

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. Бекетова**

ПРИСВЯЧУЄТЬСЯ СТОРІЧЧЮ ХНУМГ ім. О. М. БЕКЕТОВА

К. О. СОРОКА

**ТЯГОВІ РОЗРАХУНКИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСІВ
ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ**

Монографія

Харків

ХНУМГ ім. О. М. Бекетова

2022

УДК 629.3+629.43]:681.11.031]:001.891

C65

Автор

Костянтин Олексійович Сорока, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент

Рецензенти:

Василь Хомич Далека, доктор технічних наук, професор кафедри електричного транспорту ХНУМГ ім. О. М. Бекетова;

Олександр Миколайович Петренко, доктор технічних наук, професор кафедри електричного транспорту ХНУМГ ім. О. М. Бекетова;

Євгеній Олександрович Гаєв, доктор технічних наук, професор кафедри аерокосмічних систем управління НАУ. Член постійної комісії НАН України з оцінювання ефективності діяльності наукових установ. Секція фізико-технічних і математичних наук;

Андрій Михайлович Афанасов, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Електрорухомий склад залізниць» ДНУЗТ ім. В. Лазаряна;

Андрій Вікторович Гнатов, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільної електроніки ХНАДУ;

Микола Григорович Тарасенко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричної інженерії ТНТУ ім. І. Пулюя;

Айдин Зураб огли Мурадалієв, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Азербайджанського НДПДІ Енергетики у Баку.

*Рекомендовано до друку вченою радою ХНУМГ ім. О. М. Бекетова,
протокол № 12 від 30 серпня 2021 р.*

Сорока К. О.

C65 Тягові розрахунки на основі аналізу процесів перетворення енергії : монографія / К. О. Сорока ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 243 с. (Присвячується сторіччю ХНУМГ ім. О. М. Бекетова)

ISBN 978-966-695-582-4

Виконано аналіз відомих підручників та монографій з дисципліни «Теорія електричної тяги». Відмічені недоліки та запропонована модель транспортного засобу як матеріального тіла замість моделі матеріальної точки. Як математичний апарат використано рівняння Лагранжа II роду. Розглянуто кінематику, діючі сили та динаміку руху транспортних засобів. Спрощені методи тягових розрахунків та збільшена їхня точність. Розширене коло завдань, які вирішує теорія. Розрахунки повністю приведені до міжнародної системи одиниць СІ.

Рекомендовано для фахівців і науковців, які працюють у галузі електричного транспорту, а також викладачам, аспірантам, студентам навчальних закладів та всім, хто цікавиться питаннями роботи електричного транспорту.

УДК 629.3+629.43]:681.11.031]:001.891

ISBN 978-966-695-582-4

© К. О. Сорока, 2022

© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ВІДОМІ МЕТОДИ ТЯГОВИХ РОЗРАХУНКІВ	7
1.1 Теорія електричної тяги як прикладна наукова дисципліна.....	7
1.2 Відомі методи тягових розрахунків.....	16
Висновки до розділу.....	24
2 ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РІЗНИХ ВИДІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ	26
2.1 Теорія електричної тяги.....	26
2.2 Міський електричний транспорт. Трамвай.....	28
2.3 Тролейбус.....	32
2.4 Метрополітен.....	36
2.5 Магістральні залізниці.....	38
2.6 Приміські електропоїзди.....	42
2.7 Високошвидкісний електричний транспорт.....	43
2.8 Транспортна інфраструктура і розвиток високошвидкісного транспорту.....	54
Висновки до розділу.....	56
3 ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ТА РІВНЯННЯ ЛАГРАНЖА II РОДУ	58
3.1 Загальні положення.....	58
3.2 Аналіз математичної моделі руху транспортних засобів.....	70
3.3 Приведення тягових розрахунків до системи СІ.....	73
3.4 Концептуальна та математична моделі руху транспортних засобів як матеріального тіла.....	76
Висновки до розділу.....	82
4 КІНЕМАТИКА ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ. РІВНЯННЯ ЛАГРАНЖА II РОДУ ДЛЯ КОНСЕРВАТИВНИХ СИСТЕМ.....	85
4.1 Кінематична схема засобу електричного транспорту.....	85
4.2 Приведення обертального руху двигуна до поступального.....	88
4.3 Рівняння кінематики транспортного засобу.....	90
4.4 Виконання розрахунків із урахуванням профілю шляху.....	99
4.5 Швидкість вільного руху ТЗ. Кінематика.....	103
4.6 Врахування зміни ваги під час руху транспортного засобу на опуклих та увігнутих ділянках шляху.....	106
4.7 Вплив дефектів дороги на рух транспортних засобів.....	114
Висновки до розділу.....	118

5 ДИНАМІКА ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.....	120
5.1 Огляд методів вивчення динаміки руху транспортних засобів.....	120
5.2 Рівняння Лагранжа II роду для дисипативних систем.....	122
5.3 Вибір узагальнених координат.....	130
5.4 Аналіз діючих сил.....	136
5.5 Утворення рушійної сили тяги.....	139
5.6 Аналіз сил, що виникають під час взаємодії колеса з дорогою.....	142
5.7 Сили опору руху. Сили тертя.....	144
5.8 Зміна ваги транспортного засобу під час його руху по шляху зі складним профілем.....	145
5.9 Сили, що діють на поворотах шляху в плані.....	151
5.10 Спряження кривих у плані.....	162
5.11 Сили, зумовлені взаємодією транспортного засобу та навколишнього повітря.....	168
5.12 Сили Коріоліса.....	170
5.13 Інші сили.....	176
5.14 Гальмівні сили.....	177
5.15 Обертальний рух транспортних засобів.....	178
Висновки до розділу.....	188
6 ТЯГОВІ РОЗРАХУНКИ.....	191
6.1 Вступ.....	191
6.2 Виконання тягових розрахунків відомими методами.....	192
6.2.1 Аналіз та підготовка параметрів шляху та розбиття його на розрахункові ділянки.....	192
6.2.2 Аналіз і подання діючих сил тяги.....	195
6.2.3 Інтегрування рівнянь руху та вирішення практичних завдань.....	197
6.3 Виконання тягових розрахунків відповідно до запропонованого методу з використання механіки Лагранжа.....	198
6.3.1 Основні етапи тягових розрахунків відповідно до запропонованого методу.....	198
6.3.2 Постановка завдань досліджень та розробка концептуальної моделі руху.....	200
6.3.3 Вивчення та аналіз характеристик транспортних засобів.....	201
6.3.4 Аналіз та підготовка параметрів шляху відповідно до запропонованого методу.....	201
6.3.5 Опис сил тяги.....	205

6.3.6 Підготовка до тягових розрахунків. Подання сил тяги математичними формулами.....	207
6.3.7 Розрахунок лагранжіана.....	209
6.4 Приклад виконання тягових розрахунків.....	212
6.4.1 Визначення сили тертя.....	212
6.4.2 Визначення сили опору повітря.....	212
6.4.3 Гальмівні сили.....	214
6.5 Одержання рівняння руху тролейбуса на основі рівняння Лагранжа II роду.....	215
6.6 Інтегрування рівняння руху.....	217
6.7 Аналіз одержаних результатів.....	227
ВИСНОВКИ.....	229
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	232

ВСТУП

Сучасні інформаційні технології кардинально змінюють навколишній світ: спілкування людей, глобалізацію суспільства, освоєння комічного простору, функціонування технічних пристроїв. У сучасних транспортних засобах (далі – ТЗ) ефективно впроваджуються передові інформаційні технології. Із розвитком електроніки електронні елементи поступово замінюють систем керування транспортними засобами. У ТЗ встановлюється все більше електронних елементів та ліній зв'язку між ними. Розрізнена електроніка ускладнює ТЗ, їхню конструкцію, обслуговування та роботу водія. На перше місце виходить забезпечення інтерфейсів між окремими механізмами ТЗ та керування їхньою роботою. Розвиток інформаційних технологій, комп'ютерної техніки та телекомунікаційних технологій, поява інтернету спричинили створення локальних комп'ютерних мереж. Вони дозволяють об'єднати всі електронні елементи ТЗ в єдину систему й забезпечити її роботу за централізованого або децентралізованого керування за допомогою бортових комп'ютерів та контролерів. Комп'ютери обробляють інформацію про стан дороги й дорожню ситуацію, даних, що надходять від датчиків, про поточний стан механізмів ТЗ і здійснюють адаптивне, інтелектуальне керування. Комп'ютерна мережа ТЗ передає інформацію датчиків про поточний стан у бортовий комп'ютер (контролер). Комп'ютер обробляє інформацію та приймає рішення про подальший рух ТЗ відповідно до команд водія та наявної в його пам'яті інформації про шлях руху та навколишнє середовище.

Упровадження інформаційних технологій для керування рухом ТЗ, насамперед, вимагає точних методів тягових розрахунків, які б дозволили оперативно, у момент здійснення певного маневру, розраховувати подальший рух ТЗ і прогнозувати події, які можуть відбутись на шляху руху. Для цього потрібна досконала теорія електричної тяги й методи тягових розрахунків. На жаль, сучасний стан теорії електричної тяги, поданий в підручниках і нормативних документах, не розрахований на виконання таких завдань, не повністю задовольняє сучасним вимогам. Тому ця робота присвячується перегляду та вдосконаленню теоретичних основ електричної тяги й розробці відповідних методів тягових розрахунків.

1 ВІДОМІ МЕТОДИ ТЯГОВИХ РОЗРАХУНКІВ

1.1 Теорія електричної тяги як прикладна наукова дисципліна

За характером спрямованості й безпосереднім відношенням до практики науки прийнято поділяти на фундаментальні та прикладні. Фундаментальні науки – це сфера наукових досліджень, спрямованих на пошук основних законів природи, розумінні будови Всесвіту, місця людини у світі. Завданням фундаментальних наук є вивчення об'єктів, явищ, які знаходяться на межі відомого та невідомого. Це вивчення призначене для відкриття нових явищ, нових залежностей, встановлення закономірностей у невивчених галузях. У зв'язку з цим результати фундаментальних досліджень відрізняються непередбачуваністю, невизначеністю кінцевого результату. Вони є основою подальшого розвитку науки та визначають напрямки наукового й технічного прогресу. Фундаментальні науки постійно відкриті для нових ідей та підходів, у них закладена здатність переглянути звичні уявлення про навколишній світ і, в разі потреби, відмовитися від деяких відомих і загально прийнятих постулатів. Фундаментальні науки утворюють базис усього наукового знання навколишнього світу. До фундаментальних наук належать філософія, математика, розділи фізики, космологія, біологія, генетика, економічна теорія, та інші.

В основі кожної науки лежать наукові поняття, постулати, аксіоми. Фундаментальні науки оперують фундаментальними поняттями, до яких належать: час, простір, матерія, маса, енергія, інформація та ін. Особливістю фундаментальних понять є те, що вони не зводяться до інших і їм не можна дати чіткого, однозначного визначення. Вони відповідають тому, що не можна звести ні іншого, вже відомого. Використовуючи мову, ми визначаємо одне поняття через інші. Словами можна тільки описати те, що порівнюється з іншим, близьким по суті або суттєво протилежним за певною ознакою. А як, наприклад, порівняти два фундаментальні поняття час та інформація, або простір і матерію? Фундаментальні поняття визначаються тільки шляхом пояснення, тлумачення того, що саме мається на увазі. З розвитком науки таким поняттям присвоюється певний термін, зміст якого проявляється в тлумаченні, в розумінні певного поняття. Фундаментальні поняття у своїй сукупності створюють базис науки, і в них описуються сутності об'єктивного світу, суспільства та мислення взагалі, які не можна звести до інших. Їхня основна мета – пошук істини, яку потім можна застосовувати у практиці, спираючись на результати досліджень у галузі фундаментальних і прикладних наук.

Оскільки фундаментальні поняття визначаються тлумаченням змісту, вони не сприймаються однаково усіма, хто їх використовує. Існує різний рівень сприйняття. Провідні вчені мають один рівень, початківці у науці – інший, спеціалісти різних професій сприймають по-різному. Є науковий та побутовий рівень сприйняття. Наприклад, такі вчені, як І. Ньютон, М. Фарадей, Г. А. Лоренц, А. Ейнштейн, Н. Бор сприймали поняття матерії, часу та простору по-різному. У міру розвитку науки, глибокого проникнення в сутність навколишнього світу, змінюється зміст окремих понять, вони доповнюються деталями, взаємозв'язками, а іноді навіть замінюються іншими поняттями. Наприклад, на основі спеціальної теорії відносності розвивається космологія, появляються такі поняття, як чорна матерія та чорна енергія, нові об'єкти: квазари, чорні діри та ін. Між простором і часом, електромагнітним і гравітаційним полями встановлюються глибокі зв'язки. Люди пізнають світ дедалі глибше. Фундаментальні науки визначають найзагальніший, всеосяжний рівень. Він визначає цілісний підхід до всіх одержаних людством знань, охоплюючи максимально можливу кількість накоплених фактів, підводить їхню фундаментальну основу до єдиної точки зору.

Прикладні науки, розвиваючись на базі фундаментальних, розробляють шляхи та методи застосування та впровадження у практику результатів фундаментальних досліджень. Показником ефективності дослідження в галузі прикладних наук є не стільки отримання істинного знання, скільки безпосереднє практичне значення [1, 2].

Прикладні науки використовують свої поняття, які виражаються через фундаментальні. Це, наприклад: вага, швидкість, прискорення, шлях, струм, напруга та ін. Кожне поняття прикладної науки має чітке визначення на основі фундаментальних. Воно виражається певним терміном, який має чітко окреслений зміст. Це, зазвичай простіші, чітко встановлені поняття, виражені в наукових термінах. У процесі їхнього використання не виникає проблема тлумачення, важливе тільки належне використання та одержання потрібного результату. Одержані результати повинні підтверджуватись практикою. Якщо результати не підтверджуються, то це зазвичай сприймається помилкою в дослідженні.

У фундаментальній науці одержання негативного, достовірно підтвердженого результату завжди сприймається як крок уперед. Негативний результат відкидає одну гіпотезу та стимулює пошук іншої, у такий спосіб наближаючи до істини. У прикладних науках негативний результат – це відсутність практичної користі від виконаної роботи, це поганий результат.

Розбіжність між фундаментальними та прикладними науками, однак, не така вже велика. Діалектика розвитку належить однаково й до одних наукових дисциплін, і до інших. Наприклад, у прикладній електротехніці поняття електричного струму спочатку було обмежене, але чітко визначене, а саме: це направлений потік заряджених частинок у провіднику. Пізніше, у дослідженнях змінного струму, одержано, що він проходить його через ізолятор. У працях М. Максвелла вводиться поняття струмів заміщення, у ролі яких розглядаються явища поляризації діелектриків. У подальшому, з розвитком теорії електромагнітного поля на основі рівнянь Максвелла, з'являється поняття вектора Умова – Пойтинга, який описує передачу енергії електромагнітним полем. За такого підходу провідник, яким тече струм, виступає як напрямний стрижень, а енергія передається електромагнітним полем, яке оточує провідник. Розглянуті особливості електромагнетизму доволі яскраво проявились на прикладі прокладання першого трансатлантичного кабелю зв'язку. Перші спроби ввести в дію кабель виявились малоефективними. Коротку телеграму із 103 слів передавали 16 годин [3]. Підвищити ефективність кабелю намагались шляхом збільшенням напруги, оскільки це впливало з уявлень, що струм – це потік частинок, аналог із потоком води, а напруга – тиск, збільшивши яку, можна примусити струм текти як потрібно. У результаті кабель вийшов із ладу. Лише подальші дослідження, розробки, уточнення деталей передачі електричної енергії по довгих лініях дозволили домогтися ефективного функціонування заново проложених трансатлантичних кабелів.

Зараз електромагнітне поле, згідно зі спеціальною теорією відносності, описується за допомогою чотиримірних тензорів електромагнітного поля. Встановлено взаємозв'язки електромагнітного та гравітаційного полів [4]. Експериментально виявлені гравітаційні хвилі [5]. Виконані спостереження за гравітаційними хвилями, які випромінювались при злитті подвійних чорних дір. Дослідження дозволили вивчати явища, які відбуваються в найбільш віддалених областях всесвіту. Віддаль до однієї події 1,3 млрд, а до іншої – 3 млрд світлових років [6].

Наведений вище приклад показує, що розвиток фундаментальних наук створює умови розвитку прикладних. Фундаментальні наукові дисципліни є базою, на основі якої розвиваються прикладні науки. На сьогодні майже кожна галузь прикладної науки поєднує фундаментальні та прикладні знання.

Розвиток науки спирається на емпіричні дані, на знання, отримані в практичній діяльності та експериментальних дослідженнях і теоретичних узагальненнях. Основою наукових знань є дослід, експеримент, практика. Дослідження проводяться з метою узагальнення життєвого досвіду,

конкретизації отриманих практичних результатів. Отримані знання істинні й достовірні тільки тоді, коли вони спираються на досліди і підтверджуються практикою.

Фундаментальні науки спрямовані на пізнання основ і об'єктивних законів розвитку природи. Критерієм істинності знань є практика. Знання узагальнюються спочатку в прикладних науках і глибше аналізуються у фундаментальних, входячи як компонент знань, здобутих людством.

Наукові знання розвиваються на основі двох процесів, а саме: диференціації та інтеграції. У процесі диференціації від загальноприйнятих фундаментальних понять переходять до конкретніших. Наприклад, поняття руху включає відстань, швидкість, прискорення, поняття сили – близькодію та далекодію, величину та напрямок, тощо. Процеси диференціації важливі у науковому пізнанні світу. Завдяки процесам диференціації відбувається розмежовування на окремі наукові дисципліни, такі як: фізика, біологія, хімія, філософія, соціологія, та ін. Окремі наукові дисципліни, наприклад фізика, розділяються на: механіку, електротехніку, теплотехніку, теорію відносності, квантову механіку та ін. З'являються такі дисципліни, як теорія пружності, електричні машини, електроніка, механотроніка, електромехатроніка та ін.

При диференціації уточнюються деталі щодо вузьких сфер знань, наукових напрямів. Кожна прикладна дисципліна має обмежену сферу застосування й обмежену кількість понять. Усі поняття прикладної дисципліни повинні становити повну й достатню систему, яка дозволяє охопити сферу її визначення. З розвитком прикладних наук поняття уточнюються, деталізуються, доповнюються новими. Наприклад, електротехніка доповнилась такими поняттями, як хвильові властивості електрона, квант, тунельний ефект та інші. Вони увійшли в повсякденну практику роботи спеціалістів електротранспорту. Електронні елементи на основі тунельного ефекту використовуються під час розробки перетворювачів електричного струму в електроприводах транспортних засобів, у системах керування електричними машинами та засобами транспорту загалом.

Прикладні наукові дослідження – це дослідження, спрямовані на досягнення практичних цілей, на виконання конкретних завдань практики. Їхнє завдання: отримати конкретні результати і вирішити проблему, що виникає у практичній діяльності. Вони, на початкових стадіях розвитку, можуть не повністю відповідати фундаментальним. Тому прикладні наукові дисципліни можуть використовувати й оперувати поняттями, які фундаментальні наукові дисципліни не підтримують. Стосовно теорії електричної тяги – прикладної наукової дисципліни, то у ній використовується поняття «вага» як міра

кількості речовини там, де повинна бути маса тіла. Так, таке уявлення існувало й доволі широко використовувалося. Це застаріле, неправильне визначення, без врахування того, що вага – це сила, векторна величина, у той час як маса – скалярна. На основі цього поняття були побудовані системи одиниць вимірювання. На практиці таке визначення ваги дозволяє одержати результати, які задовольняли практику експлуатації засобів транспорту. Результати розрахунків, виконані у відносних одиницях, що дорівнюють модулю вектора діючої сили, поділеному на вагу (якими б дивними не були б ці одиниці), використовуються в практиці експлуатації та практиці виробництва засобів електротранспорту на протязі століття й дають значення, що задовольняють технічним вимогам. Проте при переході до більш високого ступеня розвитку, сучасного рівня вимог точності розрахунків та аналізу режимів руху, наприклад швидкісних електричних залізних поїздів або інших видів електричного транспорту, як то розважальні електричні дороги типу «американських гірок», без наукового розуміння й аналізу діючих сил, аналізу ваги тіла як одночасного прояву дії сил гравітації та інерції (не як еквівалента маси), обійтись не можна.

Під впливом розвитку техніки, появи та розвитку транспорту спочатку на паровій тязі, а потім на електричній, наприкінці XVIII – початку XIX століття, відбувались інтенсивні процеси диференціації наук. Починається епоха технічного прогресу, з'являється науковий напрям «Теорія тяги» і «Теорія електричної тяги». На наступних етапах наукові напрями об'єднуються, наприклад з'являється напрям «Електромеханіка», «Теорія електроприводу». Технічний прогрес продовжується в XX столітті, і виникають такі фундаментальні дисципліни, як теорії відносності та квантова механіка. Під їхнім впливом уточнюються поняття маси та імпульсу, електромагнітного й гравітаційного поля, хвильові та квантові властивості фундаментальних одиниць світобудови. Закладається фундамент електроніки, на основі якої розвивається мікропроцесорна техніка. З розвитком мікроелектроніки, комп'ютерної техніки розвивається робототехніка, зароджуються такі прикладні дисципліни, як «Механотроніка» і «Електромехатроніка».

