудування: міждисциплінарне завдання	12.09.25
3	Взаємозалежність розвитку	17.09.25
4	Сучасна епоха	19.10.25
5	Аналіз механіки руху поїзда на ряду параметрів: сили тяги, опору руху, впливу ухилів, кривих,	24.11.25
	аеродинамічних факторів та додаткових сил у тунелях	07.12.25

Дата видання завдання 01.09.2025 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Ростислав ЗАСУНЬКО
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ірина КАСАТКІНА
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової кваліфікаційної роботи магістра на тему: «Аналіз перспективних напрямків удосконалення структури електромеханічної системи рейкового транспорту з метою підвищення енергетичної ефективності його функціонування», КНУ.РМ.141.25.665-05

Мета дослідження – аналіз перспективних напрямків удосконалення структури електромеханічної системи рейкового транспорту.

Об'єкт дослідження – електромеханічна системи рейкового транспорту.

Предмет дослідження – показники енергетичної ефективності функціонування рейкового транспорту.

Дана робота присвячена комплексному дослідженню сучасних залізничних технологій та електричної тяги, а також принципів побудови, функціонування й розвитку тягового рухомого складу.

Детально і послідовно розглянуто еволюцію технічних рішень у сфері електрифікації залізниць, порівняно ключові системи живлення та їх вплив на конструкцію і роботу електровозів та поїздів.

Представлено оцінювання локомотива як складного об'єкту, що поєднує електротехнічні, електронні, механічні та системотехнічні компоненти.

На основі аналізу будови електровоза досліджено процес перетворення електричної енергії на механічну, особливості перетікання потоків потужності в режимах тяги та гальмування, а також взаємодію основних елементів системи: джерела живлення, силового обладнання, тягових двигунів, приводу та ходових частин.

У роботі проведено глибокий аналіз механіки руху поїзда на ряду параметрів: сили тяги, опору руху, впливу ухилів, кривих, аеродинамічних факторів та додаткових сил у тунелях.

Окремо розглянуто поняття ефективної маси, що враховує інерцію обертових елементів — колісних пар, валів та якорів двигунів.

Подано характеристики зчеплення колеса з рейкою, їх залежність від швидкості та ковзання, а також умови виникнення буксування та методи його запобігання.

РЕЙКОВИЙ ТРАНСПОРТ, ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА,
АНАЛІЗ, УДОСКОНАЛЕННЯ СТРУКТУРИ, ПІДВИЩЕННЯ
ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1. Аналіз будови електровоза та дослідження процесу перетворення електричної енергії на механічну, особливості перетікання потоків потужності в режимах тяги та гальмування, а також взаємодію основних елементів системи: джерела живлення, силового обладнання, тягових двигунів, приводу та ходових частин	9
1.1. Локомотив: перетворювач енергії	9
1.2. Локомотивобудування: міждисциплінарне завдання.....	12
Розділ 2. Аналіз процесу розвитку локомотивного транспорту та спектр аспектів – від історичного розвитку електрифікації до аналізу роботи тягових електродвигунів та сучасних методів керування.....	14
2.1. Взаємозалежність розвитку.....	14
2.2. Сучасна епоха.....	15
Розділ 3. Аналіз механіки руху поїзда на ряду параметрів: сили тяги, опору руху, впливу ухилів, кривих, аеродинамічних факторів та додаткових сил у тунелях	17
Висновки	31
Список використаних джерел	33
Додатки.....	36

Вступ

Залізниці існували ще довгий час, коли з'явився електричний потяг.

Але саме вона стала причиною подальшого розвитку, який ми знаємо сьогодні:

- Модернізація корисного навантаження поїзда.
- Більше швидкості та прискорення для скорочення часу у дорозі.

У порівнянні з паровозом, а тепер і з тепловозом тієї ж маси, електровоз має не тільки більшу номінальну потужність, але й може короткочасно розвивати потужність, що перевищує номінальну (від 50% до 100%).

Ця властивість виправдовує високі витрати на електрифікацію зі збільшенням інтенсивності руху на лінії.

Дизельне паливо використовується на лініях із низькою інтенсивністю руху.

Протягом часу деякі технології отримали значний розвиток, а деякі взагалі зникли (в нових автомобілях).

Громадський транспорт та високошвидкісні потяги пережили несподіване зростання.

Також зросла активність у сфері великовагових вантажних перевезень.

Частка залізничного транспорту, ймовірно, зросте найближчими роками через завантаженість доріг та потепління клімату.

У даній роботі основна увага приділена актуальним та новим рішенням.

Деякі старі рішення коротко згадані з таких причин:

- Термін служби залізничного транспортного засобу є досить тривалим, тому «застарілі» технології можна зустріти у повсякденній комерційній експлуатації.
- Знання в галузі історії технологій можуть бути корисними для розуміння деяких актуальних рішень.

Розділ 1. Аналіз будови електровоза та дослідження процесу перетворення електричної енергії на механічну, особливості перетікання потоків потужності в режимах тяги та гальмування, а також взаємодію основних елементів системи: джерела живлення, силового обладнання, тягових двигунів, приводу та ходових частин

1.1. Локомотив: перетворювач енергії

Функція електровоза - перетворення електричної енергії на механічну.

Це перетворення змінюється з часом.

Ми вважаємо за краще говорити про перетворення потужності.

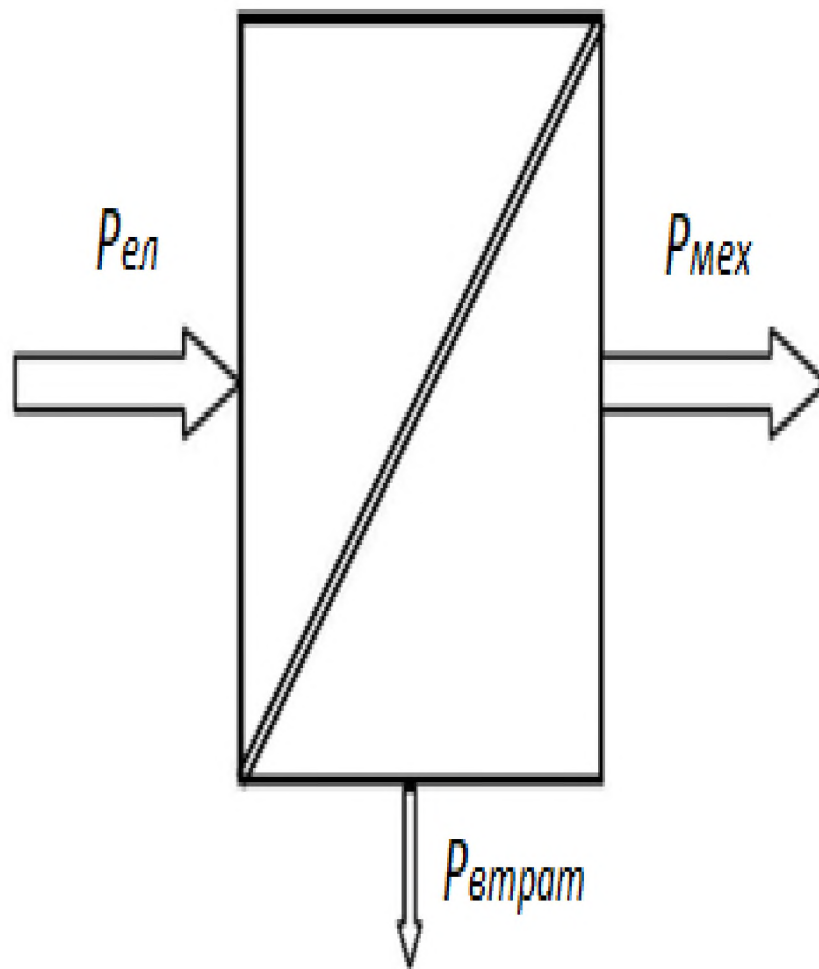


Рис 1.1 - Перетворення потужності

Конверсія діє у три етапи.

$$U_{lc} \cong \text{cte}; f_{lc} = \text{cte}; I_{lc} \neq \text{cte}$$

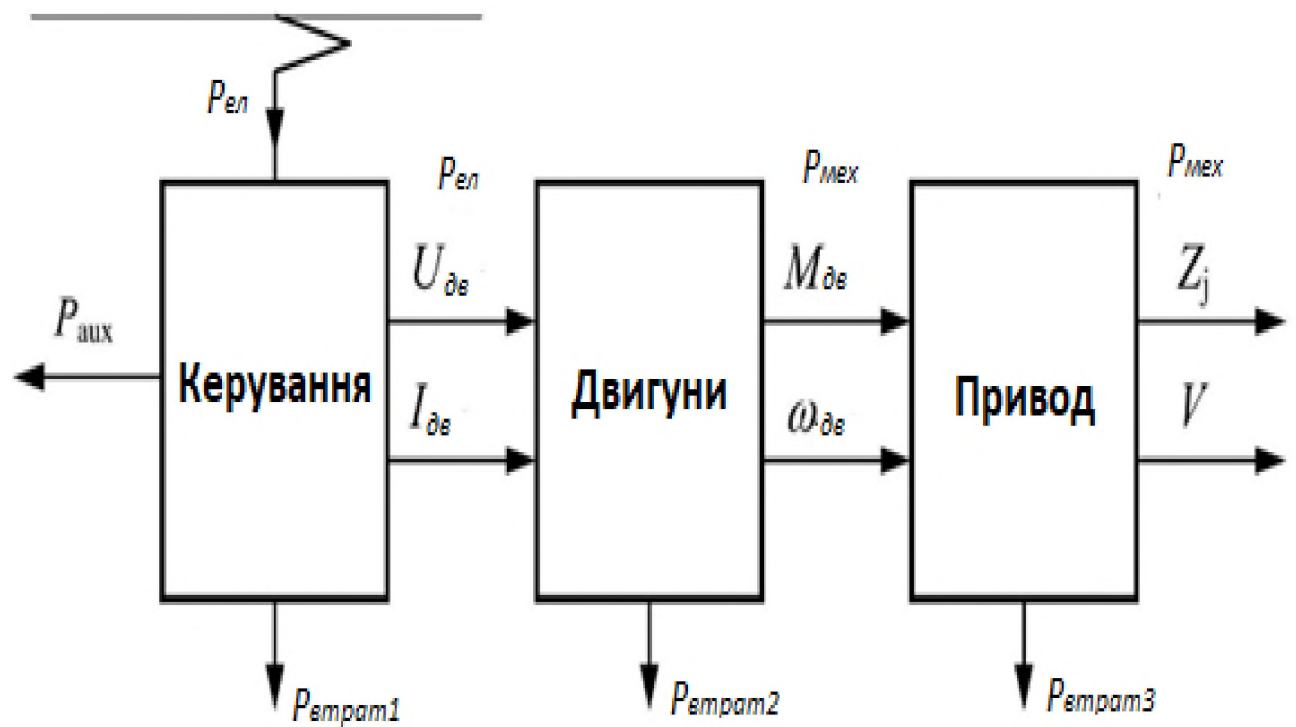


Рис. 1.2 Енергопотоки та потужності в локомотиві в режимі тяги.

При електричному гальмуванні відбувається зворотне перетворення.

1.2. Локомотивобудування: міждисциплінарне завдання

Проектування, будівництво та експлуатація електровоза вимагають застосування різних технологій (рис. 1.3).