Проте процес диференціації наук має і недоліки. Взаємна розрізненість різних галузей науки й техніки є гальмом прогресу. Методи мислення, які використовувані у різних галузях науки й техніки, часто не мають достатніх точок дотику. Це властиво технічним наукам, зокрема й для теорії електричної тяги. Природний процес диференціації наук і поглиблення знань у конкретній науковій галузі супроводжується невинуватим їхнім розділенням. Останнім часом намітився розрив теорії автомобільної та електричної тяги, електричної тяги засобів міського електричного та залізничного транспорту. У технічних

вишах на кафедрах електротранспорту викладають питання, що стосуються лише трамвая та тролейбуса, а про залізничний транспорт майже не згадують, а в транспортних вишах, навпаки, розглядають питання тяги тільки в залізничному транспорті. Обмеженість викладання у технічних вишах тільки окремих спеціальних наукових дисциплін призводить до обмеженості спеціалістів, які не здатні сприймати нові тенденції розвитку техніки й технологій. Хоча останніми роками в Україні більшість технічних вишів перетворюються в університети, в їхніх навчальних програмах практично не збільшують, навіть зменшують, викладання таких загальнонаукових фундаментальних дисциплін, як фізика та математика, що є основою загальнонаукового рівня спеціалістів. Ці наукові дисципліни формують загальнонаукові знання й дозволяють, з єдиного загальнонаукового погляду, виконувати завдання, які, здавалося б, розрізнені між собою.

Розмежованість і вузька професійна направленість навчальних програм не дає можливості подолати труднощі, які повсюдно зустрічається при впровадженні нових технічних рішень. Нові технології достатньо швидко розвиваються. В автомобільному транспорті все більше використовуються електромобілі, у міському електротранспорті все більшою мірою використовують гібридні транспортні засоби, у залізничному транспорті швидкими темпами будуються швидкісні залізниці на електричній тязі, поїзди які працюють на нових, раніше не відомих працівникам принципах. Для аналізу роботи електротранспорту, проєктування та обслуговування потрібні глибокі знання основ механіки, електротехніки, і теорії електромагнітного поля, електродинаміки, електроніки та мікропроцесорної техніки, комп'ютерних мереж. Використання цих знань дозволяє істотно поліпшити характеристики транспортних засобів, створювати й модернізувати транспортні засоби, підвищувати ефективність їхнього використання обслуговування.

Практично всі засоби транспорту, які належать до міського електротранспорту (трамвай, тролейбус, метрополітен) та міжміського транспорту (залізничні поїзди, електромобілі) використовують одні й ті самі наукові положення, які є основою фізики її розділів механіки та електротехніки, теорії електроприводу й теорії автоматичного керування. У кожного виду транспорту є свої особливості. Електромобілі, які рухаються по дорозі зі швидкостями понад 200 км/год, швидкісні поїзди, що рухаються зі швидкостям понад 300 км/год, потребують враховувати питання, що стосуються розділу фізики: динаміка суцільних середовищ, аеродинаміка руху. Ці самі питання дії сил опору повітря певною мірою притаманні залізничним поїздам, метрополітену, трамваю та тролейбусу. Розробляються та практично

використовуються поїзди, засновані на інших фізичних принципах, ніж електричні двигуни залізничних локомотивів, трамвая та тролейбуса. Наприклад, поїзди на повітряній та магнітній подушці. Магнітна подушка використовує магніти, побудовані на надпровідних матеріалах із великою магнітною індукцією близько десятка тесл. Надпровідні матеріали використовуються не тільки в магнітних подушках підвіски поїздів, але й у системах рекуперації на електричному транспорті та проявили себе як перспективні системи [7]. Працюють вони за низьких температур і вимагають використання кріогенної техніки. Тому для вивчення дисципліни «Основи електричної тяги» необхідно мати фундаментальну університетську підготовку, знання всіх фізичних процесів, які застосовуються й можуть застосовуватись в електричному транспорті. Спеціалісти, які закінчують університет, повинні бути ознайомлені, хоча б в загальних рисах, із відповідними розділами науки.

Окрім процесу диференціації знань, у науці відбувається зворотний процес, а саме інтеграція знань. У процесі інтеграції знання, отримані в одній галузі науки, об'єднуються зі знаннями інших наукових напрямів. Процесів інтеграції в науці значно менше, ніж диференціації, але ці процеси цінніші. Вони дозволяють об'єднати одержані розрізнені знання в одну систему та отримувати нові знання на основі вже накопичених, раніше розрізнених знань. Вони дозволяють створити єдину загальну картину світу. У процесі інтеграції розвиваються фундаментальні наукові дисципліни.

Особливо інтенсивні процеси інтеграції науки припадають на кінець ХХ – початок ХХІ століття. У багатьох випадках ці процеси пов'язані з розвитком і використанням інформаційних технологій та комп'ютерної техніки. Сучасні інформаційні технології проникають у всі напрями практичної діяльності, в усі галузі знань. Вони кардинально змінюють діяльність людини, її професії, характер і результати праці. Ці зміни відображаються, наприклад, у переліку галузей знань та наукових спеціальностей, і сам перелік з роками змінюється [8].

Прикладом інтеграції наук є такі наукові напрями: синергетика, кібернетика, теорія систем і системний аналіз, геоінформатика, механотроніка, електромехатроніка. Синергетика – міждисциплінарна наука, яка займається вивченням процесів виникнення, розвитку і підтримки стійкості систем різної природи, завдяки їхній відкритості: обміну матерією, енергією та інформацією із навколишнім середовищем. Таким системам властива самоорганізація та розвиток, у протигагу до закритих систем, яким, відповідно до другого начала термодинаміки, властиве зростання ентропії, перехід від упорядкованого стану до хаосу. Виникла синергетика на стику таких наук, як математика нелінійних систем, фізика, хімія, біологія. У межах синергетики вивчають спільну дію

окремих частин неупорядкованої системи, внаслідок якої відбувається їхня самоорганізація. Її методи використовуються в генетиці, соціології, інформатиці, мережевому просторі інтернету. Термін «синергетика» ввів професор Штутгартського університету Г. Хакен у своїй монографії [9].

Кібернетика, так зване «мистецтво управління», – наука про загальні принципи керування складними системами різного походження. Ця наукова дисципліна дозволила об'єднати процеси обміну інформацією та процеси керування в технічних, біологічних, соціальних та інших системах. За визначенням В. М. Глушкова, кібернетика – це наука про загальні закони одержання, зберігання, передавання й перетворення інформації у складних системах і використання її для управління [10].

Теорія систем – це галузь наукового знання про навколишній світ як сукупність систем різної складності й різного рівня, які взаємодіють між собою. Теорія систем є загальнотеоретичним підходом, заснованим на методах діалектики, використанні знань філософії, прикладної математики, теорій пізнання та інших наукових дисциплін. Вона вивчає закономірності функціонування, взаємодії і розвитку великих систем. Системний аналіз – це методологічна дисципліна, заснована на системному підході. Вона об'єднує методи вивчення систем різної складності й призначення, розробляє ці методи, узагальнює їх, дає практичні рекомендації для їхнього використання [11, 12]. Системний аналіз застосовується для підготовки й обґрунтування шляхів вирішення складних проблем політичного, соціального, військового, економічного, технічного характеру. Основоположником теорії систем вважають біолога Л. фон Берталанфі [12].

Геоінформатика – це наукова дисципліна, яка вже пережила етап становлення та стала визнаною науковою дисципліною. Вона об'єднала географічну інформацію з комп'ютерною технікою та математичним апаратом аналізу даних в єдині географічні інформаційні системи (ГІС). За допомогою цієї наукової дисципліни підтримується земельний кадастр України, виконується аналіз різних територіальних систем у їхньому взаємозв'язку із населенням та інфраструктурою. Наприклад, за допомогою математичного апарату кореляційного та регресійного аналізу встановлено швидкість глобального потепління та вплив антропогенних факторів на нього. Математичний апарат геоінформаційних технологій дозволяє встановити взаємозв'язки, які за відсутності цієї наукової дисципліни встановити було надзвичайно важко. Наприклад, якщо за допомогою геоінформаційних технологій проводиться прокладання та проєктування доріг, то термін «проєктування», який за звичайними методами займає два-три роки, зводиться

до кількох місяців. За допомогою геоінформаційних технологій прокладання траси з розрахунком усіх обсягів виконаних робіт: від переміщення ґрунту до готового проекту, визначення підприємств виконавців, розробка часового графіка робіт та постачання матеріалів, витрат матеріалів, включаючи проекти побудови мостів, тунелів, придорожньої інфраструктури може бути виконано протягом одного кварталу [13, 14].

Транспортно-навігаційні ГІС з інформаційною базою, за наявності відповідних математичних моделей, є засобом ефективного управління роботою транспортних засобів будь-якого типу, розв'язання логістичних транспортних задач на міському, регіональному та державних рівнях, засобом для вдосконалення організації дорожнього руху в межах міста, ефективного використання інфраструктури дорожнього руху. Вони забезпечують безпосередніх учасників дорожнього руху та всі ланки управління транспортною системою необхідною оперативною та якісною просторово-часовою інформацією [15]. Просторові дані про інтенсивність транспортних потоків збираються, наприклад, на основі аналізу геолокаційних даних мобільних телефонів, що яскраво демонструє єдність і взаємопроникнення різних сфер діяльності.

Із розвитком комп'ютерної техніки та інформаційних технологій суттєво підвищується роль фундаментального знання. У сфері освіти це відображається масовим перетворенням технічних вишів в університети. Специфіка університетів у тому, що в них основна увага приділяється фундаментальним наукам. Як зазначив розробник інтернету, професор Е. Таненбаум у фундаментальній монографії «Комп'ютерні мережі», суть «навчання не в засвоєнні та оперуванні окремими, тобто миттєвими деталями науки (алгоритмами, методиками, правилами), які можна застосувати лише на практиці, а у знанні та розумінні всіх основних наукових принципів із їх поясненнями» [16].

Взаємодія та співвідношення фундаментальних і прикладних знань розглянута в роботі Л. Г. Дротянко [1]. Стосовно до інформаційних технологій і комп'ютерного моделювання сказано, що: «...основою інформаційних технологій є органічне поєднання математичного моделювання та засобів одержання, переробки, збереження й передачі інформації за допомогою комп'ютерної техніки». Відмічена суттєва відмінність моделювання в 1950–70-ті роки, та в останні два десятиліття, які зумовлені корінними змінами в інформатиці й інформаційно-обчислювальній техніці.

Автор [1] відмічає, що засновники розвитку інформатики та кібернетики К. Шеннон, Дж. фон Нейман, В. Ешбі, Н. Вінер, В. М. Глушков прийшли до

розуміння інформації, як особливого виду об'єктивної реальності, відмінною від речовини й енергії. Наприкінці ХХ століття вчені стали розглядати інформацію «як суб'єкт, що відповідає меті й характеру дослідження, як відображення, сигнали, числові чи дослідні дані, як текст та ін.». Відмічається, що під час побудови адекватної моделі комп'ютерному дослідженню передуює вибір фізичного наближення та тільки з ним можливе інформаційне моделювання. Сама комп'ютерна модель розглядається як концептуальна модель, об'єктивна реальність, як є заміником реального об'єкта, який можна використовувати не тільки під час наукового дослідження, а також на практиці. Отже, створені інформаційні моделі є заміником реальних досліджуваних об'єктів. У науці такі моделі визначаються досягненнями людської культури загалом [1]. Як приклад можна навести автомобілі з автопілотом, керування рухом яких здійснюється відповідно до математичної моделі, закладеної у бортовому комп'ютері. Комп'ютер використовує математичну модель і відповідно до неї, з урахуванням показів цілої системи датчиків, розраховує можливий рух ТЗ і відповідно приймає рішення. Разом із тим надійність прийнятих рішень і забезпечення безпеки руху більша, ніж виконання цих дій водієм [17]. Якщо математична модель неадекватна, або розрахунки не дадуть достатньо точної відповіді на можливі події, які відбудуться при тій чи іншій керуючій дії, то систему автоведення реалізувати неможливо. З огляду на це першим і основним завданням, яке ставиться в цій роботі, є удосконалення математичної моделі ТЗ і розробка методів аналізу руху ТЗ у складних умовах експлуатації. Коло завдань охоплює також питання енергоефективності як одного з головних показників, що визначає сфери використання конкретних видів електротранспорту.

1.2 Відомі методи тягових розрахунків

Теорія електричної тяги (далі –ТЕТ) виникла й розвивається вже понад 100 років. Це прикладна наукова дисципліна, яка пройшла перевірку практикою, підтримана науковцями, викладається в навчальних закладах, використовується під час експлуатації різних типів електричного транспорту. Тому питання її альтернативи викликає здивування та вимагає пояснення: чим це зумовлено, чим викликана необхідність знаходження альтернативи існуючій теорії. Якщо коротко, то варто зазначити необхідність переходу на сучасний науковий рівень, відмова від застарілих, неправильних наукових уявлень ХІХ століття, повного переходу до загально прийнятої міжнародної системи одиниць СІ. Для цього потрібно використати методи, розроблені ще класиками

механіки в ХІХ столітті. Необхідно збільшити точність розрахунків, спростити їх та розширити коло завдань, які підлягають теоретичному аналізу.

Із розвитком ТЗ, збільшенням їх швидкостей, появою нових ТЗ, упровадженням інформаційних технологій та систем керування, виникла необхідність збільшити точність розрахунків руху, передбачати результати дій керування. Відомі методи розрахунків містять спрощення, які не забезпечують потрібної точності результатів. У ТЕТ використовують застарілі поняття механіки руху, намітився відрив теорії від рівня розвитку інших наук. Впровадження нових інформаційних технологій – електроніки, комп'ютерів, комп'ютерних мереж, супутникових засобів навігації, розвиток і поява нових видів транспорту, збільшення швидкостей руху – вимагає розвитку теорії, використання більш точніших і досконаліших методів розрахунку, розгляду ширшого кола питань роботи вузлів, особливостей експлуатації ТЗ як одне матеріальне тіло. У матеріальному тілі, відповідно до третього закону Ньютона, усі внутрішні сили взаємно компенсуються, і під час аналізу руху їх можна не враховувати. Достатньо розглядати тільки рух, обумовлений зовнішніми силами. Зовнішні сили виникають унаслідок взаємодії матеріального тіла з іншими тілами. Під впливом внутрішніх в'язів та зовнішніх зв'язків рух матеріального тіла може бути найрізноманітнішим: поступальним, обертальним, коливальним, рухом по складній траєкторії тощо. Щоб розрахувати характер руху матеріального тіла достатньо належним чином обрати узагальнені координати. Тоді, замість врахування складних взаємодій між окремими матеріальними точками і складання рівнянь руху у просторових координатах (декартових, сферичних, циліндричних тощо) достатньо враховувати тільки рух по обраних узагальнених координатах. Кількість рівнянь опису руху скорочується і дорівнює числу степенів свободи руху. Для аналізу руху достатньо використовувати закони збереження та перетворення енергії: механічної енергії з кінетичної у потенційну, а також механічної енергії у теплову, в енергію електромагнітного поля та зворотні перетворення. У такий спосіб істотно спрощується завдання розрахунків, а крім того, що особливо важливо, усуває низку спрощень, які доводиться робити під час розв'язання великої кількості рівнянь відповідно до відомих методів розрахунків на основі законів Ньютона.

Наступною альтернативою вдосконалення теорії електричної тяги є використання рівнянь Гамільтона. Відмінність їх від рівнянь Лагранжа полягає у тому, що рівняння Гамільтона, крім узагальнених координат, входять узагальнені імпульси (добуток швидкості на масу тіла, векторна величина,) і під час аналізу, крім закону збереження енергії, використовується закон

збереження імпульсу. Це дозволяє розширити коло завдань, які підлягають теоретичному дослідженню, і дозволяє найповніше розглядати характер руху ТЗ, його взаємодію із зовнішнім середовищем і внутрішні процеси, зумовлені рухом.

Розглядаючи відомі методи ТЕТ, варто зазначити, що точність розрахунків згідно з її положеннями недостатня для реалізації сучасних вимог аналізу роботи ТЗ. Основне рівняння руху ТЗ подається у вигляді [18–29]:

$$m(1 + \gamma)v \frac{dv}{ds} = F_k - W_k - B_k, \quad (1.1)$$

та

$$m(1 + \gamma) \frac{dv}{dt} = F_k - W_k - B_k, \quad (1.2)$$

де F_k – сили тяги; W_k – сили опору; B_k – гальмівні сили; m – маса ТЗ; v – швидкість руху; t – час; γ – відношення інертної маси до ефективної; $(1+\gamma)$ – коефіцієнт інерції.

Рівняння (1.1) приймається як перша форма рівняння руху та відповідно, (1.2) – друга форма [18–22]. Згідно з першою формою інтегрування рівняння руху здійснюється вздовж шляху s , другою – по часу t .

У практиці розрахунків та під час викладання дисципліни ТЕТ використовують рівняння руху, приведені до відносних одиниць. Такі рівняння вважаються загальними, тобто такими, що розв'язок рівняння для транспортного засобу однієї маси, описує рух ТЗ іншої, довільної маси. Одержуються рівняння в питомих одиницях, які дорівнюють відношенню діючих сил до маси в тонах, помноженої на коефіцієнт 9,81:

$$f_1 = \frac{F_1}{9,81m}; \quad w_1 = \frac{W_1}{9,81m}; \quad b_1 = \frac{B_1}{9,81m}, \quad (1.3)$$

де у чисельнику значення діючої сили в Н, а в знаменнику маса в тонах, помножена на прискорення земного тяжіння в м/с^2 , що називається «вагою» транспортного засобу.

Із використанням (1.3) одержано дві форми основного рівняння руху:

$$v \frac{dv}{ds} = \frac{\xi}{(1 + \gamma)} (f_k - w_k - b_k) \quad (1.4)$$

та

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\xi'}{(1 + \gamma)} (f_k - w_k - b_k), \quad (1.5)$$

де ξ та ξ' – коефіцієнти узгодження одиниць вимірювання [18–22].

Рівняння (1.4) є першою формою основного рівняння руху, яке використовується у практиці тягових розрахунків руху як міського електричного транспорту (трамвая, тролейбуса, метрополітену), так і під час розрахунків тяги електричних поїздів на залізницях. Ці рівняння входять у цитовані навчальні посібники та використовуються під час тягових розрахунків в практиці експлуатації електричного транспорту так і в навчальному процесі в усіх транспортних вузах країн колишнього Радянського Союзу та східної Європи.

У цих рівняннях зроблено низку спрощень, основне з яких – приведення рівняння руху до питомих сил, що діють на одиницю маси ТЗ. Для цього введено коефіцієнт інерції $(1 + \gamma)$ – відношення суми мас ТЗ – m та ефективної маси його частин, що обертаються m_e , до маси m .

$$1 + \gamma = \frac{m + m_e}{m}. \quad (1.6)$$

Зауваження. В частині 4 – «Кінематика» визначення ефективної маси m_e уточнено і замість величини m_e згідно до формули (1.7) слід використовувати m_p згідно до формули (4.7)

Ефективна маса обертальних частин m_e у рівняння руху входить відповідно до теореми Керна про кінетичну енергію як величина, що описує кінетичну енергію частин, які крім поступального руху здійснюють обертальний рух. Розраховується ефективна маса m_e обертальних частин згідно з формулою:

$$m_e = \sum_{i=1}^n J_i \left(\frac{\mu_i}{2\pi R_k} \right)^2, \quad (1.7)$$

де J_i – момент інерції i -ї обертальної частини; v – швидкість ТЗ; μ_i – передавальне число; $\sum_{i=1}^n$ – знак сумування відноситься до всіх колісних пар транспортного засобу.

Згідно до рекомендацій монографії [20] у формулі (1.7) не враховується обертальний рух таких частин як: якорі тягових двигунів, елементи тягових передач, підвагонні генератори пасажирських вагонів і т. п., що невірно. Згідно [18] обертальний рух усіх елементів трансмісії враховується, а таких елементів як підвагонні генератори не враховується. В інших джерелах [19, 21, 23, 25–29]

відсутнє однозначне визначення ефективну масу яких саме частин повинна потрібно враховувати. Далі це питання потребує вивчення та буде уточнене на основі аналізу енергетичних затрат під час руху ТЗ.

Аналізуючи метод приведення рівняння руху до питомих одиниць шляхом введення коефіцієнта інерції $(1+\gamma)$ слід відмітити недоліки такого методу. Перш за все коефіцієнт інерції по замовчанню, вважається постійним для ТЗ різної маси, тобто рівняння руху, приведене до відносних одиниць діючих сил, таким, що результат його інтегрування описує рух ТЗ різної маси. Використані для ТЗ різної маси результати інтегрування рівняння руху є причиною похибок. Зміна маси ТЗ, за незмінної ефективної маси обертальних частин призводить до різних значень коефіцієнта інерції. Розв'язки рівнянь із різними коефіцієнтами є різні, але це не приймається до уваги. Наприклад, для тролейбуса або трамвая, пасажирського або приміського поїзда, який зупинився, набрав пасажирів і їде далі, маса m змінилась, а ефективна маса m_e залишилась тією, якою була. Коефіцієнт інерції став іншим, рівняння руху інше його знову потрібно інтегрувати. Аналогічний випадок, коли до поїзда додатково приєднано декілька вагонів, коефіцієнт інерції також змінюється, оскільки еквівалентна маса обертальних частин зосереджена переважно в електровозі, а приєднані вагони мають доволі малу ефективну масу. Ефективна маса приєднаних вагонів – це маса обертального руху підтримувальних колісних пар приєднаних вагонів. Як і в попередньому випадку, коефіцієнт інерції, у разі зміни ваги поїзда, змінюється. Проте, згідно з відомими методами, виконувати заново інтегрування рівняння руху не потрібно, результат першого інтегрування вважається правильним для ТЗ будь-якої маси.

Описаний метод розрахунку можна вважати як метод наближених обчислень. Інтегрування рівняння руху, за відсутності обчислювальної техніки, пов'язане з певними труднощами, оскільки потрібно враховувати нелінійні залежності сили тяги двигуна від швидкості в різних режимах роботи та складний профіль шляху, вздовж якого виконується інтегрування рівняння. В інженерній практиці рекомендується використовувати графоаналітичні методи розрахунків.