Для оптимізації конструкції транспортного засобу від початку необхідна міждисциплінарна організація.

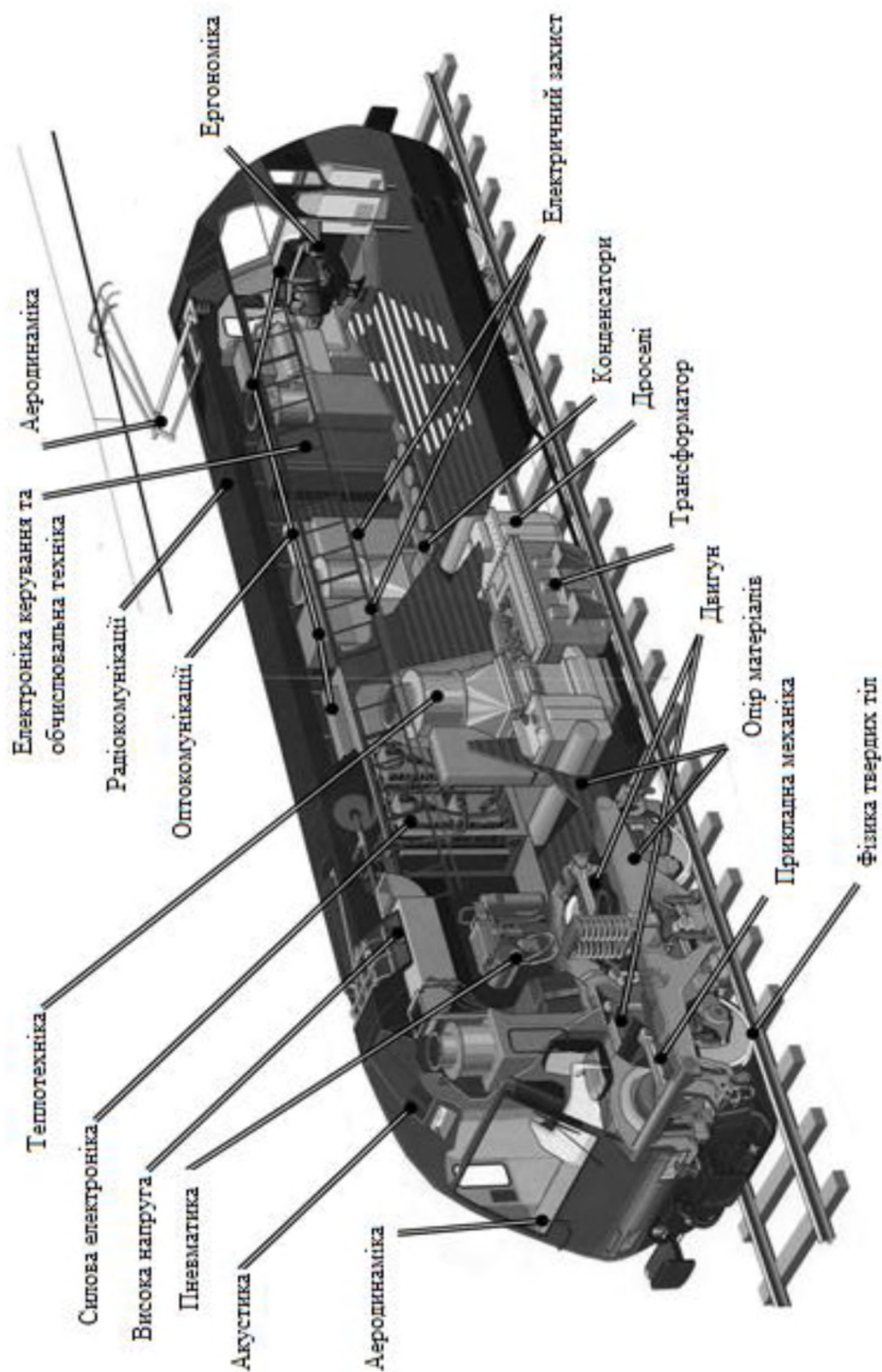


Рис. 1.3 Локомотив та застосовувані в ньому технології.

Розділ 2. Аналіз процесу розвитку локомотивного транспорту та спектр аспектів – від історичного розвитку електрифікації до аналізу роботи тягових електродвигунів та сучасних методів керування

2.1. Взаємозалежність розвитку

Історія залізниць та електричної тяги тісно пов'язана з розвитком електротехніки, зокрема трансформаторів, двигунів та напівпровідників.

Мода, політичні та стратегічні рішення також помітно вплинули на розвиток електричної тяги.

При електрифікації технологічно міцні рішення впроваджувалися до тих пір, поки ефективніші рішення не набули достатньої надійності.

2.2. Сучасна епоха

Сьогодні лише дві системи перебувають у стадії повного розвитку: однофазна з промисловою частотою для мереж із великою тягою та система постійного струму низької напруги для громадського транспорту.

Деякі інфраструктури були збудовані давно та мали можливості, які сьогодні будуть іншими; вони використовуються регулярно та довго.

Наприклад, системи постійного струму та змінного струму нестандартної частоти використовуються тільки для мереж з великою тягою, оскільки їхня заміна виявилася надто дорогою.

Протягом трьох чвертей століття конструктори електроустаткування швидко оцінювали вагу електричної частини, необхідну досягнення необхідних характеристик транспортного засобу.

Конструктори-механіки мали знайти рішення, що дозволяє не перевищити максимальне осьове навантаження.

Механічна та електрична частини часто виготовлялися різними заводами, можливо двома незалежними підрозділами однієї компанії.

Перед кожним партнером стояло завдання не перевищити проектну вагу. З сімдесятих років електронні системи допомоги машиністу зайняли своє місце поряд із електричною та механічною частинами.

На зміні тисячоліть відбулася революція. Локомотиви та поїзди проектуються глобально, з урахуванням оптимізації кінцевого продукту, включаючи комп'ютери – електротехніки та механіки.

Детальні розробки контролюються генеральним конструктором, який визначає точні специфікації для кожного обладнання та взаємодію між ними та їх виробниками.

Електроживлення мережі та геометрія шляху включені до процедури проектування.

При використанні такого методу вага та вартість можуть бути оптимізовані порівняно з трохи старішими транспортними засобами тієї ж функції (приклади: модель 185 de Bombardier, Citadis Alstom, Flirt Stadler, ICE3 Siemens).

Розділ 3. Аналіз механіки руху поїзда на ряду параметрів: сили тяги, опору руху, впливу ухилів, кривих, аеродинамічних факторів та додаткових сил у тунелях

Рух поїзда, по суті, є рухом маси m з одним ступенем свободи.

Воно описується скалярним рівнянням Ньютона.

$$\sum_{i=1}^n F_i = m \cdot a \quad (3.1)$$

Сили, що виникають у поїзді: сили від двигунів або механічного гальма, а також сили, яким піддаються поїзди: власне тертя та локальні сили (нахил, тертя у тунелях або на поворотах).

Власне тертя складається з трьох частин: постійної частини, пропорційної швидкості, і частини, пропорційної квадрату швидкості.

$$F_f = A + Bv + Cv^2 \quad (3.2)$$

Зверніть увагу, якщо числові значення швидкості вказані в м/с або км/ч.

Криві на рисунках 3.1–3.2 наведені в силах щодо ваги поїзда.

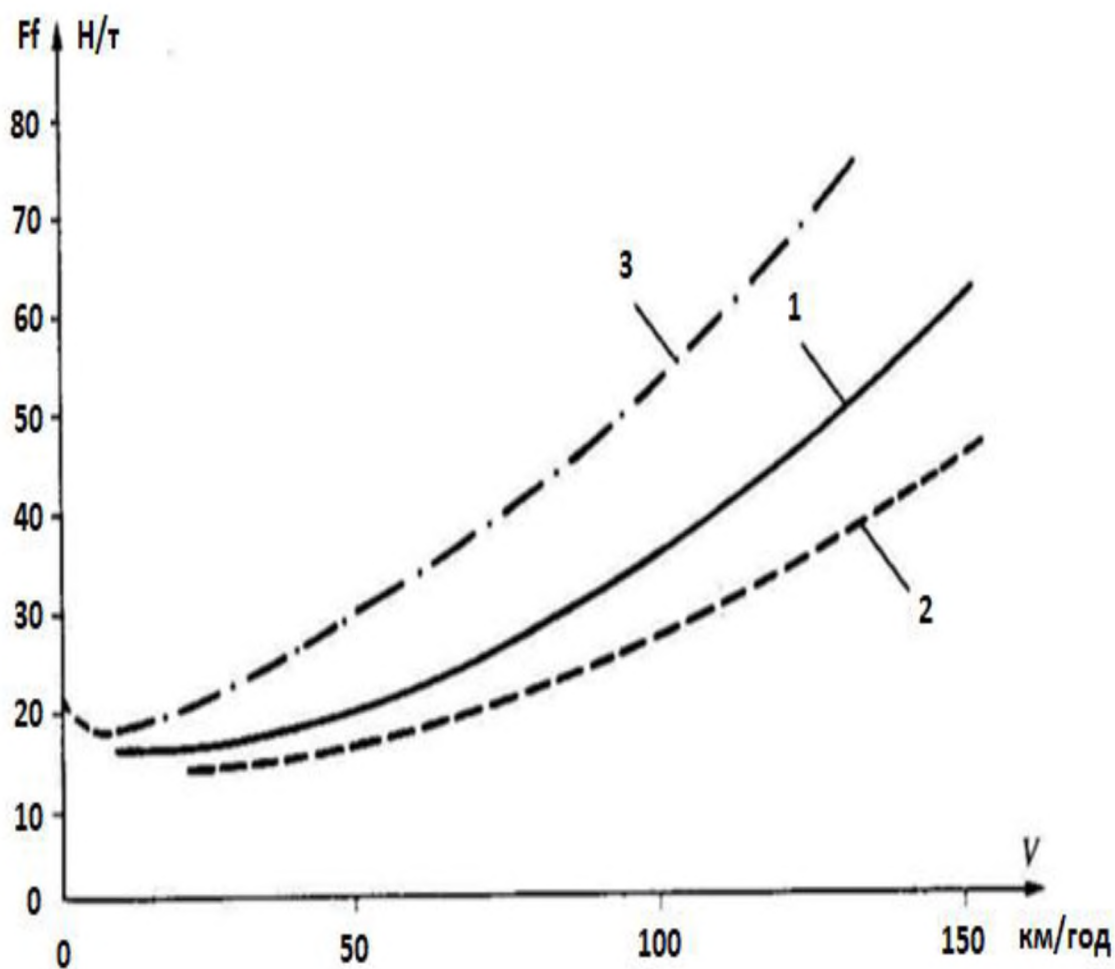


Рис. 3.1 Опір руху пасажирських поїздів: 1 - вагон UIC близько 1960 р. (SNCF, CFF, DB, FS), 2 - вагон Corail 1975 р. (SNCF), Eurofima 1980 р. (DB, FS, ÖBB) або VUIV 1985 р. (CFF), 3 - легкий вагон 1940 р.

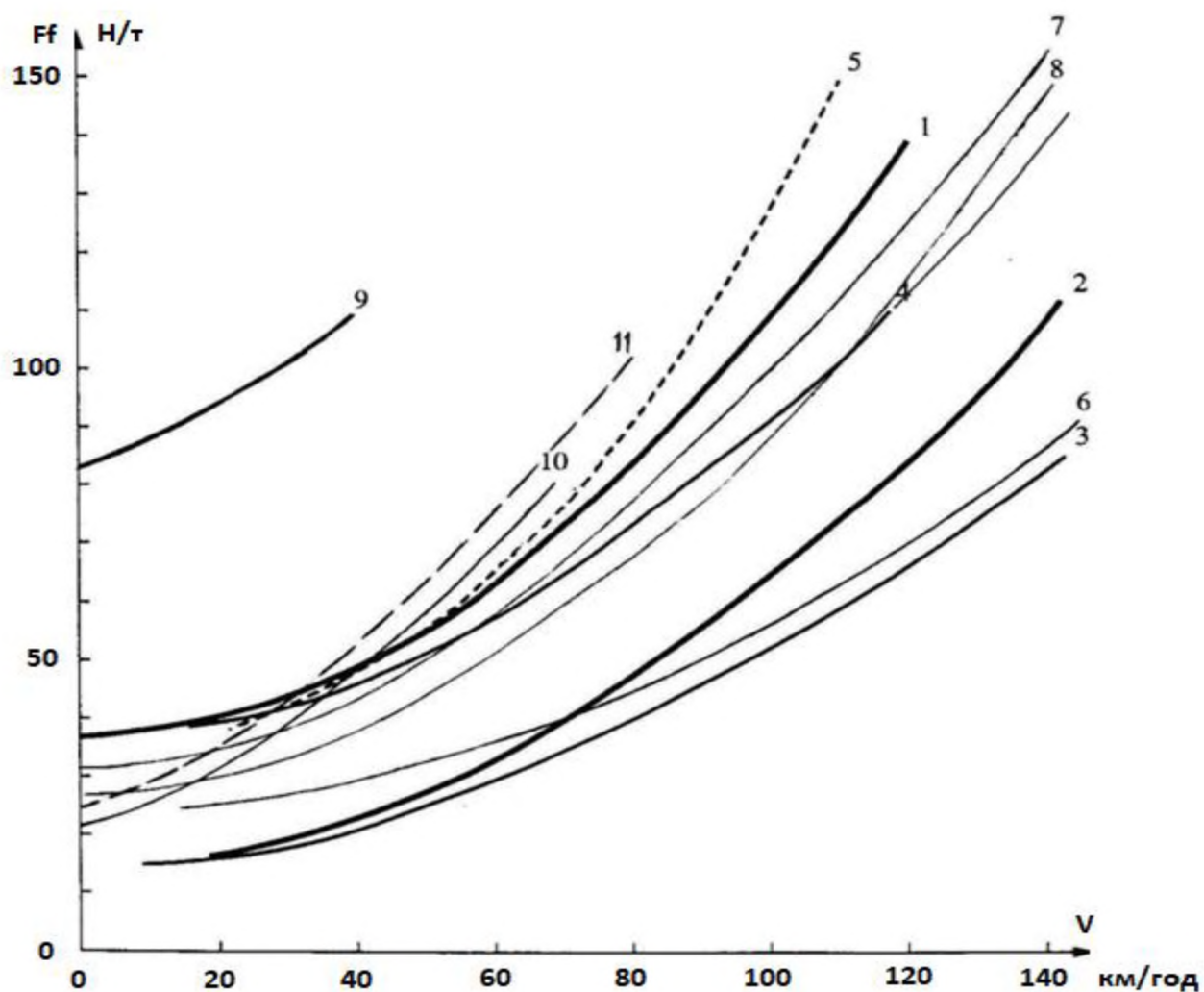


Рис. 3.2 Опір руху транспортних засобів: 1 - локомотив Ae 6/6 (CFF) 120 т, 2 - локомотив 9001 (SNCF) 80 т, 3 - локомотив 6001 (SNCF) 120 т, 4 - локомотив Am 4/6 (CFF **Re460**), 5 - локомотив 2D2 (PO), 6 - локомотив BBB (FS), 7 - локомотив Re 4/4 II (CFF), 8 - локомотив Re 6/6 (CFF) 120 т, 9 - мотор-вагон BOB, 10 - мотор-вагон TSOL або Stadtbahn B

Вантажні поїзди мають різні характеристики, оскільки різні форми кузова та неплоскі стінки збільшують аеродинамічне тертя з турбулентністю.

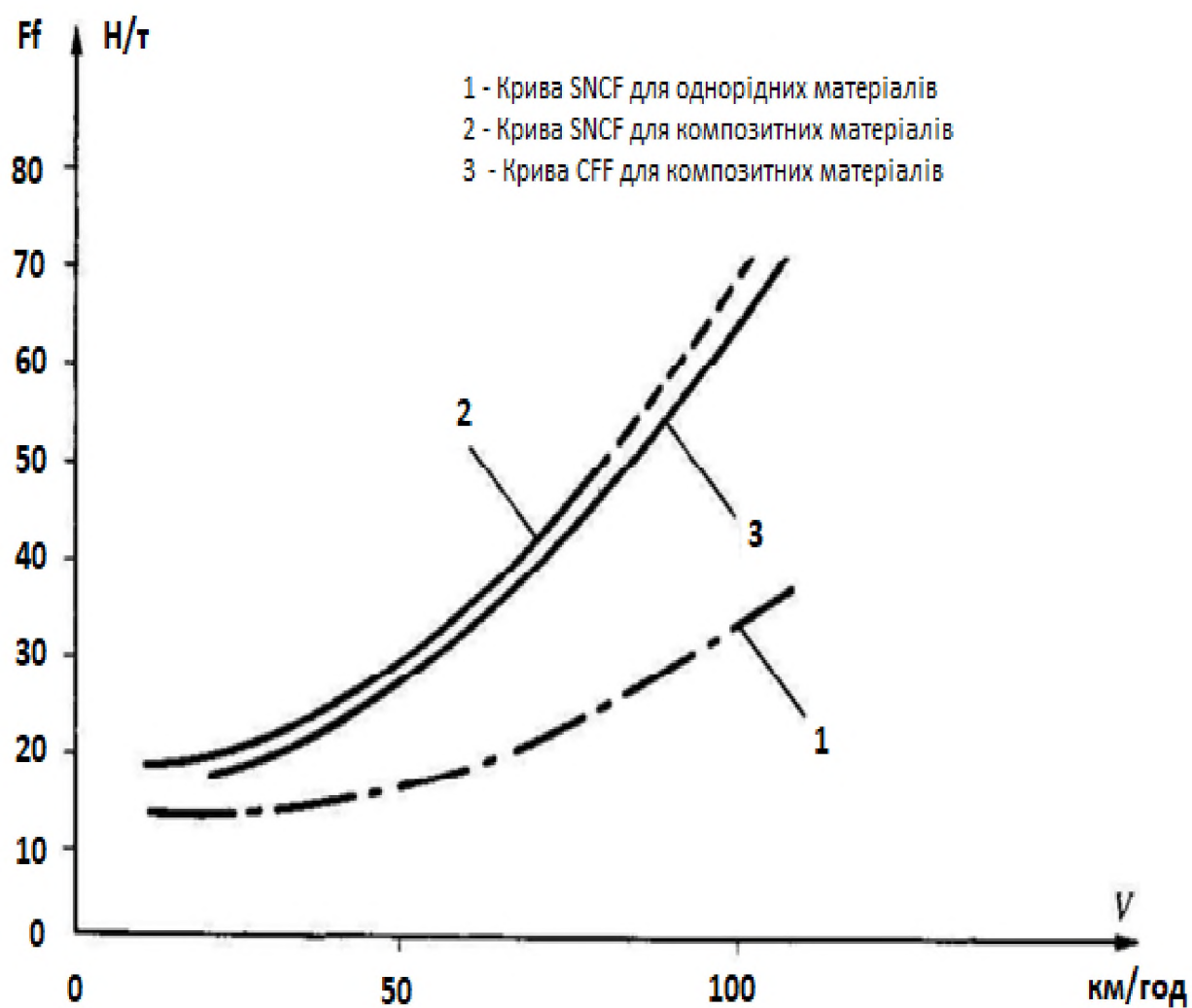


Рис. 3.3 Опір руху вантажних поїздів.

На схилі опір руху розраховується шляхом множення ваги поїзда на кут нахилу i колії, зазначений у таблицях.

Звертаємо увагу, що синус кута замінюється тангенсом кута, що справедливо приблизно до 120%.

$$F_d = mgi10^{-3} \text{ [кН]} (3.3)$$

Якщо маса вимірюється у кілограмах, а не в тоннах, сила виходить у [Н].

Додаткова сила тертя F_c на кривій обмежена на певних ділянках шляху, де радіус кривої малий.

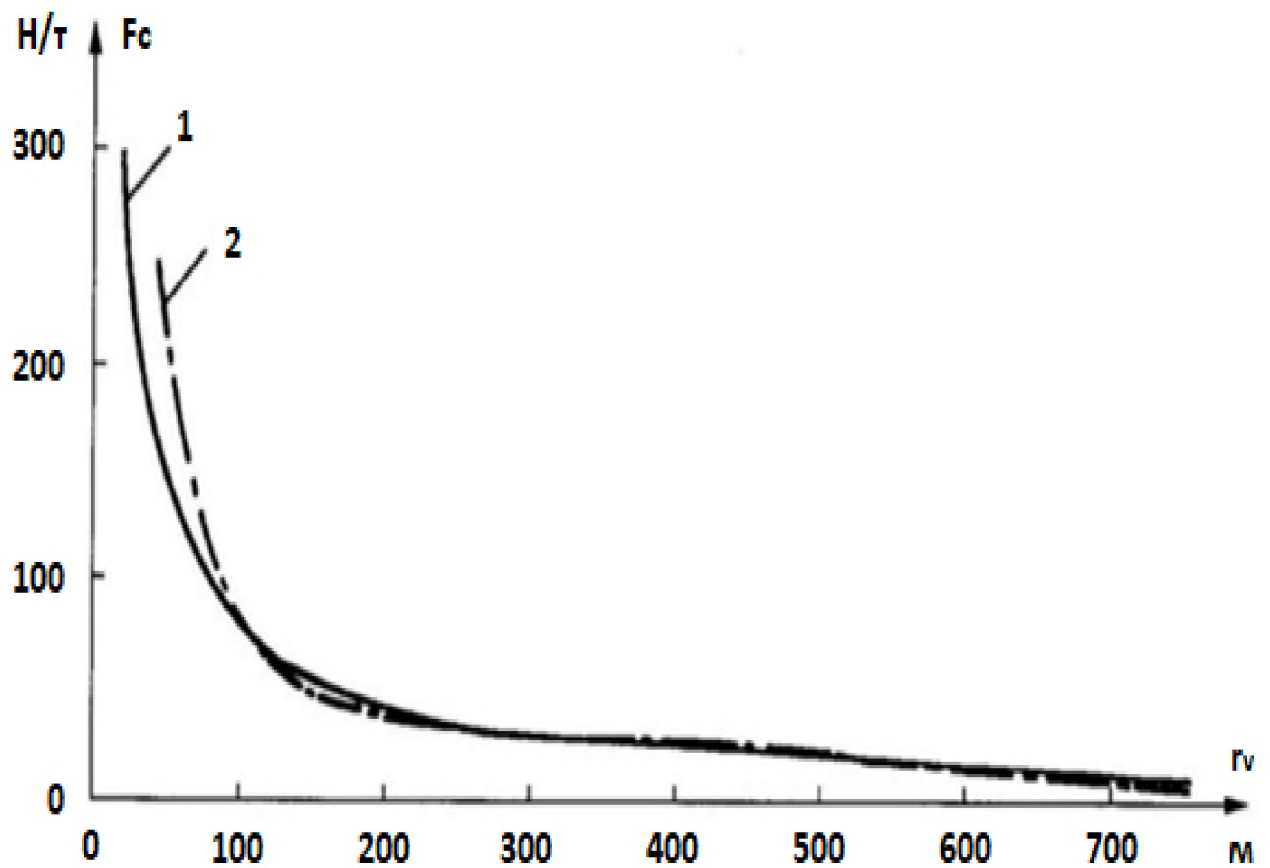


Рис. 3.4 Додатковий рух у кривих на стандартній колії.