Величини коефіцієнта інерції γ змінюється в межах $(1 + \gamma) = 1,1 - 1,25$. Результати інтегрування рівняння при зміні γ відрізняються не сильно. Наближений результат розрахунків вважається задовільним. Основною метою введення коефіцієнта інерції є приведення рівнянь руху до питомих одиниць, спрощення розрахунків і створення методів, зручних для використання працівниками електротранспорту в практичній діяльності.

Під час приведення рівняння руху до питомих одиниць потрібно враховувати, що в нього входить ряд величини, які не залежать від маси ТЗ. Насамперед це сили опору, обумовлені рухом у повітряному середовищі. Вони мають два складники: сили в'язкого й аеродинамічного опору, кожен з яких не залежить від маси поїзда. Тому приведення основного рівняння до питомих одиниць, аналогічно як і використання коефіцієнта інерції, вносить додаткові похибки у результати розрахунків. Для ТЗ, що рухаються зі швидкостями до 60–70 км/год, сили опору повітря не перевищують 0,1 інших сили. Ураховуючи порівняно невеликий вплив сил опору повітря на рух ТЗ, похибки розрахунків вважаються допустимими. Інша ситуація для швидкісних ТЗ. У них опір повітря – основна сила опору. У рівнянні руху вони є основними силами опору. Результати тягових розрахунків, виконані для поїздів однієї маси, не будуть співпадати для поїздів іншої маси. Кожен раз потрібно розраховувати рух індивідуального ТЗ з певним завантаженням і зміну параметрів ТЗ у процесі руху.

Ще однією із причин, яка спонукала до пошуку альтернативних методів тягових розрахунків, є використання поняття «питомих» величин, яке було введено у ТЕТ після часткового переходу до міжнародної системи фізичних одиниць СІ. Відповідно до закону про перехід до міжнародної системи одиниць СІ, потрібно було виконати розрахунки й переробити нормативну документацію. Це великий обсяг технічної документації, підручників, службових інструкцій, а також документації усіх транспортних підприємств великого Радянського Союзу. Це обсяг документів, які створено протягом 50 попередніх років. Зробити перерахунок усіх числових значень у документах та переробити алгоритми розрахунків потребувало багато часу та зусиль. За тимчасову міру було прийнято «частково» перейти до системи СІ, підмінивши визначення деяких одиниць вимірювання. Здійснено це було в такий спосіб.

Замість питомих одиниць системи МКГСС, а саме: відношення кілограма сили (Кг) до кілограма маси ТЗ (кг) – кГ/кг , в основне рівняння руху ТЗ, ввели нове поняття «питомої» сили згідно з формулою (1.3). У лапках термін «питомої» взято для того, щоб не змішувати нове тоді, помилкове визначення, з тим, що було правильним. Запропоноване визначенням формулюють так: «питома» сила дорівнює відношенню сили у Ньютонах (Н), до «ваги» ТЗ у кН, причому «вага» G у кН дорівнює добутку маси ТЗ у тонах (т) на прискорення земного тяжіння рівне: $G = 9,81 \text{ т}$, що науково неправильно. Введення таким чином «питомої» величини сил, які діють на ТЗ, дозволило обійтись без перерахунку числових значень у документах, а тільки введенням нового визначення. Фактично заради числа пожертвували поняттями, зробили їх

підміну. Таке тимчасове визначення використовуються близько 42 роки після дозволу його використання. «Вдале», на перший погляд, тимчасове рішення зробити підміну понять, замість виконання перерахунків і коригування документації, спричинило низку проблем.

Після такого рішення, прийнятого на вищому рівні, постановою Міністерства шляхів сполучення СРСР [70], всі автори підручників, дослідники, інженери повинні були притримуватись прийнятих правил. Довелось використовувати нестандартні одиниці вимірювання, одночасно використовувати несумісні між собою систем одиниць вимірювань. З'явилися додаткові коефіцієнти у розрахункових формулах, стали з'являтися помилки навіть у навчальних посібниках [21]. Виникла підміна основних наукових понять і проблема пояснення неправильних визначень студентам під час навчального процесу.

Розглянуте визначення «питомих» величин помилкове із двох причин:

1) питомою силою є відношення сили тяги, опору, гальмівної сили тощо до кількості речовини, маси ТЗ, але ніяк не відношення двох сил, як то сила тяги до сили «ваги»;

2) визначення «ваги» як добутку маси на прискорення земного тяжіння помилкове, не відповідає науковому визначенню.

Перша причина. Крім того, що визначення «питомих» величин діючих сил формулою (1.3) є науково неправильне визначення, воно призводить до проблем розмірності. У правій частині рівнянь руху (1.4) та (1.5) діючі сили тяги й опору поділені на силу «ваги» (1.3). Отже, формально права частина рівнянь безрозмірна – це відношення сил. Ліва частина рівняння (1.4) та (1.5) визначає прискорення руху. Це величина, яка має розмірність, що дорівнює відношенню одиниці довжини до квадрату одиниці часу. Одиниці фізичних величин у рівняння не узгоджені. Для врахування одиниць вимірювання у рівняння введені коефіцієнти узгодженості: ζ' – у рівняння (1.4), та ζ – у рівняння (1.5). Проте і ці коефіцієнти вважаються безрозмірними, а розмірність повинна забезпечувати величина «питомої» сили, тобто відношення діючих сил у Н до «ваги» у кН [18–29]. Така ситуація, повторена масово у великій кількості джерел, не відповідає науковим принципам. Вона призводить до помилок, які появляються навіть в університетських навчальних посібниках [21].

Друга причина, а саме неправильне визначення такої фізичної величини як вага [18–29]. Вага згідно з визначенням – це сила, з якою тіло тисне на опору чи підвіс [30]. Згідно з цим визначенням вага під час руху ТЗ не є постійною. Вона змінюється й має різні значення на різних ділянках шляху. Під час руху на

кривих виникає інерційна сила. За визначенням Д'аламбера добуток маси на прискорення є інертною силою. Згідно теорії відносності, в системі координат матеріального тіла, відрізнити інертне та гравітаційне прискорення неможливо. Вони разом визначають силу ваги, яка тисне на опору. Тобто вага є сума двох сил: сили ваги та інертної сили. У результаті дії доцентрового прискорення вага направлена під кутом до вертикалі від центру дуги руху. Вага, згідно з принципом тотожності гравітаційного та інерційного прискорення, є векторна сума величини прискорення земного тяжіння та доцентрового прискорення помножена на масу ТЗ. На кривих ділянках шляху величина ваги більша, ніж на прямолінійних. На спусках, у випадку вільного прискореного руху, вага менша, змінюється вага також і на дугах спряження профілю.

Під час використання в рівняннях ТЕТ «питомих» величин допущена підміна понять: замість маси використовується поняття ваги. Одночасне використання понять маси та «ваги», в якості кількості речовини, потребує одночасно використовувати двох несумісних між собою систем фізичних величин: МКГСС та СІ. Викладаючи дисципліну ТЕТ, замість поглибленого вивчення матеріалу, процесів, які зумовлюють рух ТЗ, доводиться розбиратись з історією та труднощами пізнання законів навколишнього світу й неправильними визначеннями, які залишились до сьогодні.

З розглянутої ситуації вихід доволі простий. Потрібно відмовитись від використання «питомих» у лапках, а також питомих без лапок одиниць. Необхідно використовувати реальні фізичні величини, визначені системою СІ, та виконувати розрахунки, індивідуальні для кожного ТЗ під його час руху по конкретному маршруту, з конкретним навантаженням. Спроби одержання універсальних рівнянь, які були доцільні, коли користувались ручними методами розрахунку, з появою сучасної обчислювальної техніки не оправдані. На сьогодні виконання індивідуальних розрахунків для ТЗ різної маси не становить труднощів. Завдяки наявності сучасної обчислювальної техніки, при наявності відповідного програмного забезпечення, розрахунки можуть бути виконані миттєво. Наприклад, розрахунки руху можуть входити в склад програмного забезпечення бортового комп'ютера і використовуватись системою автоведення. Такі системи вже працюють та забезпечують керування рухом ТЗ швидше, краще й надійніше, ніж це робить людина.

Питанням, яке належить до розгляду, є методи аналізу руху та виконання розрахунків. Самостійним є питання програмного забезпечення, але це питання менш важливе. Воно вирішується відомими методами у разі розробки закінчених й досконалих теоретичних основ електричної тяги.

Розглядаючи альтернативні методи тягових розрахунків, як було зазначено, потрібно перейти до використання розроблених Ейлером, Лагранжем, Гамільтоном та низкою вчених методів розрахунку динаміки руху. Ці методи розрахунку не заперечують рівнянь І. Ньютона, а є подальшим етапом розвитку механіки руху для більш складних систем. Основані вони на розгляді процесів перетворення енергії, як фундаментального положення механіки. Вони враховують процеси взаємодії частин матеріального тіла із врахуванням процесів перетворення механічної енергії в інші види та її розсіювання в навколишньому середовищі.

У цій роботі, в її наступних частинах, використані рівняння Лагранжа другого роду. Відповідно до них за основу вивчення динаміки руху ТЗ прийнято закони збереження та перетворення енергії. Розрахунки зводяться до вибору моделі руху ТЗ, вибору узагальнених координат руху, аналізу узагальнених сил, відповідно кожній із координат, розрахунку кінетичної та потенціальної енергії, та інтегрування одержаних рівнянь. Рівняння Лагранжа другого роду – це рівняння в часткових похідних одержані з використанням функції Лагранжа. Функція Лагранжа – сума кінетичної та потенціальної енергії матеріального тіла, у ТЕТ це є кінетична й потенційна енергія ТЗ. Якщо ТЗ має джерело енергії, яке приводить у рух ТЗ, а частина енергії витрачається на подолання сил опору, то рівняння Лагранжа дозволять врахувати зміну механічної енергії в результаті процесів прямого та зворотного перетворення механічної енергії в інші види. Такий підхід забезпечує вирішення значно ширшого кола завдань, ніж використання рівнянь Ньютона та теореми Кеніга. Загалом у цьому полягає альтернативна теорія електричної тяги.

Питання, які доводиться вирішити на цьому шляху, не прості й вимагають певної розробки. Подальша робота виконується на основі досвіду, одержаного спеціалістами за роки експлуатації електричного транспорту й автором на підставі теоретично опрацьованого матеріалу з ТЕТ, та знань, одержаних із вивчення теоретичної фізики під час навчання у Львівському держуніверситеті ім. І. Франка.

Висновки до розділу

У відомих методах розрахунків використовується неправильне визначення фізичної величини «вага», як міри кількості речовини. Вага, згідно з визначення, – це сила, з якою тіло тисне на опору чи підвіс. Науково неправильне визначення ваги має бути відмінене і не повинно використовуватися в підручниках, службовій документації електричного транспорту. Згідно з науковим визначенням, вага ТЗ під час руху не є

постійною величиною. Вона змінюється й має різні значення на різних ділянках шляху, за різних швидкостей руху. Ця зміна ваги у відомих методах розрахунку не враховується, що спричиняє неточність результатів розрахунків.

У разі зміни маси ТЗ коефіцієнт інерції, який входить в рівняння руху, змінюється. Але згідно відомих методів розрахунків, результат одержаний із використанням питомих величин діючих сил, вважається правильним для транспортного засобу будь-якої маси. Це невірно і призводить до похибки результатів розрахунків. Розрахунок коефіцієнту інерції, при якому враховується тільки кінетична енергія колісних пар є неправильним.

Опір повітря, який входить у рівняння руху як складова основного опору, не залежить від маси ТЗ. Ділення величини цього опору на «вагу» та визначення «питомого» опору є математично коректною дією. Це також призводить до додаткових похибок результатів інтегрування рівняння руху.

У чинній теорії електричної тяги перехід до міжнародної системи одиниць СІ здійснено не повністю. Це зумовлює появу одиниць вимірювання, які не застосовуються в науковій літературі, та появу перехідних коефіцієнтів, без яких можна обійтись. З часу, коли була видана постанова Міністерства шляхів сполучення СРСР, яка згідно до правил виконання тягових розрахунків, дозволяла тимчасові відхилення від системи СІ, пройшло понад 40 років. Тому вже давно потрібно повністю завершити перехід до СІ.

Загальний аналіз матеріалу наукової дисципліни «Теорія електричної тяги» підтверджує, що у цій дисципліні назріла необхідність переходу на сучасний науковий рівень, відмова від застарілих, неправильних наукових уявлень XIX століття. Потрібен повний перехід до міжнародної системи одиниць СІ. Необхідно збільшити точність розрахунків, при їхньому спрощенні, та розширити коло завдань, які підлягають теоретичному аналізу. Для цього потрібно використати методи розроблені класиками механіки й наведені в роботах Д'аламбера, Лагранжа, Гамільтона та ін.

2 ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РІЗНИХ ВИДІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

2.1 Теорія електричної тяги

Робота транспортних засобів розглядається з врахуванням особливостей експлуатації кожного виду транспорту та завдань, для виконання яких вони призначені. Основні характеристики, які визначають їхню роботу на маршрутах: дальність слідування, віддалі між зупинками, навантаження, регулярність роботи. Основні види електричного транспорту класифікуються за завданнями, для виконання яких вони призначені, їхнім функціональним призначенням і особливостями їхньої роботи. Види електричного транспорту насамперед поділяються на пасажирський, вантажний, цільовий. До видів електричного транспорту належать: міський пасажирський електротранспорт (трамвай, тролейбус, швидкісний трамвай, метрополітен), залізничний електротранспорт (приміські електрички, пасажирські поїзди, швидкісні поїзди, вантажні поїзди). Типи автомобільного електротранспорту: індивідуальні – гіроскутер, сегвей, електромобілі, електрокари; громадського користування – тролейбуси, електробуси.

Практично всі засоби електротранспорту – трамвай, тролейбус, електромобіль, метрополітен і залізничні поїзди – працюють за одними й тими самими принципами та наукова основа їхньої роботи спільна. Принципи їхньої роботи ґрунтується на основних засадах фізики: механіки, електротехніки. Тому до аналізу електричної тяги необхідно підходити із загальної точки зору, розглядаючи особливості роботи кожного виду транспорту з огляду на єдність і безумовний зв'язок між ними.

Історично склалося так, що ТЕТ насамперед розвивалася на основі міського наземного електротранспорту, а саме трамваю. Трамвай із часом став основним видом міського транспорту. Він практично витіснив усі інші види тяги: кінну та парову тягу. Ці види тяги були замінені електричною. Після цього, як стало зрозуміло переваги електричної тяги, постало питання доцільності впровадження електричної тяги на магістральних залізницях, де використовувалась парова тяга. Розробка теорії електричної тяги, зі свого боку, опиралися на отриманий досвід експлуатації залізничного транспорту з паровою тягою, а саме динаміки руху поїздів із паровими локомотивами. У результаті узагальнення практики та теорії електричної тяги трамваїв, а потім залізничних поїздів зародилась наука «Теорія електричної тяги». Особливості трамваю обумовлені завданнями перевезення населення територією міст, а залізниці – особливостями роботи залізної дороги й завдань перевезення

пасажирів і вантажів на магістральних міжміських лініях. Тому на залізничному транспорті використовуються інші напруги, інші системи підведення електричного струму до потягів, інші конструкції електровозів і багато іншого.

Для аналізу особливостей різних видів транспорту варто розглянути режими руху ТЗ. У роботі [31], одній із перших робіт із теорії електричної тяги, відмічені такі режими руху: розгін, тяга (рух із постійною швидкістю), вибїг (рух за інерцією), гальмування. Діаграма руху подана на рисунку 2.1.

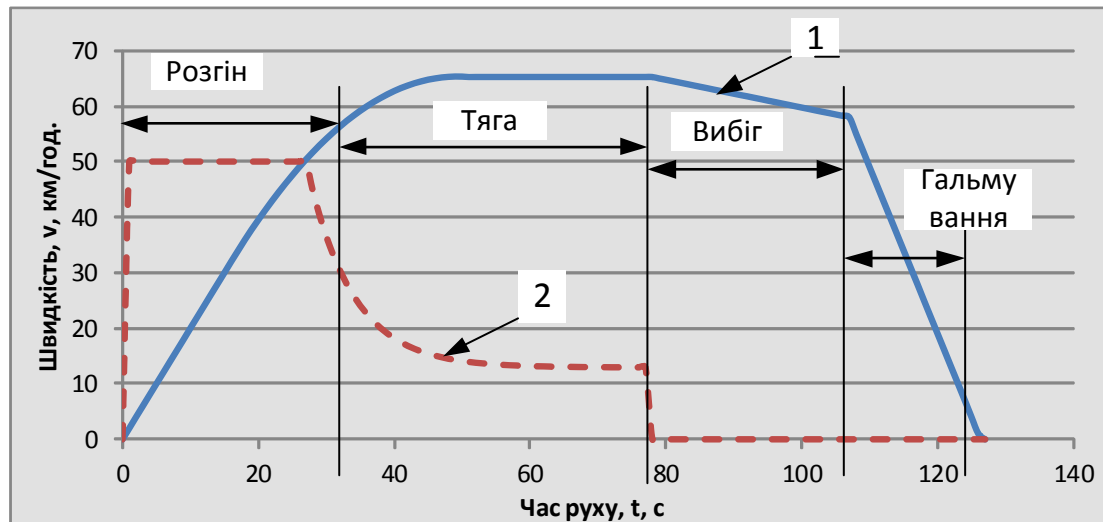


Рисунок 2.1 – Діаграма руху транспортного засобу: 1 – зміна швидкості під час руху; 2 – величина струму

Рух здійснюється в такий спосіб. ТЗ розганяється практично з постійними прискоренням. Величина струму під час розгону регулюється системою керування так, що прискорення лишається практично постійним. Потужність двигуна зростає. У кінці розгону потужність двигуна досягає своєї номінальної величини, сили опору зростають і прискорення зменшується.

У режимі тяги ТЗ плавно переходить до руху з постійною швидкістю. Двигун переходить на природну механічну характеристику, струм двигуна за постійній потужності з набором швидкості врівноважується силами опору руху.

Під час переходу в режим вибїгу водій вимикає двигун. Поїзд рухається за інерцією і швидкість його поступово зменшується.

Наступний режим – гальмування, коли вмикаються додаткові гальма, або здійснюється рекуперативний режим гальмування. Двигун переходить у генераторний режим і струм, який він виробляє, сповільнює рух поїзда.

2.2 Міський електричний транспорт. Трамвай

Першим міським транспортом є конка, візки з кінською тягою. Вони рухались по центру вулиці спочатку брукованої, потім покритої дерев'яним настилом, а пізніше металевими рейками. Із появою перших парових двигунів у деяких містах вони змінили кінську тягу. Парова тяга була достатньо ефективною та у всіх країнах, на різних континентах будувались залізні дороги спочатку з паровозами, а пізніше з тепловозами. Нині парова тяга ще використовується в різних країнах, зазвичай у тепловозах. Проте для перевезення населення в містах паровози себе не виправдали. З появою джерел електроенергії та електричних двигунів кінська та парова тяга в містах була замінена електричною, виник вид транспорту – міський трамвай. Він прийшов на заміну паровозів та кінських екіпажів. Переваги електричної тяги проявилися з самого початку її використання. Це яскраво продемонстровано на прикладі київського трамвая, коли спроби використання кінської, а потім парової тяги для перевезення населення міста виявилися економічно не вигідними. Трамвай є найдешевшим видом транспорту. Він рухається по залізній колії. Трамвайні колії спочатку прокладались по центру проїжджої частини вулиці. З появою двигунів внутрішнього згорання й автомобілів вони зайняли центральну частину вулиці, а трамвайні шляхи зазвичай відокремлені від основної проїжджої частини вулиці. Перевагами трамваїв є те, що вони, на відміну від паровозів, мають великий початковий обертальний момент і дозволяють рухатись ТЗ із потрібним прискоренням. Обслуговування трамваїв суттєво простіше від обслуговування парових машин, а тим більше від коней, які використовувались у кінській тязі. Трамвай та інші види електричного транспорту є екологічно чистим видом транспорту, який не забруднює навколишнє середовище.

Особливостями трамвая як засобу міського електричного транспорту є те, що він здійснює перевезення населення територією міста на порівняно короткі відстані. Довжина трамвайних ліній $L = 15\text{--}30$ км, середня відстань між зупинками становить $D \approx 0,75$ км, частота руху від 10 одиниць у годину до 20 одиниць у годину, а в час пік може досягати 40–50. Це вносить доволі високі вимоги до транспортних засобів. Для забезпечення достатньої швидкості сполучення на таких коротких ділянках шляху зупинки потрібно зменшити до 10–20 с. Тому конструкція трамвайних вагонів повинна передбачати достатню велику ширину дверей і малу висоту підлоги над рівнем дороги. Трамваї повинні мати достатньо велике прискорення на початку руху та в його кінці.

Режим руху відповідно діаграми такий: прискорення – вибіг – гальмування (рис. 2.2).

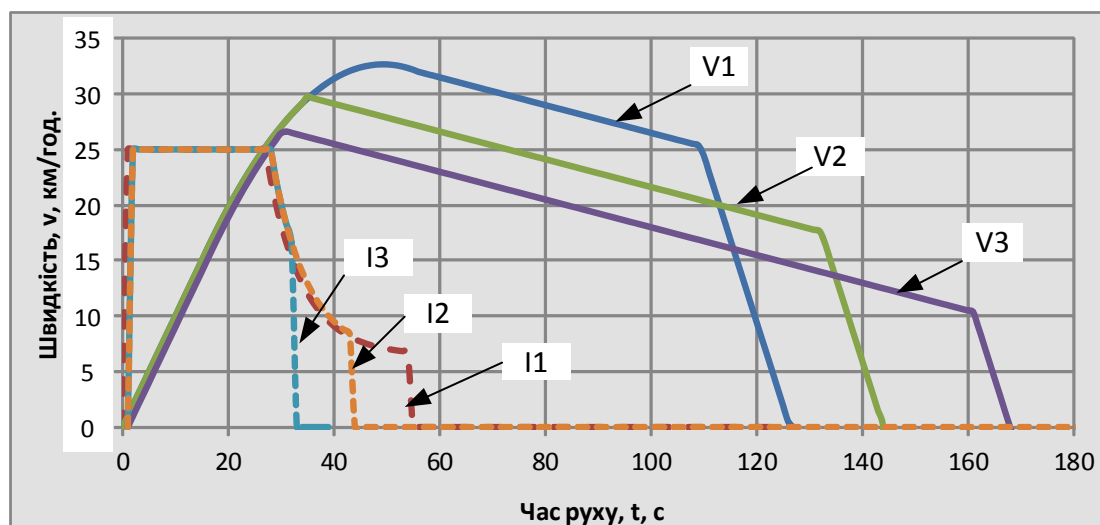


Рисунок 2.2 – Режими руху трамвая за різної тривалості руху:
V1, V2, V3 – графіки швидкості; I1, I2, I3 – відповідні графіки струму

На рисунку 2.2 показано зміну швидкості й струму під час руху трамвая. Як видно з графіків V1, V2, V3, тривалість руху з прискорення змінюється водієм. Трамвай набирає потрібну швидкість, у режимі вибігу рухається за інерцією та переходить у режим гальмування. Струм споживає тільки під час прискорення. Тривалість руху від одного до іншого зупинного пункту залежить від одержаної під час прискорення швидкості. Під час прискорення величина струму регулюється автоматикою та лишається практично постійною.

Зумовлена режимом руху, віддаллю між зупинками та тривалістю часу зупинок, розрахункова швидкість сполучення 14–18 км/год. За такого режиму руху електроенергія витрачається практично тільки на надання прискорення. Сили опору відіграють незначну роль у витратах електроенергії.

З умов експлуатації трамвая, як і інших засобів міського електричного транспорту, впливають вимоги до ТЗ. Вони полягають у тому, що трамвай повинен бути якомога легшим, а двигуни повинні забезпечувати максимально можливе прискорення як під час розгону, так і під час гальмування. Величина прискорення обмежена технічними причинами, а також комфортом пасажирів. У випадку, коли більшість пасажирів стоїть, прискорення не може перевищувати 2–3 м/с². При зручному розміщенні пасажирів у кріслах прискорення може бути більше, що забезпечить більшу швидкість сполучення. Трамваї зі швидкістю сполучення 24 км/год і більше вважаються «швидкісними». Під час експлуатації трамвая важливу роль має рекуперація

електроенергії, яка під час гальмування на зупинках дозволяє суттєво зменшити витрати електроенергії. Крім трамвая, до міського електричного транспорту належить тролейбус і метрополітен.

Переваги трамвая є такі. Трамвай є найбільш екологічно чистим видом транспорту (за належного технічного стану та обслуговування). Оскільки трамвай зазвичай рухається по виділеному полотну від основної проїжджої частини вулиці, то під час його руху виникає менше перешкод і причин вимушеного гальмування, що суттєво впливає на витрати електроенергії. Із цієї причини трамвай може забезпечити більшу швидкість сполучення, ніж тролейбус і автобус. Він є одним із безпечних видів транспорту. Завдяки рейкам і відсутності горючих матеріалів трамвай є найбезпечнішим видом транспорту. Найбільше ДТП викликає автомобіль: автобус на 1 млн перевезених пасажирів створює в 40 разів менше ДТП, ніж особистий автомобіль, а трамвай – у 137 разів [32, 33].

Рейки дозволяють трамваю їхати завжди в одному й тому самому габариті, йому не потрібні буферні зони. Тому для вузьких вулиць трамвай найкращий варіант. На звичайних вулицях трамваю потрібно менше площі, ніж автобусу та тролейбусу. Це дозволяє робити більше озеленення вулиць, ширші тротуари, велосипедні доріжки, паркування [34].

Перевагою трамвая є більша провізна здатність, ніж автобуса й тролейбуса. Оптимальне завантаження тролейбусного або автобусного маршруту не більше 3–4 тисяч пасажирів на годину, тоді як трамвай здатний перевозити до 7 тисяч пасажирів, а в певних умовах і більше. Це дозволяє суттєво розвантажити міські магістралі від великих транспортних потоків [33].

Трамвай масштабований, тобто до одного вагона можна приєднати ще декілька, які рухаються під керуванням одного водія. У такий спосіб зменшуються витрати на експлуатацію й збільшується пропускна здатність трамвайних маршрутів. У трамвая максимальна можлива провізна здатність серед усього міського транспорту. Можливо робити довгі багатосекційні трамваї, які майже не будуть уступати метрополітену. Для автобуса та тролейбуса це не реалізується. З'єднаний тролейбус – це все-таки один тролейбус, тільки інших габаритів, його роз'єднати не можна, до автобуса приєднати інший також не просто.

Система електропостачання трамвая пережила декілька модифікацій із використанням: підземних проводів, прокладених між рейками; третьої рейки для подачі електроенергії, повітряної лінії, пантографа та рейок для від'ємного полюса живлення. Використовувався також однофазний змінний струм зі стандартною частотою 50 Гц та із пониженими частотами 25 Гц, 16,7 Гц, 15 Гц.

Використовувалась різна напруга живлення: низька напруга 450–600 В, і навіть 150 В.

Найбільш технічно зручною та найекономнішою системою вважається живлення постійним струмом напругою 500–600 В з одним повітряним проводом. Така система використовується в більшості трамвайних систем у всьому світі. Коли трамваї стали поширеним і звичним ТЗ, контактна рейка залишилася лише в містах, де неможливо було провести контактну мережу. В Європі – у Лондоні, Парижі, Берліні, Марселі, Будапешті та Празі. У США – у частині Нью-Йорку та у Вашингтоні [34]. У Франції в місті Бордо напруга до трамвайної лінії подається по третій рейці навіть на ділянках, де колія не відмежована від пішохідного та автомобільного руху. Третя рейка (насправді – дві близько розміщені рейки) розміщена посередині колії та поділена на секції по вісім метрів. Кожна секція є незалежною та ізольованою від суміжних і напруга до неї подається лише тоді, коли вона повністю закрыта трамвайним вагоном. Це унеможливує контакт пішоходів чи домашніх тварин із рейкою та ураження їх струмом [35].

Особливостями використання тієї чи іншої системи електричної тяги є використання різних систем електричного живлення. Для електричної тяги в містах України використовується зазвичай струм постійної напруги 550 В. Напруга на трамвай подається по електричному проводу, підвішеному над трамвайною лінією через пантограф. Від'ємний полюс приєднується до рейок за допомогою відсмоктувального кабелю. Для забезпечення живлення трамвайних ліній вздовж них розміщуються тягові станції, які зменшують напругу міської електромережі 10 кВ (6 кВ) і перетворюють у постійний струм потрібної напруги. Далі струм по кабелях передають на ділянки повітряної тягової мережі, а від'ємний полюс до рейки. Тягові підстанції розміщують на віддалі приблизно 2–3 км одна від одної.

Серед недоліків трамвая варто виокремити велику початкову вартість побудови транспортної інфраструктури: прокладання трамвайних ліній, контактної мережі, побудову тягових підстанцій. Проте ці додаткові витрати з часом експлуатації окупаються: зменшенням енергоспоживання на перевезення населення, спрощенням та здешевленням експлуатації, зменшенням втрат на обслуговування.

Недоліком трамвайних ліній в Україні є те, що більшість з них знаходиться в незадовільному стані й конструкція ліній не передбачає шумо- та вібропоглинання. Трамвайні лінії в Україні мають спрощену конструкцію, а це викликає вібрації, великі шуми та нарікання населення. У більшості міст трамвайні колії вимагають модернізації та належного технічного

обслуговування. Якщо порівняти вітчизняні трамваї з трамваями європейських міст, то останні є одним із найтихіших видів транспорту. Їх практично не чути на міських вулицях. Навіть у випадках, коли трамвай майже безпосередньо проїжджає поряд із пішоходом, а вітчизняні надзвичайно шумні та їхня вібрація є однією із причин прискореного руйнування міських будівель. Зі студентських років запам'ятався трамвай біля студентського університетського гуртожитку в Львові, поряд із поштою. О п'ятій годині ранку трамваї виходили на маршрути та своїм скрипом на повороті вулиці будили всіх жителів гуртожитку та навколишніх будинків.

Додатковим недоліком трамвайних ліній є виникнення блукаючих струмів, які негативно впливають на металеві підземні комунікації. Тому під час прокладання трамвайних шляхів потрібно забезпечити надійний захист підземних споруд від цих струмів, наприклад із використанням катодного захисту та інших методів. Як приклад можна навести харківські трамвайні лінії, побудовані у новому Олексіївському районі. На початку їхньої експлуатації всі підземні комунікації водопроводу, майже на протязі 10 років, зазнавали прискореного руйнування, аж до того часу, поки не був впроваджений належний захист від блукаючих струмів.

На жаль, у багатьох містах України з 1995 року почалося знищення трамвайних ліній та їхня заміна, наприклад: у Харкові – маршрутними таксі, а у Києві – тролейбусами й автобусами. Трамвайна мережа Києва стала розділеною на право- і лівобережну, у Харкові також майже розпалася на район Салтівки та відокремлений район Холодної гори та Залютіно. Після заміни трамвая на маршрутки, автобуси, тролейбуси, провізна здатність міського транспорту впала. Концепція екологічно чистої транспортної системи центру міста Києва (метрополітен + трамвай + тролейбус) перестала існувати. У Києві практично цілісної системи трамвайного транспорту не існує. Проектні документи допускають подальшу (30 %) ліквідацію трамвая. Водночас світові тенденції спрямовані на відновлення трамвая [36]. У різних країнах його географія розширюється. Є варіації: наземний вуличний, швидкісний, міжміський трамвай, система трамвай-залізниця. У Західній Європі їм відповідають: трамваї, міські поїзди S-Bahn, U-Bahn, мережа метро, електробуси.

2.3 Тролейбус

Тролейбус – це міський електричний безрейковий вид транспорту, який широко використовується в Україні. Цей вид транспорту має низку переваг – він є одним із дешевших та екологічно чистих. Тролейбус забезпечує

перевезення пасажирів по вулицях із поворотами та пагорбами. Його перевагою є те, що побудова тролейбусної лінії суттєво дешевша, не потрібне прокладання рейкового шляху, а витрати енергоресурсів суттєво менші, ніж у міських автобусах, проте більші, ніж у трамваїв.

Київська тролейбусна мережа – найпотужніша в Україні, і одна з найпотужніших у світі, з'явилася в Києві в 1935 році. Зараз передбачається широке використання тролейбусів і заміна ними трамваїв, автобусів та маршрутних таксі. Обсяг перевезень пасажирів передбачається збільшити в 1,9 рази. Частка тролейбуса зростає за загальною структурою починаючи з 2020 року. У перевезеннях пасажирів тролейбус майже не поступається автобусам, але його швидкість сполучення дещо нижча, зважаючи на габарити тролейбуса й неповороткість на вулицях міста. Його використання можливо за умови надання пріоритету в русі та наявності доволі широких міських магістралей.

Порівняно з трамваєм витрати електроенергії в тролейбуса більші. Причинами цього є те, що сила опору коліс під час руху по міських дорогах істотно більша, ніж у трамвая під час руху коліс залізницею. Крім того, витрати електроенергії в тролейбусі зростають при завантаженні дороги іншими ТЗ. В умовах завантажених доріг доводиться часто гальмувати, і витрати енергії зростають, як показано на рисунку 2.4.

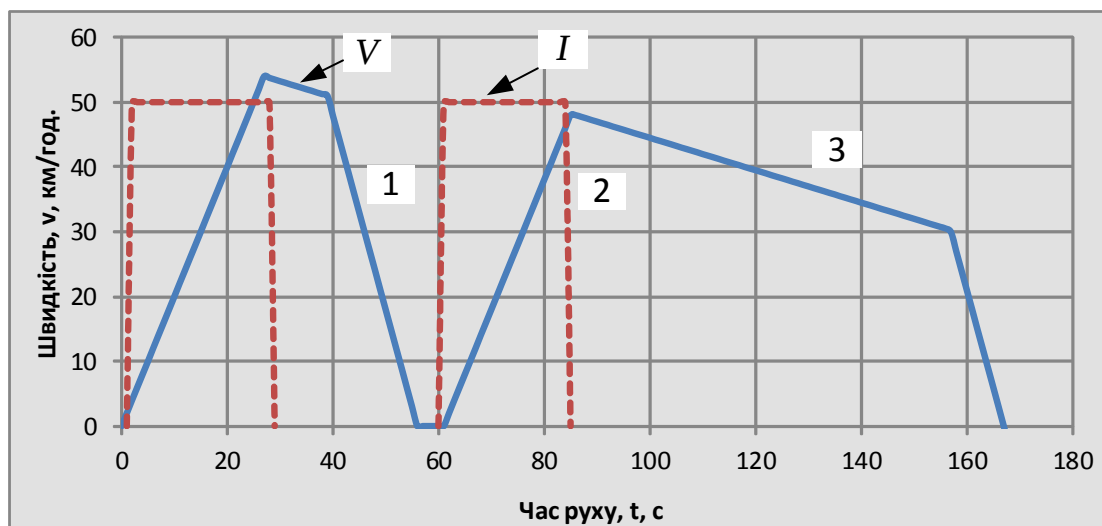


Рисунок 2.4 – Рух тролейбуса завантаженою вулицею: V – швидкість; I – струм двигуна; 1 – гальмування, 2 – прискорення, 3 – вибіг

Наведену на рисунку 2.4 класичну схему руху міського пасажирського транспорту (розгін – вибіг – гальмування) реалізувати на завантажених вулицях

не вдається. Тролейбус вимушений часто гальмувати. Схема руху перетворюється в таку: розгін – вибіг – гальмування – розгін.

Рух тролейбуса по міських вулицях здійснюється з вимушеним гальмуванням, яке багаторазово повторюється на завантажених дорогах. Тролейбус часто переходить із режиму тяги в режим гальмування та прискорення. Витрати електроенергії суттєво збільшуються. Тому в реальних умовах експлуатації витрати електроенергії тролейбусом суттєво більші, ніж трамваєм. За розрахунками, виконаними шляхом моделювання руху, затрати електроенергії на 1 км шляху трамваєм – 1,2 кВт·год, а тролейбусом 3–3,5 кВт·год. Трамваї зазвичай мають виділену полосу руху й вимушені затримки руху у них значно менші. Діючи в Україні система обліку витрат електроенергії, коли рухомі одиниці ТЗ не мають лічильників електроенергії, а облік ведуть тільки організації, що постачають електроенергію, визначити частку витрат кожного виду транспорту неможливо [37]. Нemoжливо також розробити стратегію розвитку видів електротранспорту, впроваджувати енергоощадні технології.

Недоліком тролейбуса є також менша маневреність порівняно з автобусом. Щоб ліквідувати ці недоліки для громадського транспорту, зокрема тролейбуса, виділяють окрему смугу руху. У такому випадку витрати енергії на рух менші й можна реалізувати більшу швидкість сполучення.

В одній із перших праць із теорії електричної тяги Е. Е. Зеерфельднер [38] та книги Edward P. Burch «Electric traction for railway trains» відмічається, що на міський тролейбус (безрейковий електротранспорт) спочатку покладали чималі надії, оскільки він може замінити трамвай і забезпечити рух транспорту по міських вулицях без трамвайних колій. Проте практика показала, що навантаження, яке створює тролейбус на міські дороги, достатньо велике й дорожнє покриття швидко руйнується, а відновлення його потребує значних витрат. Крім цього, тягова мережа тролейбуса вимагає прокладання двох проводів. Зворотній провід, яким у трамваї є рейки, відсутній. Це ускладнює будову тягової мережі, складнішого підвішування проводів, витрат значної кількості міді та захаращення вулиці. Тому з економічних причин тролейбус не використовується, а в тих країнах, де він використовувався, потроху замінюється трамваями. Проте тролейбус широко використовується в країнах колишнього СРСР. В інших країнах світу його використання суттєво менше. З огляду на наведене, доцільним використання тролейбусів може бути тоді, коли міські дороги будуть розраховані на навантаження понад 10 т на вісь.

Відповідно до завдань, які виконують трамвай і тролейбус, їхній характер руху полягає в періоді розгону при ввімкнутому двигуні, вибігу при

вимкненому двигуні й гальмуванні. Тролейбуси мають індивідуальний електричний двигун потужністю 100–150 кВт, а трамваї зазвичай два двигуни меншої потужності. Рух під струмом у них порівняно короткий, від 15 % до 30 % всього часу руху. Часті періоди гальмування в тролейбусів займають 10 % і більше часу руху. Ці чинники зумовлюють те, що витрати електроенергії на рух обумовлені розгоном та гальмуванням. Режим руху суттєво впливає на витрати електроенергії, а ці витрати залежать від досвіду водія, знання маршруту, вміння вибрати оптимальний режим руху на кожній ділянці шляху. Одним з основних чинників є маршрут руху, характер перешкод: дорожні знаки, перехрестя вулиць і вимушені гальмування під час перемикання світлофорів, пробки на шляху, несподівані появи перехожих на дорозі. Для енергозбереження важливу роль має рекуперація. Найдоцільнішим є встановлення пристроїв рекуперації електроенергії безпосередньо на самих ТЗ, які можуть забезпечити надійне рекуперативне гальмування. Оскільки ділянки тягової мережі порівняно короткі, до 1,5 км, то прийнятним є встановлення пристроїв рекуперації на тягових підстанціях, хоча в цьому випадку надійність вимушеного гальмування ТЗ має бути забезпечена окремими гальмівними пристроями на ТЗ.

Система живлення тролейбуса вимагає складнішого підвішування, оскільки в повітряній лінії тролейбусної мережі повинно бути два проводи та ще спеціальні елементи, як то: стрілки, перехрестя, секційні ізолятори. Живлення здійснюється від тягових підстанцій, які перетворюють трифазний струм із напругою 10 (6) кВ у постійний із напругою 600 В [40]. Тягові підстанції розташовуються уздовж тролейбусної лінії. Одна станція може обслуговувати ділянки довжиною 3–5 км. В американських лініях використовується напруга 750–800 В. Використання тролейбусів має ті переваги, що в системі електричного живлення не виникають блукаючі струми. У містах, де одночасно експлуатуються трамвай та тролейбус, використовуються як окремі тягові підстанції, так і сумісні, від яких, через окремі фідери, подають струм постійної напруги як до трамвайної, так і до тролейбусної тягових мереж. Живлення трамвайних та тролейбусних ліній може бути централізоване та децентралізоване. При централізованій системі живлення струм подають до однієї ділянки тягової мережі з однієї тягової підстанції в одному місці. При децентралізованій системі одна ділянка тягової мережі приєднується з двох боків до двох тягових підстанцій. Централізована система живлення використовується в містах, де великі пасажирські потоки й щільність тролейбусних та/або трамвайних ліній велика. На території, де є

окремі трамвайні чи тролейбусні лінії, використовується децентралізована система електричного живлення, наприклад у Криму.

Останнім часом стали розробляти автономні транспортні засоби із електричною тягою. Основна проблема створення полягає у розробці джерел живлення, які могли б забезпечити автономність руху ТЗ. До цього часу створення джерел електричної енергії достатньої ємності є основною причиною, яка затримує розвиток транспортних засобів з електричною тягою. У громадському транспорті вже використовуються тролейбуси і електробуси з автономним ходом. Вони призначені переважно для перевезення пасажирів у містах та по приміській території. Це екологічний та дешевий вид транспорту. Проте автономність їх ходу обмежена. Ємність сучасних акумуляторних батарей дозволяє здійснювати рух у межах одного-двох десятків кілометрів. Тому такі ТЗ використовуються для продовження міських тролейбусних ліній. На території міста вони живляться від тягових ліній міського електричного транспорту, а поза територією міста рухаються за рахунок енергії накопленої в акумуляторних батареях.

2.4 Метрополітен

Метрополітен є найзручнішим, найшвидшим і найдешевшим видом міського електротранспорту. Він забезпечує достатньо комфортні умови перевезення великої кількості пасажирів. Колії метрополітену захищені від атмосферних опадів, він експлуатується в будь-яку погоду та зручний для пасажирів. Витрати електроенергії на перевезення одного пасажирів в метрополітені найнижчі з усіх видів транспорту. Перевага метрополітену у великій провізній здатності. Наприклад, Харківський метрополітен перевозить у середньому 687 тис. пасажирів у день, довжина ліній – 38 км. Київський метрополітен перевозить у середньому 1,36 мільйона пасажирів у день, довжина ліній 69 км. Метрополітен істотно впливає на міську інфраструктуру. Оскільки він дозволяє перевозити велику кількість населення, то біля станцій метрополітену зосереджуються жилі квартали, центри обслуговування населення. Він зручний у використанні й забезпечує населенню з'єднання по всій території міста. Це найбезпечніший і екологічний вид транспорту. Використання метрополітену істотно зменшує навантаження на міські магістралі. Перевізна здатність лінії метрополітену 9 тис. пасажирів за годину.

Поїзд метрополітену в Україні має 5 вагонів, в інших країнах до 8 вагонів. Це обумовлено розмірами станцій, для 5 вагонів довжина станції 100 м, для 8 – 160 м. Конструкція вагонів передбачає наявність декількох двигунів у кожному вагоні. Зазвичай у вагонах використовується чотири тягові двигуни. Система

електричного живлення метрополітенів країн колишнього СРСР – це постійний струм із напругою 800 В. Позитивний полюс напруги живлення приєднується до третьої рейки, а від’ємний до рейок, якими рухаються електропоїзди метрополітену. Третя рейка прокладається вздовж тунелю на висоті приблизно 50 см і до неї знизу притискаються рухомі контакти вагонів. Рейки, якими рухається електропоїзд метрополітену, прокладають на шпалах, ізолюють від ґрунту з метою зменшення блукаючих струмів. Тягові підстанції метрополітену розміщують уздовж ліній метрополітену й вони можуть бути наземного чи підземного виконання. Тягові підстанції перетворюють трифазний струм із напругою 10 (6) кВ у постійний струм із напругою 800 В. Крім тягових підстанцій, будуються понижувальні станції, які забезпечують живлення систем вентиляції, водовідведення, освітлення та автоматики. Використовуються також тягово-понижувальні станції, які забезпечують потрібною електроенергією все обладнання метрополітену.