Для додаткової сили тертя в тунелі значення « Cv^2 » (рівняння (3.2)) подвоюється в двоколійному тунелі і потроюється в одноколійному.

Це враховує поршневий ефект труби тунелю.

Зверніть увагу, що для прискорення поїзда (3.1) маса вантажу повинна бути збільшена за рахунок обертових мас - коліс, зубчастих коліс, роторів двигунів, - що викликає збільшення маси, позначене коефіцієнтом ξ .

$$m^* = \xi m \quad (3.4)$$

Транспортні засоби		ξ
Локомотив повністю	для зчеплення	1,06 - 1,10
Вагони		1,02 - 1,04
Порожні вагони		1,05 - 1,12
Моторний вагон		1,08 - 1,14
Електровози		1,15 - 1,30
Вагони	Зубчата тяга	1,05 - 1,10
Моторні вагони		1,30 - 2,50
Локомотиви		1,50 - 3,50

Тягове зусилля $Z = F_{\text{in}}$ розраховується на основі крутного моменту M_{m} на валу двигуна, передаточного числа k_{G} , радіуса колеса r_{e} і ККД передачі η_{G} μ

$$Z = \eta_{\text{G}} \frac{M_{\text{m}}}{k_{\text{G}} r_{\text{e}}} 10^{-3} \text{ [kN]} (3.5)$$

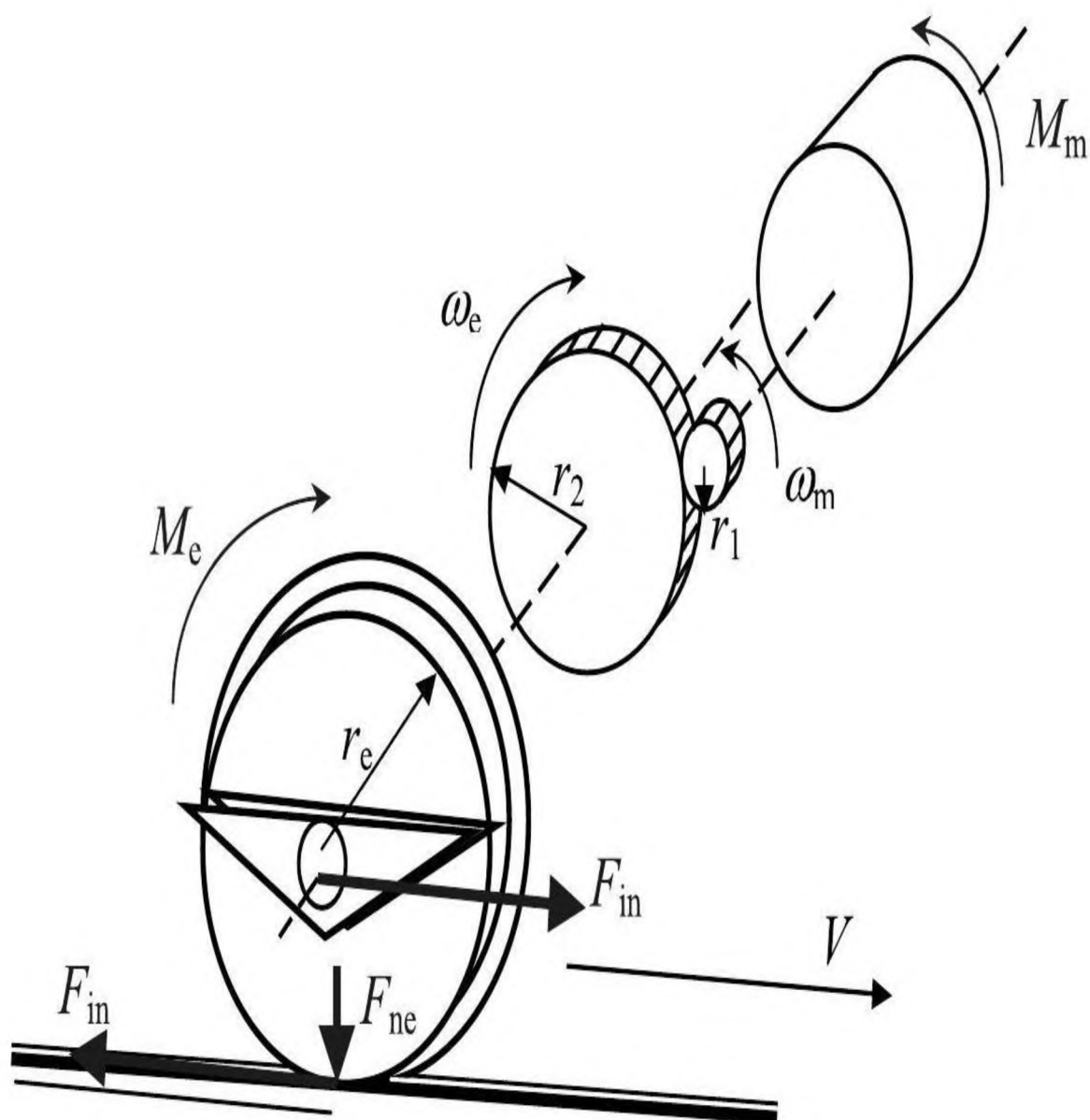


Рис. 3.5 Від обертання до переміщення, при зчепленні.

Через умови зчеплення сталевих коліс зі сталевими рейками тягове та гальмівне зусилля обмежені.

Межа залежить від коефіцієнта зчеплення μ_r та сили, F_{ne} що діє на вісь, перпендикулярну поверхні рейки.

У першому наближенні силу можна вважати рівною чверті ваги чотириколісного локомотива, але вона не є постійною величиною через динаміку візків, кузова та їх підвісок, коли тягове зусилля на зчипці та зусилля на ободах коліс створюють крутний момент.

Коефіцієнт зчеплення залежить від швидкості руху транспортного засобу та швидкості ковзання колеса по рейках за емпіричними законами, описаними на рисунках 3.6 та 3.7.

$$Z < \mu_r F_{ne} \text{ [кН]} (3.6)$$

Якщо умова (3.6) не дотримується, відповідна вісь починає ковзати: цей рух збільшуватиметься, якщо водій або антиковзний пристрій не зменшить різко та швидко крутний момент двигуна.

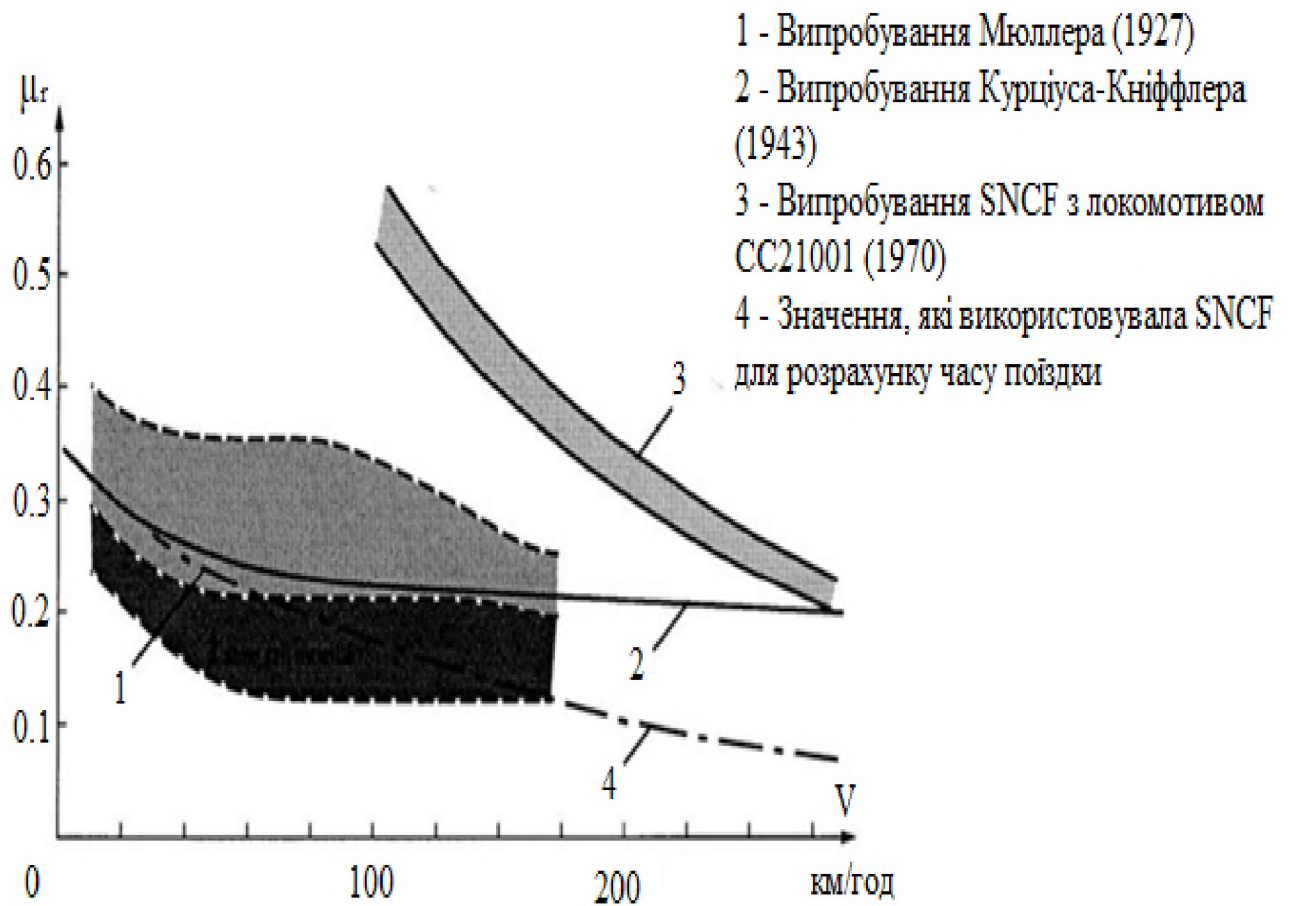


Рис. 3.6. Коефіцієнт зчеплення в залежності від швидкості переміщення.

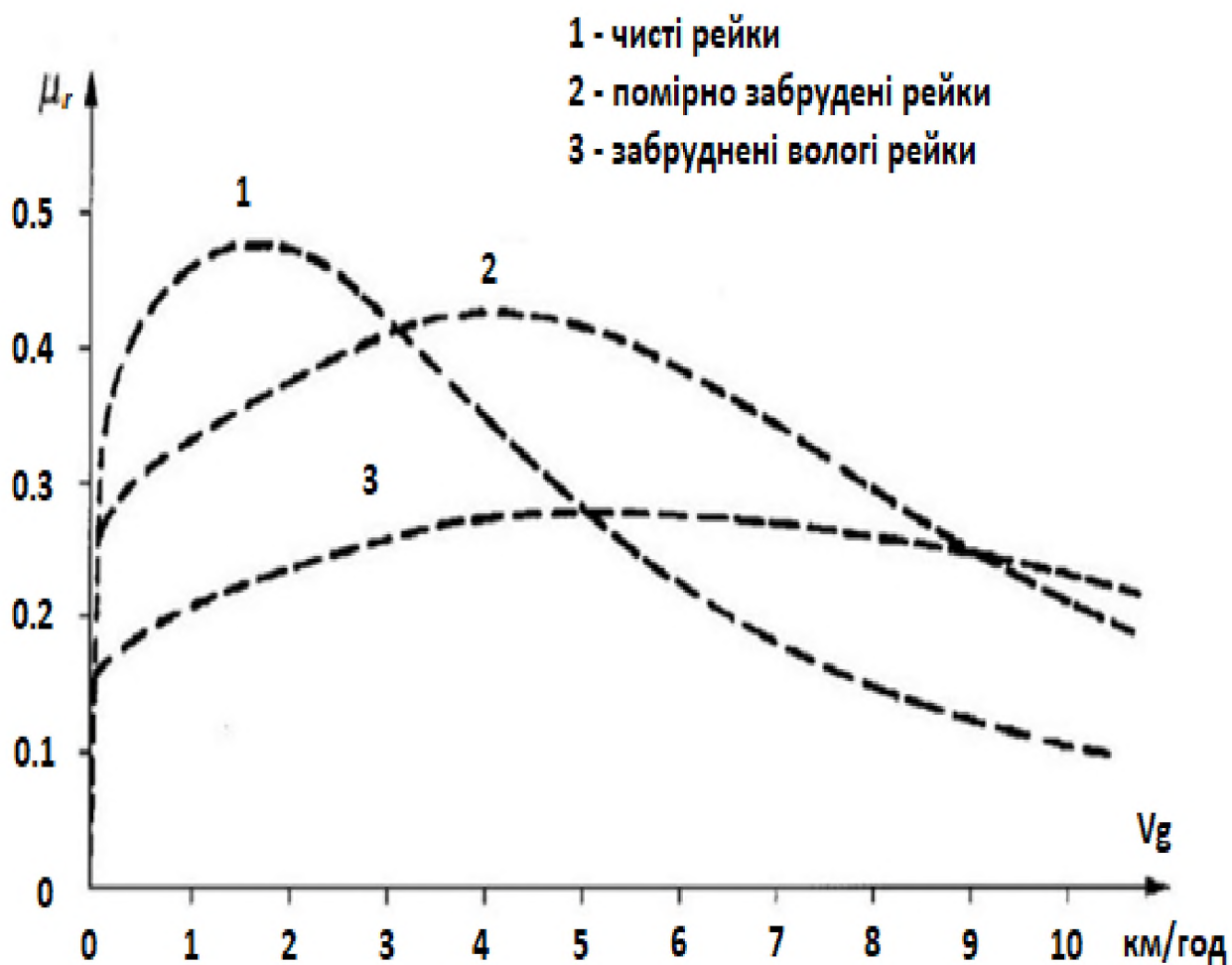


Рис. 3.7 Коефіцієнт зчеплення залежно від швидкості ковзання.

Коефіцієнт зчеплення гумової шини з дорожнім полотном - метро або тролейбуса - приблизно вдвічі вище, ніж у сталевого колеса зі сталевую рейкою, і становить від 0,55 до 0,62 залежно від типу поверхні.

Необхідні максимальні зусилля Z на старті.

$$Z = m * a + F_d + F_f \quad (3.7)$$

SNCF (Національна компанія французької залізниці) використовує емпіричний метод оцінки зусиль з модифікованою рампою i_{corr} .

$$Z = m g i_{\text{corr}} 10^{-3} \text{ [кН]} \quad (3.8)$$

Як приклад наведено значення для вантажного поїзда при прискоренні $0,03 \text{ [м/с}^2\text{]}$:

$$\begin{aligned} i_{\text{corr}} &= 1,225(i + 2,2) & \text{if } i \geq 7[\%] \\ i_{\text{corr}} &= 4,35 + i & \text{if } i < 7[\%] \end{aligned} \quad (3.9)$$

Зчіпне зусилля F_{att} – це зусилля на ободах коліс за вирахуванням необхідного зусилля, що додається до тягового двигуна.

$$F_{\text{att}} = Z - (m_{\text{loc}} * a + F_{d_{\text{loc}}} + F_{f_{\text{loc}}}) \quad (3.10)$$

Зчіпка типу «UIC» розрахована на мінімальне розривне зусилля 850 кН.

Виходячи з цього значення, залізничні оператори використовують запас міцності та встановлюють граничне навантаження (SNCF - 360кН, CFF — 650 кН).

Існують посилені гвинтові зчіпки (граничне зусилля 1350 кН) з тією самою геометрією, що стандартна зчіпка.

З автоматичним зчепленням граничне навантаження досягає 1500 кН.

Висновки

У ході виконання цієї роботи було проведено комплексне дослідження актуальних питань і проблематики електричної тяги на залізничному транспорті, її технічної еволюції, принципів тягових систем та механіки поїздів.

Розглянуто спектр аспектів – від історичного розвитку електрифікації до аналізу роботи тягових електродвигунів та сучасних методів керування.

Було встановлено, що розвиток залізничного транспорту нерозривно пов'язаний з удосконаленням електротехнічних технологій.

Поява трансформаторів, тягових двигунів різних типів, напівпровідникових перетворювачів та систем автоматичного керування сприяла переходу від механічних та теплових форм тяги до повноцінної електричної тяги, яка сьогодні є домінуючою на магістральних та регіональних лініях багатьох країн.

Електрифікація значно підвищила ефективність залізничного транспорту, забезпечивши збільшення швидкості, збільшення пропускну здатності лінії та зниження експлуатаційних витрат.

Виконаний аналіз структури локомотива показав, що він є складною багатoproфільною системою, в якій електричні, механічні та електронні підсистеми взаємодіють для забезпечення необхідних тягових характеристик.

Перетворення електричної енергії в механічну відбувається в кілька етапів, і кожен з них відіграє важливу роль у формуванні загальних показників ефективності.

Використання перетворювачів потужності та автоматизованих систем керування дозволило значно зменшити масу обладнання та підвищити тягові властивості локомотивів.

Протягом виконання досліджень значна увага приділялася механіці руху поїздів.

Було висвітлено, що динаміка залізничного руху визначається дією низки сил: тяги, гальмування, сил опору коченню, аеродинамічного опору, сил від схилів та кривих.

Крім того встановлено, що сучасне проектування тягових систем неможливе без точного врахування цих факторів, оскільки вони впливають як на вибір тягових характеристик, так і на ефективність використання енергії.

Також показано, що інерція обертових мас суттєво впливає на поведінку поїзда під час розгону та гальмування, що вимагає відповідних розрахунків при визначенні тягових сил.

Список використаних джерел

1. Сінчук О. М., Гузов Е. С., Дебелий В. Л., Дебелий Л. Л. Шахтний електровозний транспорт. Теорія, конструкції, електрообладнання : підручник / О. М. Сінчук, Е. С. Гузов, В. Л. Дебелий, Л. Л. Дебелий. — Кривий Ріг : ЧП Щербатих А. В., 2015. — 428 с.
2. Burck W. H. Electric traction : a textbook for students, electrical and mechanical engineers, superintendents of motive power and others. — 1932. — 410 p. — URL: <https://archive.org/details/electrictraction00burc>
3. Schichtel K. Electric Traction — Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. URL: <https://download.e-bookshelf.de/download/0000/6229/93/L-G-0000622993-0002365013.pdf>
4. Rail Baltica. Railway Energy — Part 1: Traction power system. — 2025. — URL: https://www.railbaltica.org/wp-content/uploads/2025/09/RBDG-MAN-018-0103_DG_RailwayEnergyPart1-TractionPowerSystem.pdf
5. European Investment Bank. Technical report on railway traction technologies. — 2019. — URL: https://www.eib.org/attachments/publications/technical_report_on_railway_traction_technologies_en.pdf
6. Khodaparastan M. Recuperation of Regenerative Braking Energy in Electric Rail Systems. — URL: <https://arxiv.org/pdf/1808.05938>
7. Kaleybar H. J. Regenerative Braking Energy and Power Quality Analysis. — URL: https://dl.openaccess.ir/o/pedstc2020/pedstc2020-03080315_191220190524.pdf
8. Sharma P. Regenerative braking — Methods to efficiently use regenerated energy // IJRAET. URL: <https://www.hilarispublisher.com/open->

- [access/regenerative-brakingmethods-to-efficiently-use-regenerated-energy-2332-0796-1000146.pdf](#)
9. Zhu Y. Adhesion in the wheel–rail contact. — Licentiate thesis. — URL: [https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2%3A660774/fulltext01.pdf](#)
 10. ABB. Modular traction motors for railway applications. — URL: [https://library.e.abb.com/public/0d0572aa24b83dc1257b130056f311/Fact%20file%20Application%20note%20medium%20power%20traction%20motor%20Nov09.pdf](#)
 11. Indian Railways. Maintenance handbook on traction motor for AC EMU/MEMU. — URL: [https://indianrailways.gov.in/.../Maintenance%20handbook%20on%20Traction%20Motor.pdf](#)
 12. Power electronics issues of modern electric railway systems. — URL: [https://scispace.com/pdf/power-electronics-issues-of-modern-electric-railway-systems-28zt9hq81s.pdf](#)
 13. MDPI. Advances in Electric Traction System — Special Issue. — URL: [https://www.researchgate.net/publication/367536618_Advances_in_Electric_Traction_System-Special_Issue](#)
 14. Islam M. A. State-of-the-art review of railway traction motors. — URL: [https://scispace.com/papers/state-of-the-art-review-of-railway-traction-motors-for-3fup1hig](#)
 15. Ogunsola A. Electric Traction — Motive Power and Energy Supply. — URL: [https://download.e-bookshelf.de/download/0000/6229/93/L-G-0000622993-0002365013.pdf](#)
 16. Application of regenerative braking on electric rolling stock. — URL: [https://www.researchgate.net/publication/361607024_Application_of_regenerative_braking_on_electric_rolling_stock](#)

- 17.Dwivedi A. A Review on Electric Traction using WE System. — URL:
https://www.researchgate.net/publication/336001910_A_Review_on_Electric_Traction_using_WE_System

- 18.A review on power electronics and drives in electric propulsion system. —
 URL:
https://www.researchgate.net/publication/346079606_A_Review_on_Power_Electronics_and_Drives_in_Electric_Propulsion_System