Режим руху поїздів метрополітену по тунелю відповідає режиму, наведеному на рисунку 2.1, коли ТЗ після розгону рухається певний час у режимі вибігу. Під час гальмування режим рекуперації значною мірою забезпечується профілем тунелю: біля станції зупинки глибина залягання менша, між станціями вона більша. Під’їжджаючи до станції, поїзд піднімається вгору і кінетична енергія переходить у потенціальну. Це дає можливість збільшити прискорення в перші моменти руху після станції та використовувати накоплену кінетичну енергію.

Станції метрополітену з’єднують основні мікрорайони міста. Біля станцій метрополітену зазвичай розміщуються зупинні пункти інших видів міського транспорту. Метрополітен забезпечує сполучення між основними районами міста, а доставку пасажирів до місця призначення здійснюють інші види транспорту. Така організація дозволяє суттєво вирішити проблеми транспортного обслуговування населення міст, зменшити завантаження вулиць.

У метрополітенах інших країн використовуються різні системи енергетичного забезпечення.

Однак метрополітен вимагає значних капітальних витрат для побудови. Це складна комплексна інженерна система. Побудова метрополітену потребує прокладання тунелів, обладнання станції, побудови системи вентиляції та водовідведення, прокладання рейок, забезпечення електропостачання. Енергопостачання метрополітену включає не тільки витрати на тягу поїздів, а також на освітлення, забезпечення роботи ескалаторів, вентиляцію, водовідведення. До складу метрополітену також входять депо, де здійснюється технічне обслуговування рухомого складу. Завдяки великим капітальним

затратам та затратам на експлуатацію метрополітени вигідно будувати у великих містах, де не менше 500 тис. населення. В Україні працює три метрополітени Київський, Харківський і Дніпропетровський. Проєктувався також метрополітен у Донецьку. Серед розглянутих варіантів перевагу надано «легкому» метрополітену, який функціонує, наприклад у Кривому Розі. Витрати на його будівництво за цінами 2013 р. становили 155 000 тис. дол.; очікуваний щорічний прибуток, сформований насамперед за рахунок вартості проїзду – 35 000 тис. дол.; термін окупності 14 (16) років; термін експлуатації рухомого складу метрополітену становить 40 років [41].

Середня віддаль між станціями в Українських метрополітенах 1,4 км. Завдяки більшій віддалі між станціями швидкість сполучення в два рази більша, ніж у наземному електротранспорті та становить 40 км/год.

Недоліком експлуатації метрополітену є порівняно великі затрати часу пасажирів на підходи, спуски і підйоми у споруди метрополітену для посадки в поїзди. Через ці затрати часу жителі, у разі необхідності поїздки на короткі дистанції, віддають перевагу наземним видам. За результатами обстеження метрополітену в м. Харкові середня дальність поїздки пасажира становить 7,4 км [42].

Робота засобів міського електричного транспорту характеризується тим, що вони працюють у режимі поїздок на відстані 10–30 км з частими зупинками. Для трамвая та тролейбуса віддаль між зупинками в середньому становить 750 м, швидкісного трамваю – 1,2 км, метрополітену – 1,5 км. Відділі, на яких працюють ТЗ, зумовлюють їхню швидкість на маршрутах і швидкість сполучення. Трамвай і тролейбус на маршруті мають швидкості не більше 50 км/год і швидкість сполучення 16–17 км/год. Швидкісний трамвай – відповідно 50–70 і 24 км/год, метрополітен 60–80 км/год і 30–40 км/год. Для міського електротранспорту характерна часта зміна навантаження на маршруті. Оскільки на різних ділянках, залежно від інфраструктури міста, кількість пасажирів, які виходять і заходять, різна, то маса ТЗ змінюється майже в два рази.

У метрополітені всі вагони мають зазвичай чотири двигуни потужністю приблизно 50 кВт. Дальність поїздки до 20–30 км по одній лінії, віддалі між зупинками в середньому 1,5 км. Максимальна швидкість руху 60 км/год і до 80 км/год.

2.5 Магістральні залізниці

Магістральні залізниці з'єднують між собою великі міста, регіони і різні країни між собою. Довжина магістральних ліній досягає сотень і декілька тисяч

кілометрів, фактично ними пов'язана вся Земна куля. У 2010 року довжина електрифікованих магістральних тягових ліній становила близько 240 200 км по всьому світу [43]. Магістральні залізниці будувалися спочатку з розрахунку на паровози і використовувалася парова тяга. Пізніше паровози були замінені тепловозами, та в останній час електрифіковано 25 % залізних доріг світу. Протяжність залізних доріг різна на різних континентах і в різних країнах. В Європі електрифіковано 45,7 % доріг, а в Північній та Південній Америці всього 1,7 %. У країнах Південно-Східної Азії (Китай, Японія, Індія) – 20 %. Така велика різниця зумовлена наявністю енергетичних ресурсів та їхньою вартістю. Електрична тяга за своєю економічною ефективністю має переваги там, де є інтенсивні перевезення та більші навантаження. Українські залізні дороги становлять 2,4 % загальної протяжності залізних доріг світу. Загальна протяжність доріг становить майже 22,3 тис. км, із яких електрифіковано 47,4 %, а обсяг перевезень 86,4 % загального обсягу перевезень.

Поїзди залізницями їздять на великі віддалі. Між зупинками на магістральних шляхах не один десяток, а то і сотні кілометрів. Тому режим руху істотно відрізняється від режиму руху трамвая та тролейбуса, як показано на рисунку 2.5.

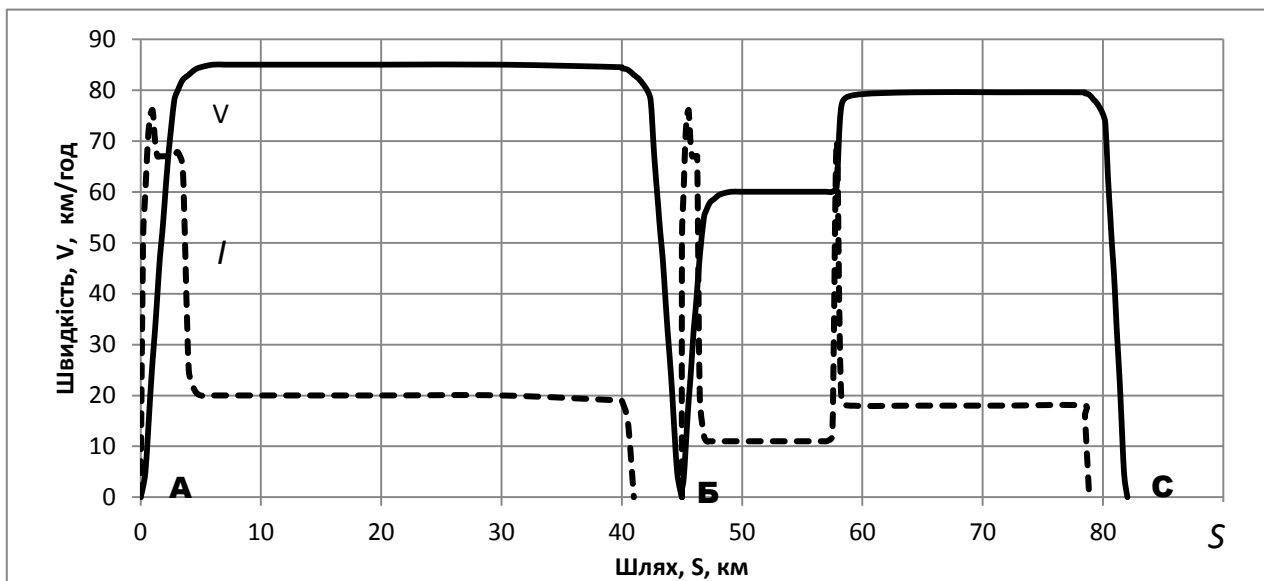


Рисунок 2.5 – Режим руху залізничних поїздів: V – швидкість;
 I – струм двигуна; l – гальмування, А, Б, С – зупиночні пункти

Як видно з рисунка 2.5, основний час руху поїздів – це рух із постійною швидкістю, яка підтримується роботою електричних двигунів у режимі тяги. Під час руху поїзда прискорення та гальмування займає порівняно малий

проміжок часу. Практично залізничні поїзди весь час рухаються в режимах тяги. Режими розгону й гальмування займають усього 5 % відсотків часу руху, а режими вибігу поїздів – приблизно 10 %. Тому основні витрати електроенергії відбуваються завдяки подоланню сил опору. Витрати на прискорення поїзда порівняно невеликі.

Залізничні поїзди здійснюють перевезення населення та перевезення вантажів між містами. Вантажні поїзди, за сьогоdnішніх обсягів перевезення, мають 50 вагонів і більше та довжину більшу кілометра. Пасажирські поїзди дещо менші, у середньому 18 вагонів, довжина їх 300–400 м. Оскільки віддалі між зупинками великі, залізничний поїзд, на відміну від трамваю, може набрати велику швидкість. Завдяки великій масі й швидкості накопичується велика кінетична енергія. Під час руху ця енергія дозволяє долати підйоми й спуски, а під час гальмування й зупинки накоплену енергію доцільно рекуперувати. Проблема рекуперації в залізничних поїздах вирішується трохи простіше, ніж у міському електричному транспорті, оскільки станції рекуперації потрібно розміщати на залізничних станціях чи поблизу, а не по всьому маршруті, як в трамваї та тролейбусі. Накопичена енергія може бути повернена в мережу на початку руху поїзда. Завдяки великій кількості енергії, яку можна рекуперувати, на залізничних станціях, доцільно будувати електричні акумуляційні підстанції. На практиці реалізуються акумуляційні підстанції, що побудовані на нових принципах акумуляції енергії, і серед них на основі трансформаторів із надпровідників [7]. Велика вартість таких акумуляційних підстанцій, які потребують використання кріогенної техніки, окупається завдяки обсягам накопленої електроенергії. Ефективність будівництва акумуляційних підстанцій на основі надпровідних технологій зростає у зв'язку із суттєвим підвищенням вартості електроенергії, технічного прогресу і розробки нових типів надпровідників.

Особливості руху залізничних поїздів впливають на будову залізничних поїздів. За розглянутих режимах руху не раціонально обладнувати кожен вагон тяговим двигуном. Як тяга використовується один локомотив (або декілька), який здатен забезпечити рух поїзда. На самому початку розвитку залізних доріг для забезпечення тяги застосовували зубчасті рейки [31, 38]. Зубчаті рейки дозволяли найефективніше реалізувати силу тяги паровоза. Зараз зубчаті рейки використовуються тільки на гірських виробітках. Для забезпечення руху залізничних потягів необхідно, щоб локомотиви були достатньо масивними, мали велику вагу й розвивали зусилля, достатні для приведення у рух усього поїзда. Тягові зусилля виникають у наслідок сили тертя, тиску локомотиву, у цьому випадку електровоза, на рейки. Щоб забезпечити рух поїзда, електровоз

повинен мати достатню зчіпну вагу. Зчіпна вага локомотиву (електровоза) – це сума всіх навантажень від коліс локомотива на рейки. Отже, вага електровоза використовується для створення сили тяги, а саме сили зчеплення між колесами і рейками. Ця сила повинна бути не меншою від розрахункової зчіпної ваги, необхідної для руху і гальмування поїзда. Реалізація сили тяги і співвідношення між створеною колесами силою тяги і розрахунковою силою тяги називається основним законом локомотивної тяги [20]. Якщо зчіпна вага чи потужність двигунів не достатні для забезпечення руху поїзда, застосовують декілька електровозів, які реалізують потрібну силу тяги.

З режимом руху електрифікованих магістральних залізничних поїздів і методом реалізації сили тяги пов'язана й система енергопостачання. Оскільки до електровозу приєднується велика кількість вагонів, то потужності двигунів великі і струми їхнього живлення достатньо великі, досягають 2 000–4 000 Ампер. Передати такі струми за допомогою мідних проводів за низької напруги практично неможливо. Для зменшення величини струму на залізницях використовують контактні лінії, які працюють за високої напруги. До залізної дороги електроенергія подається високовольтними лініями електропередачі. Поблизу району споживання рівень напруги знижують на трансформаторі підстанції, потім кабельними лініями енергію подають на тягову підстанцію. Використовуються системи постійного та змінного струму. В Україні системи постійного струму працюють за напруги 3 кВ, а змінного однофазного струму частоти 50 Гц, за напруги 25 кВ. Рівень напруги високовольтних ліній електропередачі зазвичай становить – 110 кВ, 150 кВ, 220 кВ, 330 кВ, а також є лінії надвисокої напруги – 400 кВ, 500 кВ, 750 кВ [44].

У сучасних ТЗ використовуються різні типи електродвигунів постійного та змінного струму. Двигуни постійного струму широко використовуються в транспортних засобах через низку експлуатаційних переваг, а саме великої величини початкового моменту під час пуску, широкого діапазону можливостей керування моментом на валу двигуна та швидкості його обертання. Двигуни постійного струму мають можливості роботи в генераторному режимі й забезпечують рекуперацію накопиченої ТЗ кінетичної енергії в електричну.

Залежно від типу двигуни постійного струму виконуються з послідовним, паралельним та змішаним збудженням. Ці двигуни дещо відрізняються за своїми електромеханічними характеристиками. Переважно в електроприводі ТЗ використовуються електродвигуни зі змішаною системою збудження. Керування роботою таких двигунів здійснюється реостатним, імпульсним, імпульсно-частотним та широтно-імпульсним методами. Найпростішою та

найнадійнішою є реостатна система керування. У ній швидкість двигуна регулюється шляхом обмеження величини струму за допомогою реостатів, увімкнених в коло живлення двигуна. У сучасних ТЗ реостатна система керування замінюється імпульсно-частотною та широтно-імпульсною, що дозволяє зменшити витрати електроенергії. Через великі втрати електроенергії замість двигунів постійного струму використовуються асинхронні двигуни змінного струму та вентильні двигуни різних конструкцій, які живляться від постійного струму за допомогою електронних перетворювачів. Такі системи електроприводу прийнято називати електромехатронними системами. Особливостями їхньої роботи є використання сучасної мікроелектроніки та комп'ютерних систем керування на основі сучасних інформаційних технологій.

2.6 Приміські електропоїзди

Дальність перевезення до 100 км, відстань між зупинками 3–5 км, що дозволяє розвивати на маршруті швидкість 50–70 км/год та забезпечити швидкість сполучення 30–35 км/год. Рух під струмом близько 70 % часу. Такі режими руху й навантаження зумовлюють застосовування як моторизованих, так і причіпних вагонів. У міжміських електропоїздах (електричках) моторизовані вагони зазвичай чергуються з причіпними, тобто вагонами без двигуна. Загалом електропоїзд може мати декілька моторизованих вагонів, розміщених у різних місцях поїзда. Потужність двигунів вагонів електричок 200–300 кВт по два двигуни у вагоні. Система електропостачання переважно постійного струму за напруги 3 кВ.

Електропоїзди та міський трамвай характерний для України та країн колишнього Радянського Союзу. У країнах Західної Європи в 60 роках XIX століття, з масовою появою автомобілів, трамвай почав занепадати. Перевезення трамваєм скорочувались і трамвайні лінії демонтувались. Проте незабаром виявилось, що автомобіль у місті створює достатньо багато проблем і трамвай став відроджуватись, правда в іншому вигляді, а саме як швидкісний трамвай. Він об'єднав у собі засоби приміського сполучення, притаманні електропоїздам та міському трамваю. Особливістю його стала більша місткість вагонів, змінився зовнішній вигляд і кількість вагонів, він став нагадувати поїзд з великою кількістю дверей. Вагони мають кілька дверей для прискорення посадки та висадки пасажирів. Збільшилась швидкість руху й рівень комфорту. Якісно змінився рейковий шлях та зменшився шум. Такий швидкісний трамвай деколи вважають електропоїздом, який їде по вулицях міста, або трамваєм, який продовжив свій маршрут у приміській зоні. Оскільки він часто в містах їде по спеціально виділених полосах, а часто по естакадах, його називають легким

метро. Такі швидкісні трамваї поширені в Європейських країнах. В Україні вони працюють у Києві, Кривому Розі, будуються в інших містах [45].

2.7 Високошвидкісний електричний транспорт

До швидкісного транспорту відносять транспорт, який рухається зі швидкостями 200 км/год і більше. Він розвивався на основі звичайного транспорту шляхом покращення ходових якостей транспортних засобів, збільшення потужності двигунів, створення швидкісних доріг. Автомобільний високошвидкісний транспорт створювався на існуючих видів транспорту шляхом вдосконалення: зростали швидкісні характеристики автомобілів. Створювались більш потужні та енергоефективні двигуни внутрішнього згорання: дизельні та карбюраторні. Удосконалювались системи управління. У розвитку швидкісних видів транспорту важливим є розвиток автомобільних доріг. Практично в усіх країнах Західної Європи побудовані автобани, автомобільні дороги, які дозволяють їздити зі швидкостями понад 200 км/год. Вони вже утворили практично одну спільну транспортну мережу. Автобани вже побудовані в Польщі та інших країнах, які безпосередньо знаходяться поряд з Україною.

Високошвидкісний рух передбачає максимальну автоматизацію процесів керування рухом, зменшення участі людини, максимальне використання систем автоведення. Це передбачає, крім технічно досконалого обладнання, розробку відповідного програмного та інформаційного забезпечення руху. Використання систем автоведення, насамперед, засноване на досконалих методах розрахунку руху, можливості згідно з результатами розрахунку передбачити руху ТЗ, події, які можуть відбутися за тієї чи іншої керуючої дії. Тому вдосконалення теорії електричної тяги та тягових розрахунків, підвищення точності та усунення недоліків розрахунків розширення кола завдань, які підлягають розрахункам, є одним із основних завдань.

Розвиток сучасного транспорту характеризується підвищенням швидкостей руху ТЗ. Швидкості автомобілів досягають 200–250 км/год. На залізничних лініях звичними стають швидкості 200–350 км/год, та існує потреба і проявляються тенденції збільшення швидкостей руху поїздів до 500–800 км/год, тобто до швидкостей, притаманних літакам.

Розвиток швидкісних видів транспорту значною мірою пов'язаний із розширенням використанням електричної енергії. Електроенергія є найбільш універсальним видом енергії, який дозволяє вирішити комплекс проблем створення високошвидкісних видів транспорту. Її перевага полягає у відносній простоті перетворення у механічну енергію, відсутності викидів і забруднення

навколишнього середовища. Електроенергія може передаватись на великі віддалі та дозуватись у широких межах, залежно від потреб. Електричні двигуни здатні розвивати великий початковий тяговий момент, потрібний для розгону ТЗ. Їм властива здатність рекуперації, завдяки якій можна зберігати та повторно використовувати накоплену ТЗ механічну енергію.

На транспорті електрична енергія використовується переважно для створення рушійних сил та додання сил опору руху. Для приведення в рух та здійснення руху ТЗ використовуються двигуни різного типу постійного та змінного струму. Серед двигунів постійного струму найширше використовують колекторні двигуни незалежного та змішаного збудження. Двигуни змінного струму – це синхронні та асинхронні двигуни. Основна перевага таких двигунів їхня економічність, зменшення втрат електроенергії, і забезпечення можливостей регулювання швидкості обертання та моменту на валу. В електротранспорті більшою мірою використовують асинхронні двигуни. Їхніми перевагами є простота конструкції, простота пуску, широкі можливості регулювання частоти обертання. Поступово ці двигуни замінюють вентильними (безколекторними) двигунами, які мають електронні системи приведення у рух. Їм властива ціла низка переваг перед колекторними двигунами. Вони більш надійні в експлуатації, компактні, менш матеріаломісткі, дозволяють забезпечувати великі швидкості обертання, мають достатній початковий обертовий момент. Керування роботою таких двигунів здійснюється за допомогою електронних елементів. Це стимулює впровадження комп'ютерних, інтелектуальних систем керування роботою ТЗ. Електродвигуни можуть бути вмонтовані безпосередньо в колеса ТЗ, мотор-колеса і суттєво спростити конструкцію ТЗ.

Розглянуті двигуни створюють обертовий момент, який безпосередньо або за допомогою трансмісії, передається на тягові колеса і приводять ТЗ у рух. На використанні двигунів заснована робота усіх колісних транспортних засобів. Крім двигунів, які створюють обертовий рух, у ТЗ використовують лінійні двигуни. Лінійні двигуни можуть працювати як на постійному, так і на змінному струмі. Двигуни, що працюють на змінному струмі, – це синхронні та асинхронні двигуни. Фактично лінійні двигуни – це двигуни, у яких статор і ротор розгорнуто вздовж полотна дороги. Вони створюють механічну силу, яка діє у напрямку руху і переміщує ТЗ. Використання змінного чи постійного струму на електротранспорті зумовлене тільки технічною доцільністю для кожних конкретних цілей, сучасна електроніка дозволяє ефективно перетворювати один тип струму в інший.

Приведення у рух і переміщення ТЗ уздовж шляху забезпечують сили тяги, направлені вздовж шляху, та супроводжують сили опору, на додання яких витрачається енергія двигуна. У колісних видах транспорту сили тяги виникають у результаті взаємодії коліс із дорожнім полотном, завдяки силам тертя під час обертання коліс. Разом із тим тертя між колесами ТЗ і дорожнім полотном має і негативний бік, оскільки на його додання витрачається значна частина енергії. Щоб зменшити витрати на тертя, необхідно підняти ТЗ над поверхнею дороги і приводити у рух без контакту з поверхнею дороги. У такому разі витрати електроенергії на додання сил тертя суттєво зменшуються. Проте втрата контакту з поверхнею дороги означає і втрату сил тяги. Для забезпечення тяги ТЗ використовують засоби, які створюють сили, направлені вздовж напрямку переміщення. Це лінійні електродвигуни, реактивні двигуни, повітряні вентилятори та ін. За такими принципами забезпечення руху побудовано ряд транспортних засобів – ТЗ на повітряній або магнітній подушці.

Повітряна подушка піднімає ТЗ над поверхнею дороги завдяки тиску шару повітря, розміщеного між дорожнім полотном та ТЗ. Тертя між колесами ТЗ та дорожнім покриттям замінюється тертям між шарами повітря, яке суттєво менше. Для створення сил тяги ТЗ на повітряній подушці використовують зазвичай вентилятори, які, крім нагнітання повітря у повітряну подушку, створюють силу тяги. У деяких ТЗ, які рухаються по трубах, для створення сил тяги використовують різницю тисків повітря перед ТЗ та за ним.

Магнітна подушка піднімає ТЗ завдяки взаємодії магнітного поля магнітів, розміщених у полотні дороги та на ТЗ. Вона забезпечує підвіску, тобто левітацію, і усуває тертя між ТЗ та поверхнею шляху. Для забезпечення руху ТЗ використовують лінійні електричні двигуни. Робота двигунів зазвичай керується інтелектуальними комп'ютерними системами.

Ефект електромагнітної левітації полягає в утриманні фізичного об'єкта у певній точці простору за допомогою магнітного поля, яке компенсує силу земного тяжіння. Магнітна левітація – це стійке положення об'єкта на певній відстані в гравітаційному полі, коли сила земного тяжіння компенсується силами, які створює магнітне поле.

На сьогодні використовуються три технологічні рішення електромагнітної підвіски [46]:

- електромагнітна підвіска – *EMS*, з використанням електромагнітів;
- електродинамічна підвіска – *EDS*, з використанням надпровідникових магнітів;

– підвіска на постійних магнітах (вважається потенційно найбільш економною системою).

Ці технологічні рішення реалізують варіанти магнітного підвішування, засновані на принципах відштовхування або протягування [47].

Електромагнітна підвіска EMS. Принцип дії полягає у тому, що використовуються сили притягання або відштовхування магнітів. Теоретично доведено (теорема С. Ерншоу), що така підвіска не може забезпечити стійкого стану рівноваги. Тому тривалий час вона не використовувалася. Але з розвитком систем автоматичного керування було показано, що використання системи динамічного регулювання відстані між магнітами дозволяє забезпечувати стан левітації. Така динамічна підвіска працює за принципом зворотного зв'язку з використанням електромагніта. Змінюючи струм електромагніта у гравітаційному полі Землі, можна забезпечити стійке положення або левітацію.

Водночас один магніт повинен бути електромагнітом, а інший може бути постійним магнітом або предметом, виготовленим із феромагнітного матеріалу. Коли використано два магніти: постійний магніт та електромагніт, підвіска може працювати за принципом притягнення різнополюсних сторін магнітів або відштовхування однополюсних. Якщо використано феромагнітний матеріал, який намагнічується в магнітному полі, то реалізується тільки принцип притягання. Схема підвіски такого поїзда показана на рисунку 2.6.

Поїзд із електромагнітною підвіскою *EMS* рухається над Т-подібним залізничним полотном, яке знаходиться на естакаді (рис. 2.6). Знизу полотна закріплені залізні рейки (3). Під днищем, на загинах вагону, розміщені потужні електромагніти (1). У верхній частині між поїздом та естакадою розміщено датчик висоти (4), який є елементом системи автоматичного керування. По боках вагону розміщені стримувальні магніти (3), які обмежують бокове відхилення вагону від естакади.

Працює система електромагнітної підвіски *EMS* так. Коли на магніти вагона подається струм, осердя електромагніта намагнічується, відповідно намагнічується рейка та вагон поїзда притягується знизу до полотна естакади. Вагон піднімається та між ним і естакадою утворюється повітряний простір. Датчик вимірює віддаль між вагоном поїзда та естакадою і виробляє відповідний сигнал, подаючи його до системи автоматичного керування (САК). Згідно зі значенням сигналу датчика регулюється струм електромагніта так, щоб вагон знаходився над естакадою, на задані віддалі – близько 10 мм. Під час руху САК відстежує зміну віддалі поїзда від естакади та підтримує стан левітації. САК реалізує принцип керування за відхиленням.

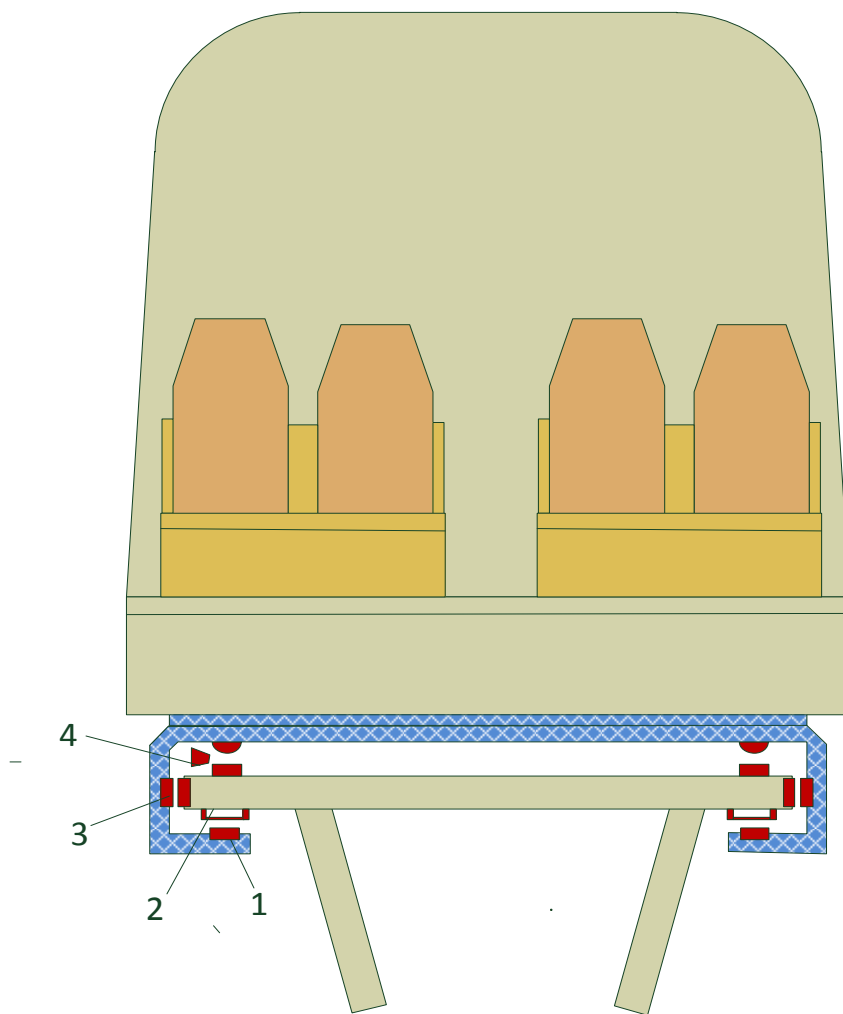


Рисунок 2.6 – Поїзд із електромагнітною підвіскою EMS: 1 – електромагніт вертикальної підвіски; 2 – феромагнітна рейка на естакаді; 3 – магніт горизонтальної стабілізації; 4 – датчик віддалі між вагоном поїзда та естакадою

У розглянутій системі витрати електроенергії на підтримання левітації порівняно невеликі. Вони ідуть тільки на підтримку положення поїзда, практично без виконання механічної роботи. Тертя між частинами поїзда та естакадою відсутнє. На основі електромагнітного підвішування створені поїзди на магнітній подушці, які отримали назву «маглев». Такі поїзди їздять в Японії, в Китаї, інших країнах. Перші експериментальні маглеви були побудовані в Німеччині і колишньому Радянському Союзі. У Німеччині маглев побудував і запатентував інженер Герман Кемпер [48]. Поїзд «Transrapid» себе економічно не оправдав і патент був проданий у Японію.

Магнітна підвіска забезпечує левітацію поїзда, рух без тертя й малі затрати електроенергії під час руху. Але маглев потрібно приводити у рух, розганяти до потрібної швидкості та зупиняти. Для забезпечення руху використовують лінійні синхронний чи асинхронний двигуни. Лінійний електродвигун – це двигун, у якому ротор і статор мають дуже великий радіус, розвернуті у пряму лінію. Синхронний двигун передбачає, що ротор і статор одночасно є магнітами, асинхронний має електромагніт й контури з електропровідного матеріалу.

У синхронному двигуні на електромагніти статора подається трифазний змінний струм, який створює обертальне магнітне поле. При взаємодії з полем магнітів статора ротор здійснює обертання. У лінійному двигуні статор, розгорнутий у пряму лінію, та його обмотки створюють магнітне поле, яке біжить в подовжньому напрямі. Магніти ротора взаємодіють із цим полем і переміщують ротор вздовж первинного елемента. У поїзді роль статора може виконувати дорожнє полотно з розміщеними на ньому обмотками електромагніта, а роль ротора сам поїзд. Швидкість руху поїзда синхронна із частотою, а ймовірніше зі швидкістю переміщення магнітного поля. Регулюючи частоту струму статора, та вибравши потрібне значення кроку розміщення обмоток, можна регулювати швидкість поїзда. У лінійному двигуні прийнято статор, який розгорнуто в подовжньому напрямку, називати первинним елементом, а ротор, елемент якого переміщується, вторинним елементом.

Рух поїзда із електромагнітною підвіскою *EMS* забезпечує лінійний синхронний двигун, обмотки первинного елемента якого змонтовані на естакаді, а магніти вторинного елемента на вагонах поїзда. Поїзди зазвичай мають 6–8 вагонів. Перший і останній вагони мають зовнішню частину, виконану в аеродинамічній формі, яка забезпечує зменшення опору повітря.

Первинний елемент лінійного двигуна може бути розміщений у місці знаходження магнітів горизонтальної стабілізації на естакаді (рис. 2.6, п. 3). У такий спосіб для руху поїзда струм подається до естакади. На поїзд струм не подається. Для забезпечення електричного живлення поїзда та розміщених на ньому магнітів слугують акумулятори та генератор. Генератор розміщують на частині довжини вагона. Він одержує енергію завдяки електромагнітній взаємодії із магнітами первинного елемента, розміщеними вздовж естакади. Фактично він відбирає частину енергії, яка подається на естакаду для приведення маглева у рух. Під час руху електроенергія до магнітів вторинного елемента подається від генератора, а на зупинках, при початку руху, від

аккумуляторів. Керування роботою поїзда, його рухом здійснює електроніка. Основний режим руху – безпілотний.

Електродинамічна підвіска EDS ґрунтується на принципі індукції магнітного поля та взаємодії магнітів. Під час переміщення магніта в розміщеному в його магнітному полі електричному контурі індукується струм. Цей струм створює магнітне поле. Індуковане поле, відповідно до правила Лоренца, протидіє тому магнітному полю, яке його створило. Сили взаємодії цих полів відштовхують магніти. Вагон, який містить магніти, індукує в покритій електропровідним матеріалом естакаді магнітне поле, а поміщені на ньому магніти піднімають його над естакадою на висоту до 100–150 мм. Перевагами такої системи є те, що віддаль між поїздом і естакадою підтримується автоматично, без використання системи керування. Причому положення рівноваги вагона стійке. Оскільки надпровідникові магніти можуть створити надсильні магнітні поля, то такий принцип дозволяє забезпечити левітацію масивного маглева.

Якщо у рухомому поїзді розмістити магніти, то під час руху над електропровідними контурами естакади магніти поїзда взаємодіють із магнітним полем контурів та піднімають поїзд над естакадою. Така система забезпечує стійке положення тільки у тому випадку, коли магніти мають діаманетні властивості, є діаманетиками і виштовхують зовнішнє магнітне поле.

Властивість діаманетизму притаманна надпровідниковим магнітам. Надпровідником є провідник, який не чинить опору струму, його електричний опір рівний нулю. Явище надпровідності притаманне деяким металам та керамікам, і проявляється за температур, менших від температури переходу у надпровідний стан – T_C . Температура переходу до надпровідного стану – T_C різна для різних матеріалів. Щоб охолодити до такої температури більшість матеріалів, потрібно використати зріджений гелій.

Електромагніт, виготовлений із надпровідника, є ідеальним діаманетиком. Його відносна магнітна сприйнятливість $\mu = -1$. Він повністю виштовхує зовнішнє магнітне поле. Виштовхування зовнішнього магнітного поля надпровідником пояснюється тим, це поле індукує струми, які, за відсутності опору, повністю компенсують зовнішнє поле. Явище діаманетизму відкрите у 1933 році німецькими фізиками Вальтером Мейснером та Робертом Охзенфельдом. Воно отримало назву ефекту Мейснера [49]. Прояв ефекту Мейснера показано на рисунку 2.7.

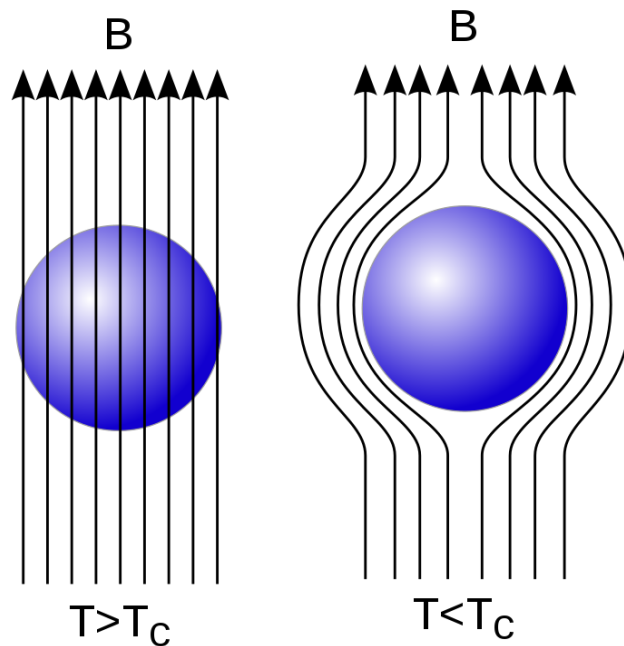


Рисунок 2.7 – Ефект Мейснера – виштовхування магнітного поля надпровідником: B – силові лінії магнітного поля, T – температура надпровідника, T_c – критична температура переходу у надпровідний стан

Предмет у вигляді кулі розміщено у зовнішньому магнітному полі з індукцією B . За температур, вищих за температуру переходу до надпровідного стану $T > T_c$, магнітне поле вільно проходить через предмет і поширюється по усьому просторі. Коли предмет охолоджується, а його температура стає менше температури переходу $T < T_c$, він стає надпровідником. Після переходу до надпровідного стану зовнішнє магнітне поле виштовхується із надпровідника та охоплює кулю (рис. 2.7).

Сам надпровідник стає магнітом і на нього діє сила відштовхування. Якщо магнітне поле B із віддалю ослабне, а на кулю діє сила земного тяжіння, то при переміщенні кулі встановлюється рівновага діючих сил і куля переходить у стан левітації. Зовнішнє магнітне поле охоплює кулю з усіх боків і стан левітації є стійким.

У США можливість використання магнітної левітації надпровідників для поїздів досліджували Джеймс Пауелл і Гордон Дамбі. У 1969 році вони отримали патент на високошвидкісний потяг, що працює за принципом електродинамічної підвіски *EDS* [50]. Розробками Д. Пауелла і Г. Дамбі зацікавилися в Японії. У 1972 р. там було створено перші прототипи маглева на надпровідникових магнітах LSM200 і ML-100. У 1977 році створено модель маглева ML-500. Після удосконалення, через за два роки, він зміг досягти

швидкості 517 км/год, що стало рекордом. Маглев відповідно до запропонованого патенту потребує побудови окремої колії, розміщеної зазвичай на естакаді. Схема поїзду подана на рисунку 2.8.

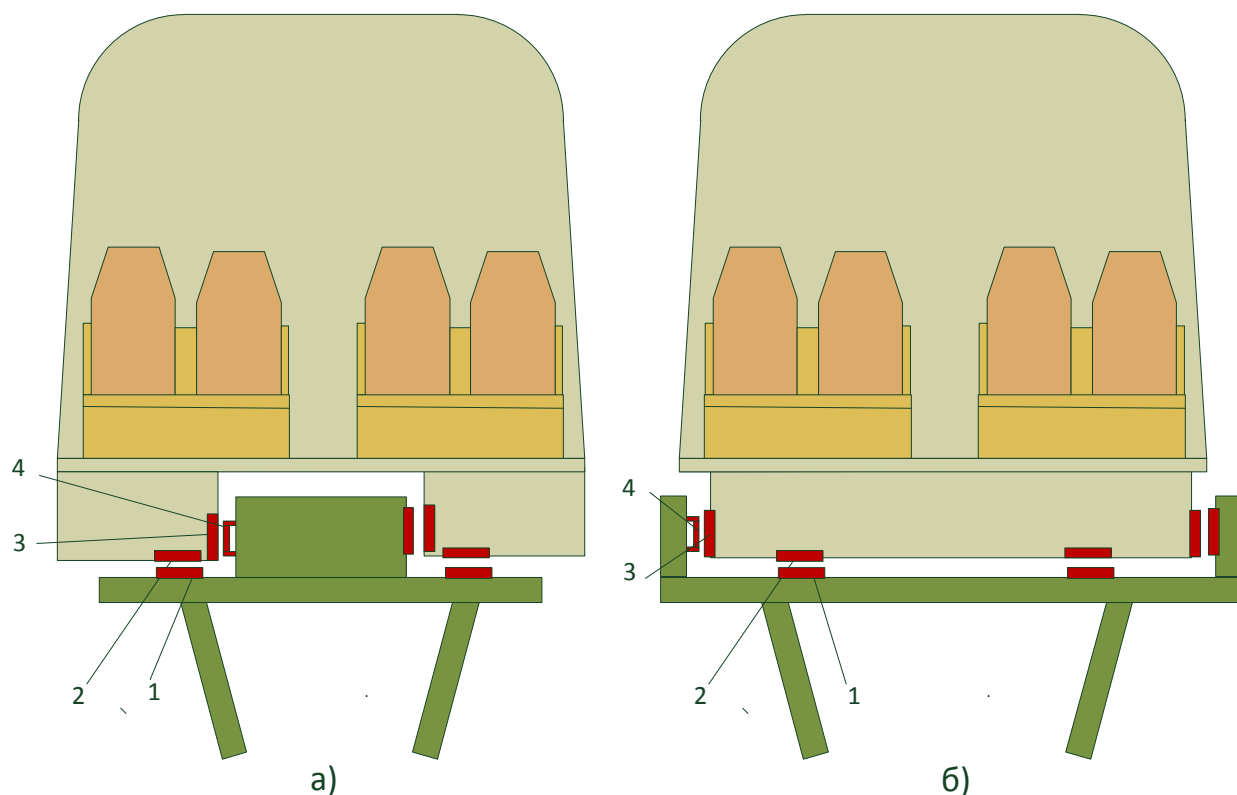


Рисунок 2.8 – Поїзд з електродинамічною підвіскою *EDS*: а) – естакада із залізничною колією або полосами з феромагнітного матеріалу; б) – естакада з алюмінієвими контурами; 1 – рейки, полоси чи контури; 2 – надпровідникові магніти; 3, 4 – первинний і вторинний елементи лінійного двигуна

Як видно з рисунка 2.8, маглев вільно підвішений над естакадою. Магніти маглева виконано з надпровідника. У рух він приводиться лінійним асинхронним двигуном. Варіанти виконання естакади та відповідна конструкція маглева відрізняються місцем розміщення лінійного електродвигуна. На рисунку 2.8, а) первинний елемент лінійного двигуна розміщено між рейками (або між електропровідними полосами), на рисунку 2.8, б) показано розміщення первинного елемента двигуна по краях естакади.

Щоб забезпечити діамагнітними властивостями магніти, потрібно постійно охолоджувати. Надпровідність магнітів з'являється за температур, менших за температури переходу – T_C у надпровідний стан, близьких до абсолютного нуля. Абсолютний нуль температури це 0 K за шкалою Кельвіна, або – 273,15 °C згідно зі шкалою Цельсія. Залежно від матеріалу температура переходу більшості надпровідників $T_C = 4\text{--}40$ K. Забезпечують таку

температуру, розміщуючи магніт у кріостат із рідким гелієм. У кріостаті використовують два контури охолодження: у першому охолоджують до температури, меншої за температуру кипіння рідкого азоту, а у другому – до температури рідкого гелію. Температура кипіння гелію 4,21 К, азоту –77,4 К (–195,75 °С). Обладнанням, призначеним для одержання таких температур, є кріостати складної конструкції, які є доволі дорогими. Сам процес охолодження потребує затрат електроенергії.