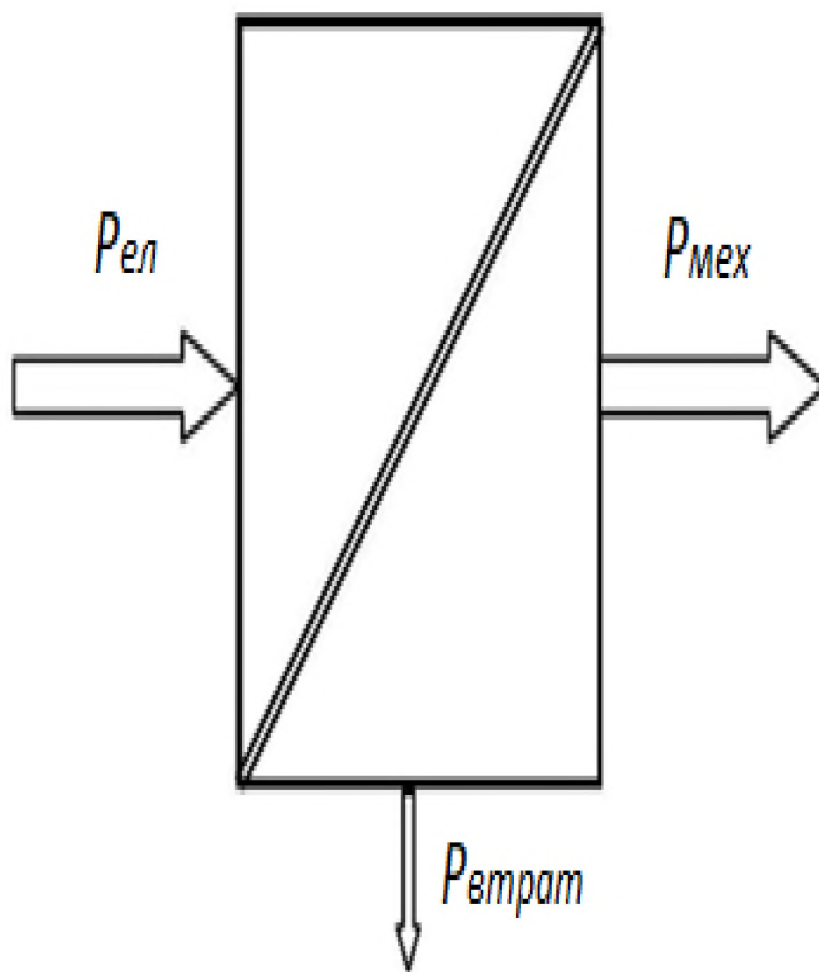
- 19.Hou B. Analysis of power electronic traction transformer. — URL:
<https://www.mdpi.com/2079-9292/13/19/3805>

- 20.Сінчук О. М. Шахтний електровозний транспорт. — Кривий Ріг, 2015.
 — 428 с.— URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/197113588.pdf>

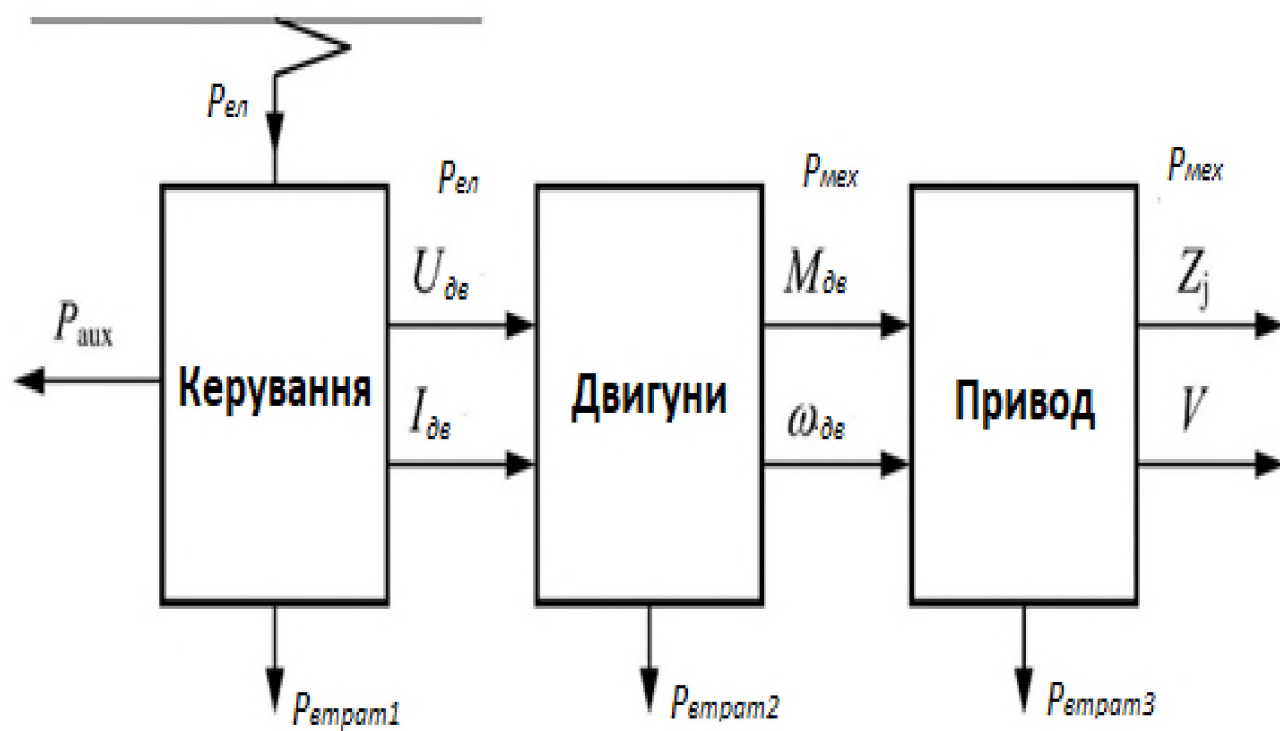
- 21.Miller G. R. Electric traction— URL:
<https://archive.org/details/electrictraction00mill>