Науковий прогрес спрямований на те, що вчені намагаються винайти надпровідникові матеріали, у яких стан надпровідності підтримується за кімнатних температур. Найдені нові надпровідні матеріали, які мають надпровідність за температури рідкого азоту, вищої за 77,4 К. Їх називають високотемпературні надпровідники (ВТНП). Матеріалом таких надпровідників є кераміка, яка пройшла термічну обробку. Індукція магнітного поля таких надпровідників досягає 18 Тесла. Такі матеріали вже використовуються, але їхнє використання пов'язане із технологією. Проблема технології полягає у виготовленні обмоток магніту із кераміки. Кераміка доволі крихкий матеріал і зробити з неї дріт неможливо. Надпровідникові магніти виготовляють у вигляді тороїду, еліпсоїду або соленоїду. Для їхнього виготовлення використовують спеціальні технології, наприклад керамічний порошок засипають у трубки із срібла чи іншого матеріалу, або напилують на металеві полоси. Після цього матеріал запікають, він проходить спеціальну термічну обробку, і одержують надпровідниковий магніт.

Рідкий азот є порівняно дешевим і використання його в 50 разів дешевше, ніж гелію. Нещодавно 29.10.2020 з'явилося повідомлення НАН України [51, 52]: «Приголомшлива надпровідність: перший надпровідник при кімнатній температурі бентежить і збиває з пантелику вчених» (за статтею журналу «Nature»). Отже, наука розвивається і надпровідність вже знаходить практичне використання, наприклад, у роботі [7] розглядається практичне використання надпровідності при створенні станцій рекуперації на залізничному транспорті.

Опір обмотки надпровідникового магніта дорівнює нулю. Тому такий магніт не потребує зовнішнього живлення для підтримання магнітних властивостей. Достатньо один раз пропустити через нього струм потрібної величини, а потім струм циркулює практично вічно. Сам контур, із циркулюючим у ньому струмом, стає постійним магнітом. Такі магніти, крім діамагнітних властивостей, мають значно більші магнітні поля, ніж магніти із феромагнітним осердям. В електромагнітах із феромагнітним осердям максимальна індукція магнітного поля 1,2–2 Тл, а надпровідникові електромагніти із кераміки можуть створювати поля 18 Тл та більше. Магнітне

поле надпровідникових магнітів достатньо стабільне. У результаті постійної взаємодії із зовнішніми магнітами величина магнітного поля дещо спадає, орієнтовно до 10 % за рік. З часом магнітне поле розсіюється і для його підтримання потрібно поповнювати струм в обмотках магнітів. Це виконується відповідним підключенням надпровідникового магніта до джерела живлення.

Недоліком електродинамічної підвіски – *EDS* та маглевів на надпровідниках є те, що спочатку руху, за малих швидкостей, індуковані струми не великі та сили відштовхування недостатні. Тому такі поїзди мають додаткові колеса, які за малої швидкості опираються на естакаду [47]. Після набору достатньої швидкості, близько 150 км/год, маглев піднімається над естакадою і рухається без опору.

Широке використання маглева на електродинамічній підвісці стримується необхідністю будувати спеціальні естакади. Автори патенту на маглев на надпровідниках Д. Пауелл і Г. Дамбі, продовжуючи свої розробки, запропонували у 1998 р. патент, який дозволяє використовувати маглев на звичайних, відповідно пристосованих залізних дорогах. У патенті розглянуті пропозиції відносно пристосування звичайних залізничних колій для забезпечення руху маглева [53].

Аналіз рекордів і досягнень розвитку високошвидкісного руху поїздів варто розпочати з того, що ще у 1979 році відразу дві країни – Західна Німеччина і СРСР – запустили експериментальні зразки пасажирських маглевів. Маглев (*magnetic levitation*) – поїзд на магнітній подушці. Німці зробили рекламу – маглев возив по коротенькій трасі відвідувачів Міжнародної транспортної виставки ІВА. У СРСР реклами не було й перший маглев ТП-01 їздив по заводській 36-метровій трасі [54].

У Китаї, у Південно-західному університеті Цзяотун розроблено прототип поїзда, який використовує магнітну подушку для розгону. Поїзд стабільно розганяється до 620 км/год, у майбутньому інженери планують збільшити цю швидкість до 800 км/год. Автори порівнюють його характеристики з аналогічною системою, яка проходить тестування в Японії. Японський маглев використовує рідкий гелій для досягнення надпровідності за наднизьких температур у 269 °С. Китайський поїзд працює на рідкому азоті. Це знижує вартість технології в 50 разів. Китайський поїзд здатний досягти левітації з місця, на відміну від японського прототипу, який спочатку бере розгін на монорейці [55].

2.8 Транспортна інфраструктура і розвиток високошвидкісного транспорту

Для досягнення високих швидкостей руху, крім розвитку транспортних засобів, потрібно забезпечити відповідну транспортну інфраструктуру: побудову сучасних транспортних магістралей, дорожніх розміток, систем автоматики та телемеханіки, станцій техобслуговування, зупиночних пунктів та платформ, дорожніх розв'язок, тягових мереж, стрілочних переводів на залізницях, розвиток систем автоматики і телемеханіки, зв'язку та інформаційних технологій. Отже, потрібно сформувати єдину транспортну систему регіону включаючи інформаційні та навігаційні технології.

Сумним прикладом відставання у розвитку транспортної інфраструктури є, на жаль, українські залізниці. Перед проведенням чемпіонату Європи з футболу, Євро 2012, для забезпечення швидкісного сполучення між містами, у Південній Кореї Укрзалізниця придбала поїзди «Хюндай», але транспортну інфраструктуру практично не змінила. Поїзди «Хюндай», розраховані на швидкості 160 км/год, а в умовах існуючої інфраструктури забезпечували швидкість сполучення 80 км/год.

Українські залізниці, які є одними з найбільших по своїй протяжності, не розраховані на такі швидкості. На залізниці достатньо багато поворотів, радіус малої кривизни яких не дозволяє розвивати швидкості, на які розраховані поїзди «Хюндай», рейкове господарство й обладнання за таких швидкостей не працює, тягова мережа та її спецчастини також. Такі ж швидкості залишились до поточного 2022 р.: поїзди Інтерсіті типу «Хюндай» долають відстань від Києва до Харкова у 480 км за 5 год 51 хв, тобто швидкість сполучення 82 км/год.

Україна має одну із найрозвинутіших залізничних мереж. Протяжність мереж 22 050 тис. км [43]. Проте стан доріг і розвиток транспортної інфраструктури низький. Максимальні швидкості руху у вантажному перевезенні до 100 км/год у пасажирському – до 140 км/год. Збільшити швидкості не дозволяє стан залізниці, стрілочні переводи, малі радіуси кривизни, застаріла автоматика. Необхідна реконструкція і перебудова доріг, повне оновлення автоматики, телемеханіки і зв'язку.

Розвитком швидкісного пасажирського руху слід прослідкувати на прикладі Японії [46]. Перше завдання, яке було поставлене ще у 1956 р. в Японії, – це реконструкція існуючої залізниці в напрямку забезпечення великих швидкостей руху. Першими завданням було збільшення ширини колії від стандарту 1 067 мм до 1 435 мм і закріплення та забезпечення стабільності

залізничного полотна, побудова естакад, мостів, тунелів. На залізниці впроваджена система живлення змінним струмом $2\text{ кВ} \cdot 25\text{ кВ}$. У подальшому розвивалось виробництво поїздів 1-го і 2-го поколінь з поступовим нарощування швидкостей сполучення. Зараз використовуються поїзди третього покоління з регулярною експлуатацією на швидкості 300 км/год. Велика увага була приділена аеродинаміці поїзда, оскільки за таких швидкостей найбільший вплив на рух поїзда має аеродинамічний опір повітря. Поїзди забезпечують комфорт пасажирів, а також швидке сполучення, яке займає невелику кількість часу і практично скорочує віддалі між містами.

Японська залізнична транспортна компанія «JR Tokai» у 2015 р. повідомила про чергове успішне випробування маглева – поїзда на магнітній подушці із семи вагонів, який побив рекорд 12-річної давнини та розвинув швидкість у 590 км/год. За цим самим тестовим учасником траси у 2003 р. був зафіксований рекорд швидкості 581 км/год [56].

Протилежний, позитивний приклад, демонструє Японська залізнична мережа «Сінкансен». Перед олімпіадою 1964 р. для забезпечення швидкісних перевезень, насамперед, була виконана заміна старіших японських залізничних колій шириною 1 067 мм на колії шириною 1 435 мм. Заново була створена належна інфраструктура. Сінкансен почали використовувати поїзди власного виробництва зі швидкістю сполучення 210 км/год. У подальшому ці поїзди замінялись більш удосконаленими серіями. Зараз залізнична мережа «Сінкансен» є найбільш передовою у світі: швидкості руху електропоїздів піднялись до 350 км/год, об'єм перевезень найбільший, ніж в усіх у залізницях світу, забезпечується повна безпека і комфорт поїздки пасажирів. За 50 років не було жодної аварії зі смертельним випадком. На залізничній мережі «Сінкансен» почали використовувати поїзди із магнітною підвіскою, маглеви, які розвивають швидкості до 400 км/год [57]. Між містами Токіо та Нагоя йде будівництво комерційних ліній поїздів на магнітній подушці, завершення заплановано на 2027 рік – довжина дороги 286 км, яку маглев буде долати за 40 хвилин. Водночас швидкісний поїзд «Сінкансен» цей шлях проходить за 78 хвилин. Автомобіль проїжджає від одного міста до іншого за 3 год 49 хв.

Китай заявив про розробку маглева, у якому буде використовуватись надпровідник, який працює при азотних температурах [55]. Розглядаючи питання швидкісних поїздів, необхідно звернути увагу на традиційні поїзди з колесами, які рухаються на рейках. Швидкість таких поїздів 200–350 км/год. Ці поїзди вже міцно увійшли в повсякденне життя передових країн світу. У Франції поїзди TGV з'єднують на півдні Париж із Марселем, на півночі з Ліллем, на схід до Германії, Франкфурта, Берліна, курсують швидкісні поїзди в

Іспанії, Італії зі швидкостями 320–350 км/год. У Германії, як зазначається в [43], швидкості обмежені 300 км/год тим, що віддалі між зупинками є відносно малими.

Висновки до розділу

У цьому розділі розглянуто основні види електричного транспорту та їхні характеристики. Показано, що характеристики транспортних засобів суттєво залежать від призначення конкретного виду ТЗ, завдань, які він вирішує.

Міський електричний транспорт забезпечує масове перевезення пасажирів територією міста. Він їде на порівняно коротку відстань з частими зупинками і перевозить велику кількість пасажирів. Тому засоби міського електротранспорту повинні мати розміри достатні для перевезення потрібної кількості пасажирів. Конструкція ТЗ повинна забезпечувати швидку посадку та висадку пасажирів. Для цього ТЗ обладнують рядом дверей порівняно великого розміру і пристроями, які полегшують посадку пасажирів. Маршрути руху міського електротранспорту обладнують зупинними пунктами чи платформами, з розрахунком, що рівень платформи відповідав рівню підлоги у ТЗ. Режим руху засобів електричного міського транспорту передбачає розгін вибіг та гальмування. Основні витрати енергії здійснюються на розгін до потрібної швидкості. Тому маса транспортних засобів повинна бути якомога меншою. Виконуючи тягові розрахунки, основну увагу варто приділяти режимам розгону ТЗ. Сили опору в таких режимах руху несуттєво впливають на витрати електроенергії, на час та швидкість руху. Тому наближені методи розрахунків, виконані спрощеними методами, не вносять великих похибок у результати розрахунків. Після вибігу, а також під час гальмування електроенергія руху втрачається, тому задля економного використання електроенергії ТЗ потрібно обладнувати пристроями рекуперації енергії. Тягові мережі міського електротранспорту, згідно з рекомендаціями безпеки, не можуть працювати при великій напрузі. Низька напруга на проводах тягової мережі зумовлює великі величини струму та обмежує довжину проводів, по яких подається електроенергія. Проводи тягової мережі секціонують, розділяють на окремі секції. Це накладає умови на конструкцію тягової мережі та розміщення тягових підстанцій.

Під час розгляду особливостей основних видів міського електротранспорту, а саме трамваїв і тролейбусів, показано, що перевагу варто надавати трамваю. Його перевізна здатність суттєво більша від тролейбуса. В умовах міських, завантажених транспортом вулиць, трамвай вимагає менше місця, він легше вписується в інфраструктуру вузьких міських вулиць. Витрати

електроенергії на експлуатацію трамваїв у два, а то більше разів менші, ніж тролейбусів. Причиною цього є не тільки менший опір руху по залізниці, ніж по шосе, а часті зупинки, гальмуванням руху тролейбусів по завантажених міських дорогах. Для організації економних витрат під час експлуатації тролейбусів потрібні широкі міські магістралі, не завантажені іншим транспортом, або виділені ділянки руху міського транспорту. Затрати на побудову та підтримання експлуатації таких шляхів на протязі багатьох років перевищують затрати на побудову й експлуатацію трамвайних ліній. Шум та вібрація трамваїв старих конструкції усуваються шляхом належно влаштованих трамвайних колій та конструкцій вагонів із пристроями амортизації. Трамваї, які перевозять пасажирів у містах Європи, є найтихішим видом транспорту.

Особливостями залізничного транспорту є режими руху з великими віддалями та відносно рідкими зупинками. Це зумовлює більші швидкості та режими руху, здебільшого під тягою. Тому витрати електроенергії у значній мірі йдуть на долаття сил опору руху. Під час тягових розрахунків важливу роль має саме врахування сил опору і методи наближених розрахунків зі спрощеннями, які можуть використовуватися для засобів міського електротранспорту, але вони не забезпечують потрібної точності.

Режими руху накладають свої вимоги на конструкцію транспортних засобів та на будову тягової мережі. Тягові мережі переважно живляться струмом із напругою 25 кВ. Це дозволяє збільшити довжину секцій живлення й віддалі між тяговими підстанціями. Для вирішення питань енергозбереження доцільно будувати установки рекуперації на тягових підстанціях, розміщених поряд із залізничними вокзалами. Через те що залізничні поїзди накопичують велику кількість кінетичної енергії, доцільним є побудова станцій рекуперації з використанням надпровідникових накопичувачів електроенергії.

Тенденція розвитку електричного транспорту полягає у збільшенні швидкостей руху. Швидкісні поїзди будують на основі добре відомих конструкцій ТЗ із потужними двигунами, а також на основі використання повітряної та магнітної підвіски. Робота та тягові розрахунки руху таких поїздів мають свої особливості, пов'язані з питаннями, що вивчають такі дисципліни, як електродинаміка, динаміка суцільних середовищ та кріогенна техніка тощо. Це накладає нові вимоги на підготовку спеціалістів електричного транспорту, які повинні мати широкі знання із фізики та інших споріднених дисциплін.

З ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ТА РІВНЯННЯ ЛАГРАНЖА II РОДУ

3.1 Загальні положення

Перед розглядом основ електричної тяги та її удосконаленням потрібно визначитись із основними принциповими положеннями. Теоретичною основою наукової дисципліни «Теорія електричної тяги» (ТЕТ) є механіка Ньютона, модель ТЗ як матеріальної точки, рівняння руху, закони електротехніки та принципах роботи електричних машин. Ці наукові дисципліни, їх закони та рівняння, фізичні принципи, застосовуються в практиці експлуатації електричних ТЗ, під час їх розробки та виготовлення, при розрахунках економічних показників, розрахунках режимів руху, проектуванні та побудові залізних та автомобільних доріг а також тягових мереж. На основі теоретичних положень здійснюється підготовка спеціалістів електротранспорту, робітників залізних доріг, спеціалістів метрополітену. Вони закладені у навчальних посібниках та великій кількості технічної документації.

Спільним, що поєднує різні види електричного транспорту, є механіка руху та електрична тяга. Наукові основи електричної тяги закладені у низці підручників, наукових посібників, інструкцій, нормативних документів [18–29, 31, 38]. Ураховуючи сучасні тенденції розвитку електричного транспорту, особливості окремих його видів, необхідно визначитись з основними положеннями та теоретичними основами.

По-перше, ТЕТ ґрунтується на двох фундаментальних наукових дисциплінах: механіці та електротехніці, використовує деякі інші розділи науки, як то інформатика, системи керування. У цій роботі основна увага приділена розгляду механіки руху. Закони механіки описують характер руху транспортних засобів (ТЗ), а електротехніка забезпечує аналіз електричних машини та керування їхньою роботою.

По-друге, ТЕТ є прикладна технічна дисципліна, яка оснований та результатах вимірювання. Тому у ній важливе місце займають одиниці вимірювання, в яких подається теоретичний матеріал і виконуються практичні розрахунки. Одночасне використання в ТЕТ законів електротехніки та механіки вносить певні труднощі у побудову теоретичних основ цієї дисципліни, які особливо проявились на початку зародження цієї наукової дисципліни. Лише з розробкою міжнародної систем одиниць СІ, яка з 1961 р. стала обов'язковою для використання в усіх галузях науки й техніки, вдалось, певною мірою, узгодити теоретичні основи цієї дисципліни.

у викладі теоретичного матеріалу. Складність процесів, які описує теорія електричної тяги, одночасний розгляд питань механіки складної системи якою є

транспортний засіб, із врахуванням взаємодії великої кількості окремих вузлів ТЗ, процесів перетворення енергії в двигунах (механічних, парових, теплових, електричних, електродинамічних та навіть ядерних), врахування навколишнього середовища, в якому здійснюється рух ТЗ, та систем керування, включаючи інформаційні та інтелектуальні системи, зумовила введення цілої системи спрощень. У міру можливості потрібно утримуватись від спрощень під час розрахунків, оскільки сучасні вимоги, наприклад, при аналізі руху швидкісного транспорту або систем керування роботою механізмів ТЗ, суттєво зросли, а сучасні інформаційні технології та обчислювальна техніка дозволяють швидко та з більшою точністю виконувати розрахунки.

ТЕТ зароджувалась в кінці XIX – на початку XX століття на стику механіки руху автомобілів та залізничних поїздів і електротехніки. Тоді деякі поняття науки ще не отримали чіткого визначення, яке мають тепер. Історично склалось, що фізичні величини, які описують рух ТЗ та одиниці їхнього вимірювання, були визначені відповідно до тогочасних знань. Хоча наукові положення механіки були розроблені в роботах І. Ньютона, Ж. Л. Лагранжа, Г. Галілея, Ж. Л. Д'аламбера, Л. Ейлера, П. С. Лапласа, Х. Лоренца, О. Гамільтона та інших вчених ще у другій половині XVIII століттях у країнах Західної Європи, вони не одразу стали здобутком усього людства. У побуті, торгівлі, у промисловому виробництві, міжнародному спілкуванні використовувались застарілі, з погляду механіки помилкові, поняття ваги як кількості речовини. Технічний прогрес другої половини XVIII та XIX століть особливо розвивався в англomовних країнах: Великобританії, США, де замість маси використовували поняття ваги як міри кількості речовини.

Застарілі визначення основних понять механіки збереглися до нашого часу й подекуди використовуються у теорії електричної тяги. Вони та результати розрахунків на їхній основі увійшли в методики, інструкції, нормативні документи. Вони переходять з одного підручника в інший, з однієї публікації в іншу. Це вносить суттєві труднощі у розвиток теорії електричної тяги, у практику розрахунків. Під час навчального процесу доводиться використовувати поняття, які недопустимі з наукового погляду, наприклад, що маса, помножена на прискорення земного тяжіння, є «вагою», що величина сили, поділена на силу, тобто на вагу, є «питомою силою», що коефіцієнти тертя у законі Гука – це розмірна величина та ін. Виникають труднощі під час розрахунків, особливо у випадках, коли потрібно одержати нові формули розрахунків, узагальнити розрахунки й включити у них, крім механічних величин, електричні, магнітні та теплові. Під час розрахунків доводиться одночасно використовувати величини таких несумісних систем вимірювання,

як система СІ та МКГСС. Використовувати поняття «ваги» там, де повинна бути маса тіла.

Одним із основних понять теорії електричної тяги є сили, які зумовлюють рух ТЗ. Рух матеріального тіла відбувається тільки під дією зовнішніх сил. Сили тяги й сили опору руху, як зовнішні сили, виникають у результаті взаємодії колісних пар ТЗ зі шляхом. Основним параметром, що визначає сили тяги та опору, є вага ТЗ. Проте вага не постійна величина. Вона залежить від маси та характеристики руху ТЗ, а саме його прискорення. Навіть нерухоме відносно поверхні Землі тіло рухається із прискоренням, зумовленим добовим обертанням Землі. На екваторі вага менша, ніж на полюсі. Це викликане двома чинниками: формою земної поверхні, яка наближено відповідає еліпсоїду обертання приплюснутому з полюсів, та добовому обертанню Землі навколо своєї осі. Приплюснута форма Землі, згідно з законом всесвітнього тяжіння, зумовлює більшу величину сили взаємодії тіла на полюсі. Обертальний рух, якому відповідає відцентрове прискорення й відповідна сила, зумовлює меншу вагу на екваторі. Виконані прості розрахунки показують, що через сплюснутість Землі значення прискорення вільного падіння на екваторі менше за його значення на полюсі на 0,18 % і, відповідно, менша вага, а через добове обертання вага на екваторі ще менша на 0,34 %, ніж на полюсі.

Згідно з визначенням одиниць вимірювання вага – це сила, з якою тіло діє на опору чи підвіс [4]. Вага – векторна величина, тоді як маса скалярна. Виникає вага, відповідно до принципу еквівалентності гравітаційних та інертних сил, наприклад, як у розглянуто у попередньому абзаці випадку, це сума дії сили гравітації та в інертної сили обертового руху Землі. Принцип еквівалентності – основний принцип загальної теорії відносності. Згідно з ним спостерігач, що зв'язаний з тілом, ніяк не може відрізнити дію гравітаційного поля від сил інерції. Сили інерції виникають у системі відліку, яка рухається з прискоренням [58, 59]. Отже, складники ваги ТЗ такі: сила гравітації та інерційні сили. Інерційні сили – це відцентрова сила під час руху по кривих ділянках, сила, як діє на ТЗ при зміні профілю шляху, сила інерції викликана прискоренням вільного руху на пагорбах та долинах та інші складники сили інерція, зокрема сила Коріоліса, гіроскопічні сили тощо.