Додатки

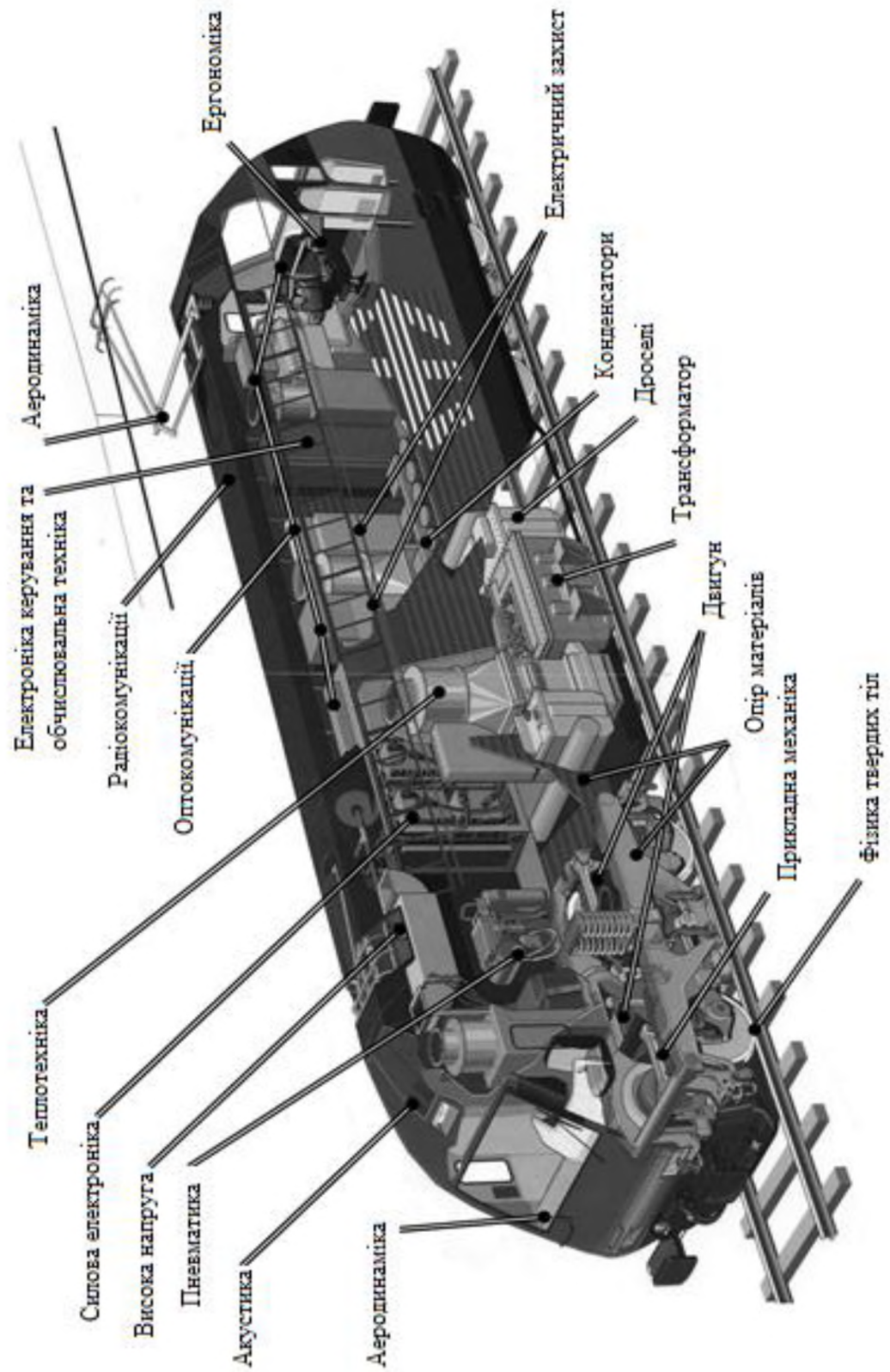
Перетворення потужності



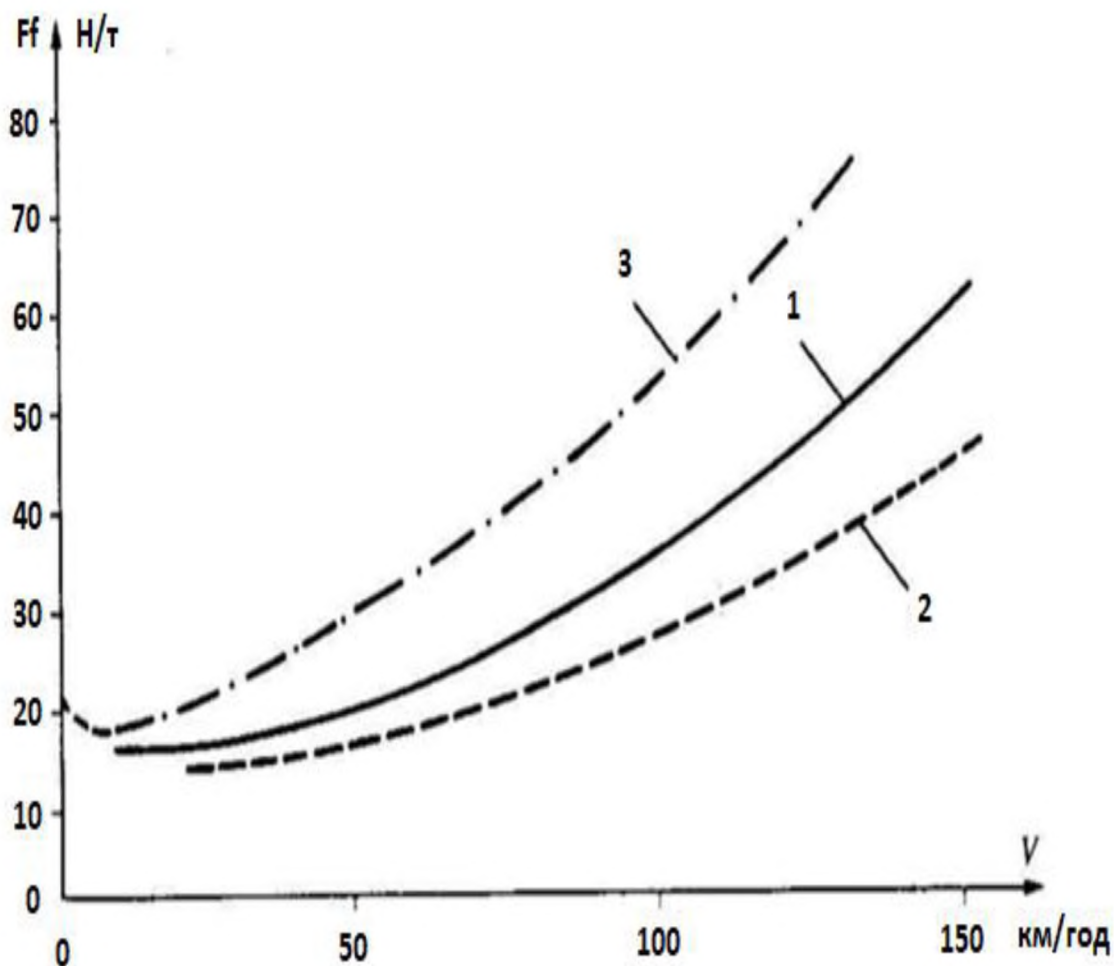
Енергопотоки та потужності в локомотиві в режимі тяги



Локомотив та застосовувані в ньому технології

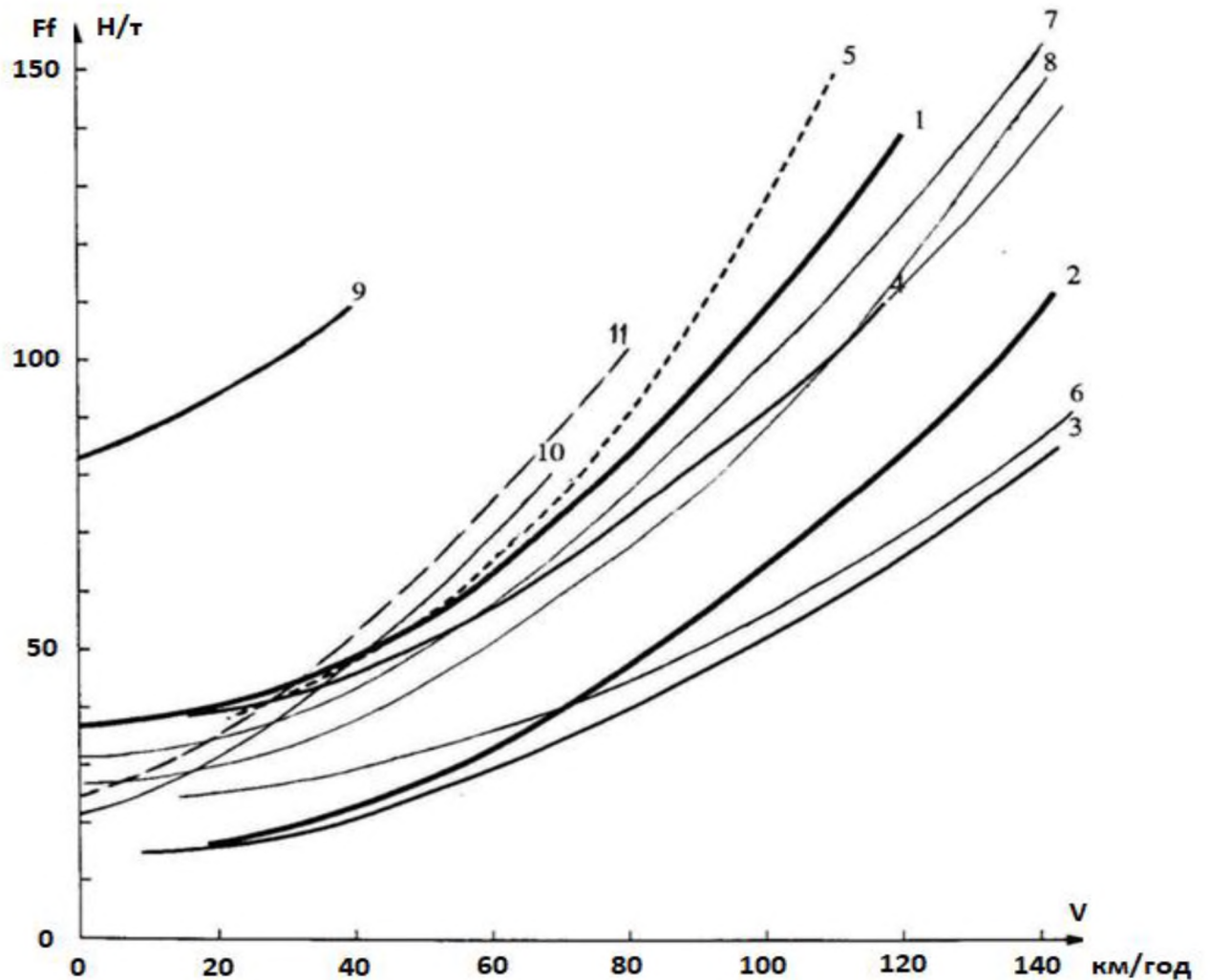


Опір руху пасажирських поїздів



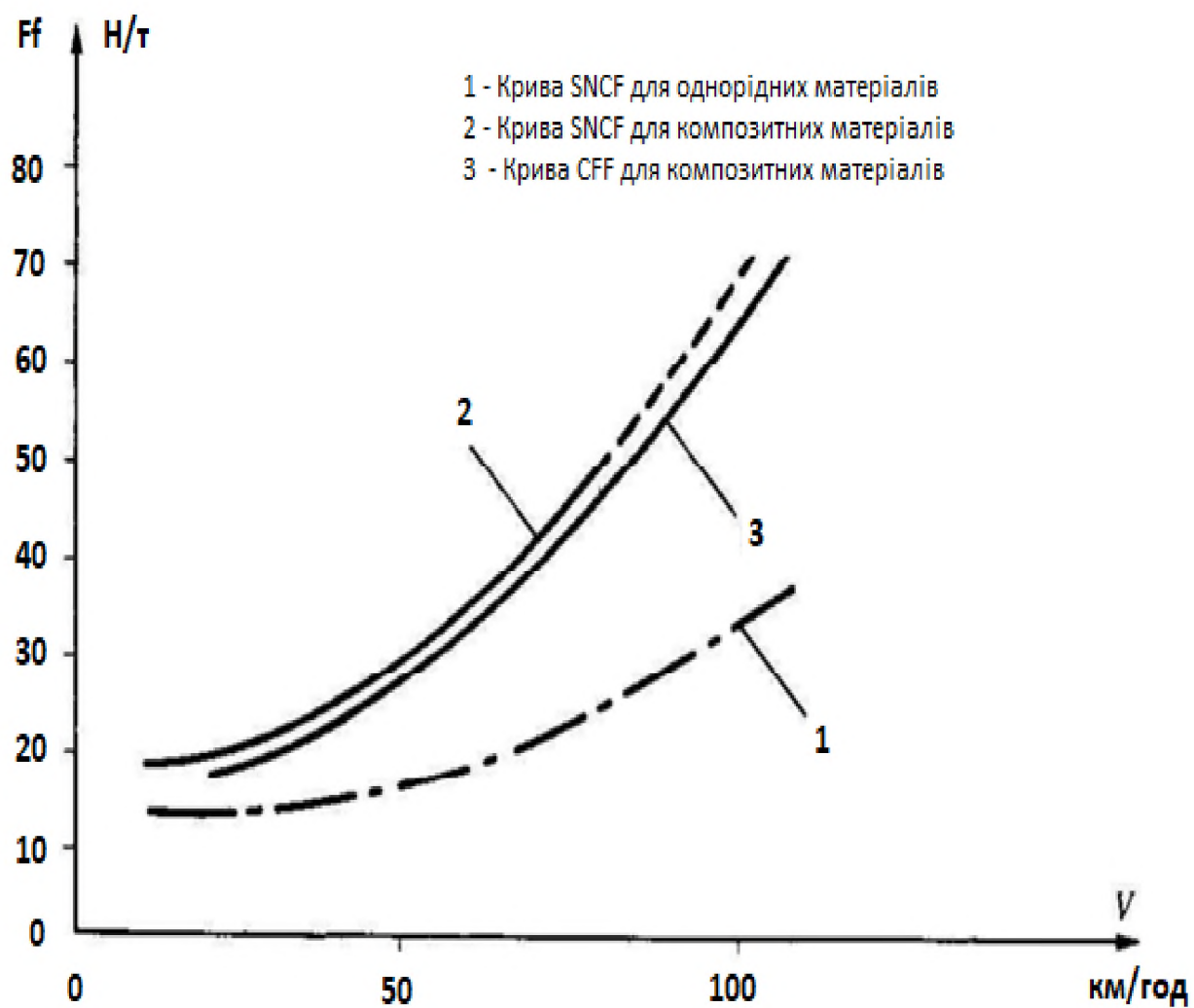
1 - вагон UIC близько 1960 р. (SNCF, CFF, DB, FS), 2 - вагон Corail 1975 р. (SNCF), Eurofima 1980 р. (DB, FS, ÖBB) або VUIV 1985 р. (CFF), 3 - легкий вагон 1940 р

Опір руху транспортних засобів

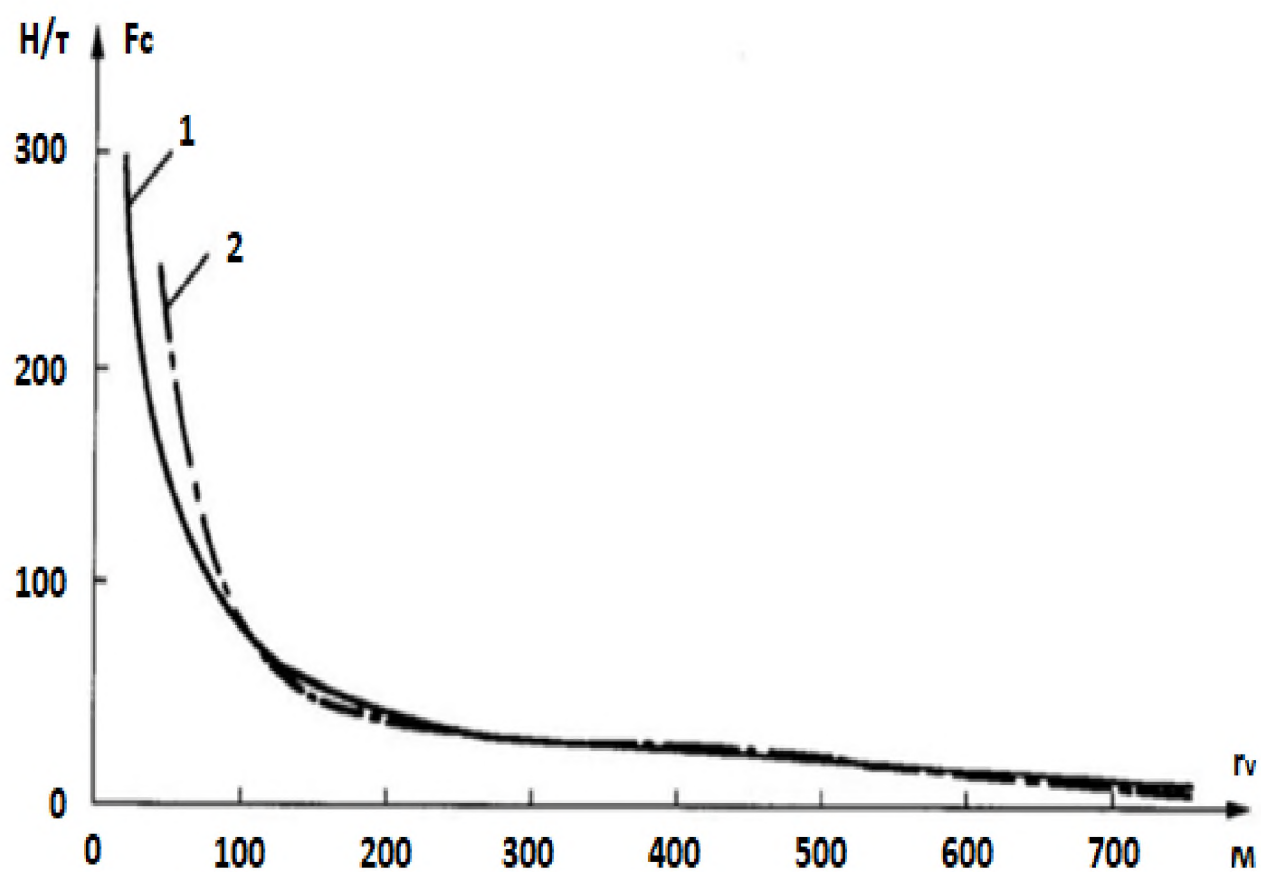


1 - локомотив Ae 6/6 (CFF) 120 т, 2 - локомотив 9001 (SNCF) 80 т, 3 - локомотив 6001 (SNCF) 120 т, 4 - локомотив Am 4/6 (CFF Re460), 5 - локомотив 2D2 (PO), 6 - локомотив BBB (FS), 7 - локомотив Re 4/4 II (CFF), 8 - локомотив Re 6/6 (CFF) 120 т, 9 - мотор-вагон BOB, 10 - мотор-вагон TSOL або Stadtbahn B

Опір руху вантажних поїздів



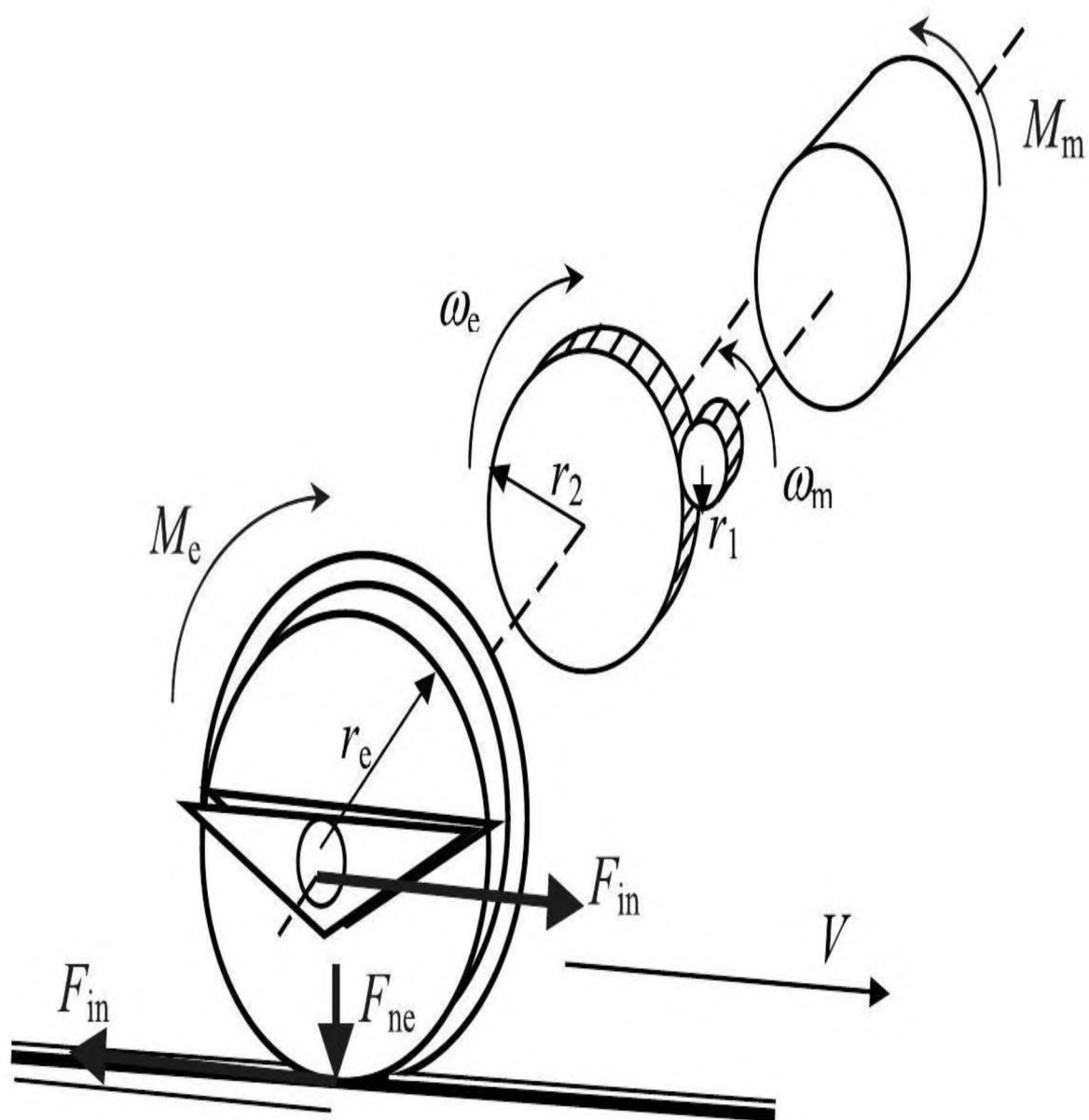
Додатковий рух у кривих на стандартній колії



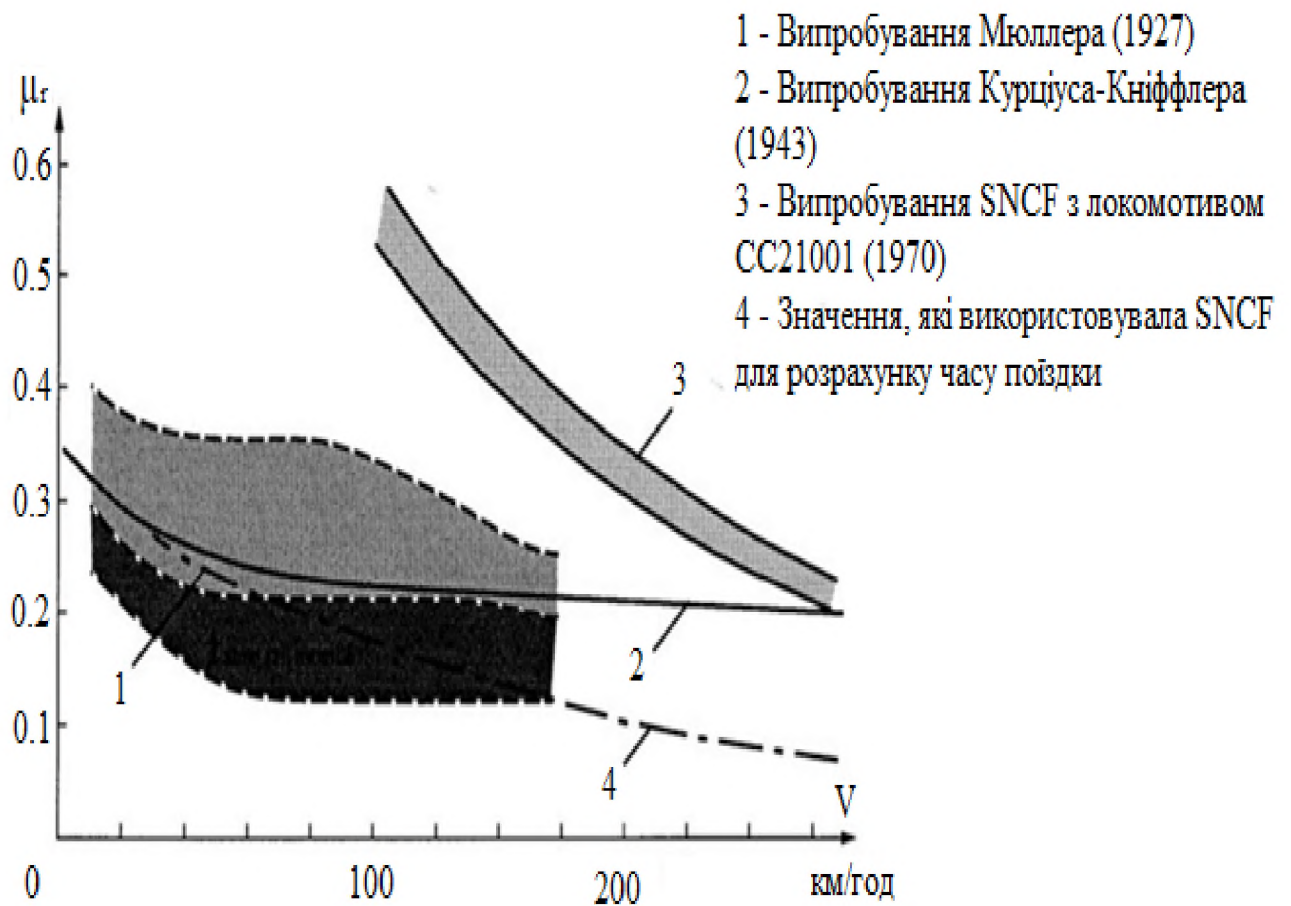
збільшення маси за рахунок обертових мас - коліс, зубчастих коліс,
роторів двигунів

Транспортні засоби		ξ
Локомотив повністю	для зчеплення	1,06 - 1,10
Вагони		1,02 - 1,04
Порожні вагони		1,05 - 1,12
Моторний вагон		1,08 - 1,14
Електровози		1,15 - 1,30
Вагони	Зубчата тяга	1,05 - 1,10
Моторні вагони		1,30 - 2,50
Локомотиви		1,50 - 3,50

Від обертання до переміщення, при зчепленні



Коефіцієнт зчеплення в залежності від швидкості переміщення



Коефіцієнт зчеплення залежно від швидкості ковзання