Із розглянутого видно, що вага ТЗ є сила, яка змінюється під час руху ТЗ по маршруту. У тягових розрахунках зміну ваги ТЗ потрібно враховувати й не можна змішувати вагу ТЗ з масою, чи використовувати замість ваги масу, помножену на певний коефіцієнт, наприклад на 9,81.

Основи механіки та закони Ньютона визначають масу як основну величину, що характеризує кількість речовини та входить у рівняння руху.

Отже, у другому законі Ньютона, маса є основною величиною, що визначає рух тіла. Маса тіла – це особлива фізична категорія, навіть І. Ньютон у перших своїх працях визначав масу як особливу величину, інертну, що визначає характер руху тіла. З відкриттям закону всесвітнього тяжіння маса визначається як фундаментальна фізична величина, що визначає кількість матерії. Маса входить в основні закони світобудови:

– другий закон Ньютона:

$$a = \frac{F}{m} ; \quad (3.1)$$

– закон всесвітнього тяжіння:

$$F = \gamma \frac{m_1 + m_2}{r^2} ; \quad (3.2)$$

– рівняння Ейнштейна:

$$E = mc^2 ; \quad (3.3)$$

де F – діюча сила; c – швидкість світла у вакуумі; E – енергія; m_1 , m_2 – маси взаємодіючих тіл; r – віддаль між матеріальними тілами.

У другому законі Ньютона й законі всесвітнього тяжіння діючі сили є причиною руху, а маса – міра кількості речовини. F сила може бути різного походження, але ні в якому разі її не можна змішувати з масою тіла.

У побуті, технічних науках було прийнято мірою кількості речовини вважати вагу тіла. Як видно з наведених рівнянь, із розвитком науки питання неоднозначності визначення кількості речовини було повністю знято. Згідно з сучасним визначенням вага – це сила, з якою тіло діє на опору, або точку підвісу. Вага одного й того самого тіла не є постійною. Вона змінюється при переміщенні з однієї точки поверхні Землі в іншу, залежить від прискорення. Характеристикою кількості речовини є маса, скалярна величина постійна для конкретного тіла. Маса – одна з фундаментальна величин світобудови. У механіці розрізняють два поняття маси: інертна та гравітаційна. Перша входить у закони руху, друга, гравітаційна маса, визначається на основі закону всесвітнього тяжіння [60, 61]. Фундаментальними дослідженнями встановлено співпадіння цих мас. Згідно з відомою формулою А. Ейнштейна (3.3) встановлено зв'язок маси із енергією.

Вага G тіла, ТЗ дорівнює добутку маси m на геометричну суму векторів прискорення земного тяжіння g та прискорення тіла a у системі відліку

відносно поверхні Землі (у тексті векторні просторові величини позначено напівжирним шрифтом, у формулах діакритичним знаком).

$$\vec{G} = m(\vec{g} + \vec{a}). \quad (3.4)$$

Складниками ваги є сила земного тяжіння та відцентрова, тобто інерційна, сили. Виходячи з формули (3.4) при русі транспортного засобу по кривій вагу потрібно представляти так, як показано на рисунку 3.1, а. Отже, вага $\vec{G}$ – це сила тиску ТЗ на опору, яка дорівнює добутку маси на сумарне прискорення земного тяжіння $\vec{G}_g$ та відцентрове прискорення $\vec{G}_a$. У загальному випадку вага направлена під кутом до горизонту.

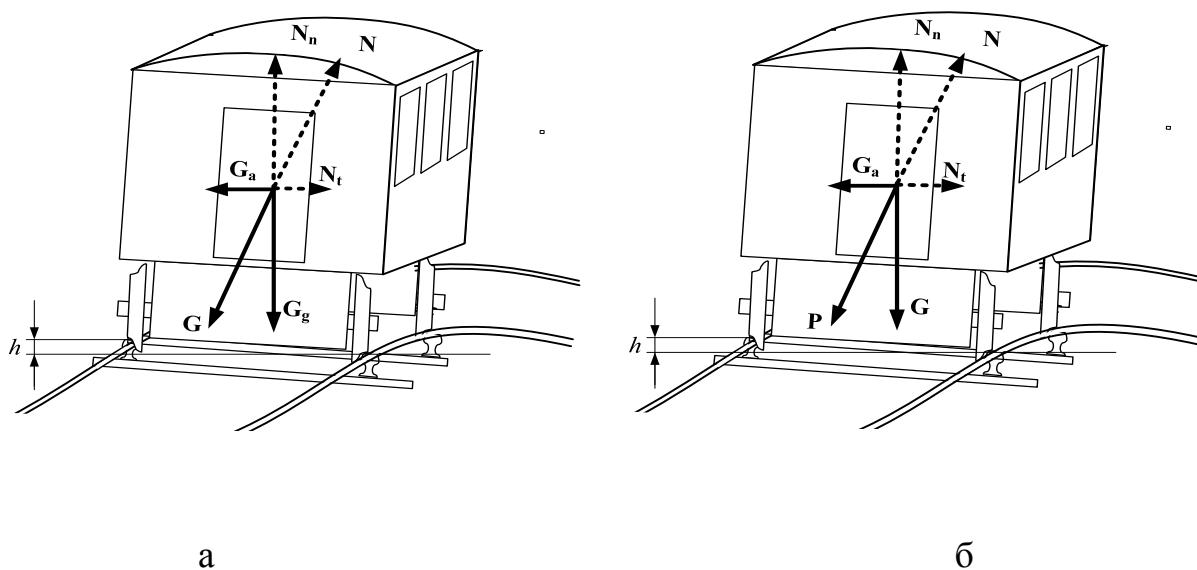


Рисунок 3.1 – Сила ваги та її складові: а – позначення, яких потрібно дотримуватись; б – застарілі, неправильні позначення; $\vec{G}$ – вага, $\vec{G}_a$ – відцентрова; інерційна, сила; $\vec{G}_g$ – сила гравітації; $\vec{P}$ – сила тиску на опору; $\vec{N}$ – сила реакції; $\vec{N}_n$, $\vec{N}_t$ – нормальна та тангенціальна складові сили реакції

У підручниках з електричної тяги, при розгляді криволінійного руху ТЗ, «вагу» $\vec{G}$ неправильно представляють як добуток маси на прискорення земного тяжіння і направлену вертикально вниз (рис. 3.1, б). Суму відцентрової сили $\vec{G}_a$ й «ваги» приймають як силу тиску $\vec{P}$ на опору, тобто на дорогу чи залізничну колію. Насправді саме тиск на опору є вагою ТЗ (не в лапках) $\vec{P} = \vec{G}$. Це потрібно враховувати й відображати на розрахункових схемах. На рисунку 3.1, а складовими ваги $\vec{G}$ є: $\vec{G}_g$ – сила земного тяжіння і $\vec{G}_a$ – відцентрова сила. Відцентровий складник $\vec{G}_a$ направлений у бік, протилежний напрямку до центра дуги шляху. Для залізничних колій він направлений по

горизонталі, оскільки згідно з будівельними нормами, не допускається суміщати криві ділянки колій з ухилами. Ці сили викликає бокове навантаження на зовнішню рейку, а для ТЗ, що рухаються по шосейній дорозі, бокове зміщення верхніх шарів дорожнього покриття.

Щоб зменшити реакцію на рейку, залізничні колії будують у такий спосіб, що на поворотах зовнішня рейка піднята вище відносно внутрішньої (перевищення зовнішньої рейки $h(s)$). Така будова залізничної колії компенсує бокове навантаження на рейки. Повна компенсація бокових зусиль може бути тільки за певній швидкості, для конкретного значення радіуса кривизни дороги $R(s)$ та перевищення рейки $h(s)$.

Наступне положення, з яким потрібно визначитись, це одиниці вимірювань. Вони безпосередньо стосуються розглянутих вище питань. З ними пов'язані розбіжності, які виникають під час розгляду чинної теорії електричної тяги. У системах одиниць вимірювання знайшли відображення наведені вище визначення фізичних величин маси й ваги.

Одиниці вимірювання формувалися у процесі історичного розвитку на потреби господарської діяльності людини: оподаткування, будівництва, виготовлення знарядь праці, зброї тощо. Засобом вимірювання спочатку слугували частини тіла людини (лікоть, палець – дюйм, ступня – фут, великі відстані вимірювалися днями шляху – пішими й кінними) [62, 63].

В Англії, США, англomовних, промислово розвинених країнах використовувалась технічна система фут – фунт – сила – секунда (ФФСС). Основні одиниці цієї системи: довжина – фут (0,3048 м); сила – фунт – сила (вага фунта); час – секунда. Перші офіційні стандарти одиниць вимірювань в Англії з'явилися у XV столітті. Єдина британська система одиниць, міри Британської імперії, була введена в 1824 році. У 1963 році міри були синхронізовані між США й Великою Британією та перевизначені через стандартний паризький метр. Поступово міри англійської системи витісняються метричною системою мір.

На основі Британської системи, в якій основною одиницею є вага, у Радянському Союзі, у країнах, де використовувалась метрична система мір, була прийнята система одиниць МКГСС. Основні одиниці вимірювання у ній: метр, секунду й кілограм ваги (кГ). Маса визначається як похідна одиниця, а саме як відношення ваги до прискорення земного тяжіння $g = 9,806 \text{ м/с}^2$. Одиниця маси мала назву «інерта». На практиці використовували назву кілограм маси – кг.

Національні збори Франції 31 березня 1791 р. прийняли систему мір, яку підготувала комісія, до складу якої входили П.-С. Лаплас, Ж.-Л. Лагранж та

інші вчені. В основу була взята одиниця маси. У 1832 році К. Ф. Гаус побудував систему одиниць, у якій за основу були прийняті три, незалежні одна від одної одиниці – довжини, маси та часу, всі інші одиниці визначалися через ці три. Він сформулював загальний принцип побудови логічно несуперечливої системи одиниць, що має внутрішню єдність [64]. Таку систему одиниць Гаус назвав абсолютною системою. За основні одиниці він прийняв міліметр, міліграм та секунду. У подальшому вона перейшла в систему СГС (сантиметр – грам – секунда). Ця система була розроблена в 1861–1870 роках і встановлена в 1881 році першим Міжнародним конгресом електриків. Доповнена електричними величинами, вона носила назву СГСЕ та СГСМ. СГСЕ – електростатична система, у якій основною електричною величиною є електричний заряд (у Кулонах); СГСМ – система, де за основну електричну одиницю вибрано струм (в Амперах).

З розвитком науки змінилися саме поняття кількості речовини, за яку в одних країнах використовували вагу тіла, а в інших – масу. У працях І. Ньютона, Ж. Д'аламбера, Г. Лоренца, Л. Ейлера, Ж.-Л. Лагранжа, мірою кількості речовини виступає маса. Проте, у країнах інтенсивного технічного прогресу: Англії, США, Росії за кількістю речовини вважали вагу як простішу та зрозумілу величину, а масу приймали як похідну величину від ваги. Відповідно до основних понять науки розвивалися системи одиниць вимірювання. У країнах переважного технічного розвитку використовували систему МКГСС, де основною величиною вважалась сила в кілограмах (англ. вага у фунтах та ін.). Система одиниць називалась технічною, а маса у ній вважалась похідною величиною та визначалась через вагу та прискорення земного тяжіння. Це відносилось до прикладних дисциплін, а у наукових фундаментальних дослідженнях як основну фізичну величину використовували поняття маси.

У 1913 р. V Генеральна конференція з мір і ваг (далі – ГКМВ) поставила конкретне завдання створити міжнародну уніфіковану систему одиниць. Вирішення цього завдання виявилось надзвичайно трудомістким, потребувало багато зусиль і часу. Лише 1948 р. Міжнародна спілка чистої та прикладної фізики подала до розгляду IX ГКМВ пропозицію щодо її прийняття [65]. Протягом 11–20 жовтня 1960 р. у Парижі XI Генеральна Конференція з мір і ваг прийняла резолюцію про остаточне затвердження щодо встановлення єдиної системи одиниць з наданням їй назви «Міжнародна система одиниць» (скорочене позначення українською мовою «СІ», міжнародне – «SI» – від початкових літер слів System International, або «Система міжнародна» [66].

В Україні відповідно стандарту [67–69] із 1961 р. використовується Міжнародна систем одиниць СІ. До введення в практику вимірювань системи СІ на електричному транспорті в практиці й теорії застосовували систему одиниць МКГСС з основними одиницями кілограм-сили, секунда, метр, ампер, та МТС метр, тонна сили, секунда. Як відмічається у монографії [20], уперше у практику тягових розрахунків одиниці СІ частково були введені при розробці Правил тягових розрахунків, затверджених Міністерством шляхів сполучення СРСР у 1980 р. [71]. У цьому документі вперше замість поняття вага (поїзда, вагона, складу та ін.) використовувалось поняття маси. Автор монографії [20] відмічає, що ця заміна в практику розрахунків вносить позитивні та негативні моменти. Як негативні автор відмічає ускладнення розрахункових виразів і алгоритмів та труднощі у використанні розробленої раніше технічної документації та довідникової літератури. (З твердженням, що це негативні моменти, погодитись неможливо. Можливо погодитись тільки з тим, що повний перехід до СІ потребував наукового опрацювання теорії електричної тяги та великого обсягу робіт, пов'язаних із технічною переробкою документації й довідникової літератури).

Для усунення відмічених труднощів, за узгодженням із Держстандартом СРСР і Міністерства шляхів сполучення, був отриманий дозвіл тимчасово, замість одиниці сили в Ньютонах використовувати кілограм-сили. Відповідно до цього дозволу зараз у сфері електротранспорту, у всій науковій і технічній літературі, для визначення кількості речовини одночасно використовується два поняття: маса поїзда та вага поїзда, відповідно до двох несумісних систем одиниць вимірювання – міжнародної системи СІ та технічної системи МКГСС. Вага поїзда – це сила, яка діє на опору. Ця сила не є постійною, вона змінюється під час руху транспортного засобу. Це векторна величина, яка має напрямок у просторі, тоді як маса – це міра кількості речовини, скалярна величина. Відповідно до вказаної постанови розроблена технічна і наукова документація, змінені робочі програми навчальних закладів, зокрема і університетів, практично у всіх країнах колишнього Радянського союзу та деяких Європейських країн. Бюрократичне рішення, втручання Міністерства шляхів сполучення у сферу, яка знаходиться поза сферою його компетенції, породила низку проблем як у навчальному процесі, так і у сфері експлуатації транспорту. Постанова мала тимчасовий характер, дозволяла певний час використовувати застарілі, фактично неправильні поняття. Проте пройшло більше 40 років, а ці неправильні поняття не тільки не замінюють правильними, а все більше входять у практику експлуатації електротранспорту та в навчальний процес.

Згідно із відомими методами математичною модель руху засобів електротранспорту є модель, у якій ТЗ є матеріальною точкою із зосередженою масою. Згідно з цією моделлю розраховують усі параметри руху: швидкість, прискорення, пройдений шлях, дію двигуна як джерела електричної тяги, сили опору руху, гальмівні сили та ін. Така модель найпростіша й дозволяє розрахувати корисне поступальне переміщення ТЗ [20]. Проте вона не дозволяє врахувати всі особливості руху ТЗ, не відповідає сучасним вимогам точності розрахунків. Наприклад, сучасні залізничні поїзди мають 50 і більше вагонів, а їхня довжина більша за 1 км. Опис руху такого поїзда як матеріальної точки приводить до суттєвих помилок, хоча б через те, що одна частина поїзда може рухатись на спуск, інша на підйом. За такої моделі неможливо розрахувати сили, які діють у щепних пристроях вагонів, сили взаємодії колісних пар із рельсовим шляхом і деякі інші параметри. Така модель мало придатна для розрахунку динаміки швидкісних поїздів, які рухаються зі швидкостями 200 км/год і більше, інших засобів електричного транспорту, які використовуються в наш час.

Рівняння руху ТЗ відповідно до моделі ТЗ як матеріального тіла [18–29] має вигляд (1.4). Це рівняння вважається основним рівнянням електричної тяги [20]. У ньому використовують «питомі» одиниці тяги та сил опору. Термін «питомі» сили взято у лапки, враховуючи їхнє визначення (1.3):

$$f_i = \frac{F_i}{m \cdot g} = \frac{F_i[H]}{9.81 \cdot m[T]} . \quad (3.5)$$

Аналогічно визначаються «питомі» величини сил опору w_k , та гальмівних сил b_k . Згідно з визначенням (3.5) «питомі» одиниці f_k , w_k , та b_k у (1.3) є відношеннями двох сил: у чисельнику сили тяги, опору та гальмівні, у знаменнику маса, помножена на прискорення земного тяжіння g , тобто сила земного тяжіння, яка вважається «вагою». Отже, сама величина «питомих» сил f_k , w_k , та b_k – це відношення двох сил: реальної сили поділеної на розрахункову силу «ваги». Це відношення двох різних сил не можна вважати силою, до того ж «питомою» силою. Неправильне визначення «питомих» сил формулою (1.3) було запропоноване постановою Міністерства шляхів сполучень СРСР в 1980 р., під час часткового переходу до одиниць системи СІ [70]. До постанови «питома» вага визначалась у системі МКГСС такою формулою:

$$f_i = \frac{F_i[\text{кГ}]}{m[\text{кГ}]} . \quad (3.6)$$

Тут усе коректно, питома сила визначена як відношення сили до маси ТЗ. Незручно тільки, що назви одиниць вимірювання звучать однаково, але кожен спеціаліст розуміє, що в чисельнику кГ – величина сили, а в знаменнику кг – маса, тобто є частка від ділення фізичних величин.

У формулі (3.5) у знаменнику з'явилось прискорення земного тяжіння. Його там не повинно бути. Формула (3.5) суттєво інша, ніж (3.6), на основі якої побудовані тягові розрахунки. З використанням (3.5) виникають такі проблеми: узгодження розмірностей фізичних величин, різної розмінності коефіцієнтів у рівнянні руху, поява додаткових числових коефіцієнтів. Це призводить до втрати розуміння фізичних процесів, помилок під час виконання тягових розрахунків.

Якщо поява формули (3.5) незрозуміла, то зрозуміла мета, для якої виконали підміну формули (3.6) на (3.5). Справа у тому, що числові значення, розраховані згідно з правильною формулою (3.6) в одиницях системи МКГСС, відрізняються від значень, розрахованих згідно з цією саме формулою в одиницях системи СІ. Тому під час переходу до СІ потрібно було зробити перерахунки всієї технічної і навчальної документації: у нормативних документах, методичних посібниках, підручниках тощо. Суто технічна заміна формул (3.6) на (3.5) усуває проблеми з переробкою документації. Виявилось, що це простіше, ніж змінювати числові значення у великому об'ємі документів, в підручниках тощо. Результат – під час переходу до системи СІ, через намаганнями зберегти числа, виконана підміна понять, а саме понять маси й ваги. Цифрі віддана перевага над фундаментальними поняттями науки. У результаті формально ніби виконано перехід до системи СІ, а фактично він не виконаний. Збережено використання системи МКГСС, та ще з одночасним використанням СІ.

«Вдала», на перший погляд, заміна питомих одиниць відношенням до «ваги» ТЗ шляхом введенням коефіцієнта 9,81 виконана заради збереження звичних для працівників електричного транспорту числових значень, має низку суттєвих недоліків. Основний – це втрата фізичної чіткості формулювання основних наукових понять, основного рівняння чинної ТЕТ – рівняння руху ТЗ [71]. Притримуючись законів механіки, у рівняння руху повинні входити: маса ТЗ, пройдений шлях, швидкість, прискорення та діючі сили. Вага ТЗ визначає діючі сили, але замість маси вона входить у рівняння не може. Наявність в основному рівнянні руху скалярної величини «ваги» з фізичної точки зору не виправдане, а використання відношення сили тяги в Ньютонах (Н) до «ваги» в кН призводить рівняння до безрозмірних одиниць, що у технічних дисциплінах не прийнято. З'являються специфічні одиниці вимірювання, такі як

прискорення в км/(год·с), питома сила в кГс/т та ін., які стандартом недопустимі. При алгебраїчних перетвореннях рівнянь виникає потреба вводити ряд числових коефіцієнтів. Не виконується принцип розмірності, згідно з яким перевіряється правильність написання рівнянь. Усе це призводить до помилок, які з'являються навіть у навчальних посібниках, наприклад в основному рівнянні руху в посібнику [21].

Підміна основних понять призвела до логічних тупиків під час вирішення низки питань теорії. Формула (3.5) – це відношення двох сил, до того ж направлених у різні боки. Питома сила з погляду механіки – це сила, яка діє на одиницю маси, це розмірна, векторна величина, напрямком якої визначається напрямком сили, її розмірність H/kg .

В основному рівнянні електричної тяги використані безрозмірні величини сили, які у рівняння механіки не повинні входити. У цьому рівнянні прискорення земного тяжіння виражається в m/s^2 , а прискорення транспортного засобу в км/(год с), тобто в одній формулі одна й та сама фізична величина подається двічі з різною розмірністю.

Використання безрозмірної «питомої» сили тяги призводить до інших протиріч, з'являються розмірні коефіцієнти тертя, коефіцієнти аеродинамічного опору та ін. У розрахункові формули доводиться вводити велику кількість числових коефіцієнтів. У рівнянні руху доводиться використовувати коефіцієнт узгодження одиниць вимірювання [18–21].

У наукових дослідженнях, у галузях, які недостатньо вивчені, використовують запис рівнянь із безрозмірними одиницями, а розмірність визначають числові коефіцієнти. Для коректного використання таких методів розроблена теорія розмірностей [72]. Відповідно до неї розмірні фізичні величини, що входять в опис фізичного процесу, комбінуються у безрозмірні комплекси, які можна розглядати як нові змінні. Для коректного використання таких методів потрібно описати всі величини та їхні розмірності. Для визначення нових розмірностей, їхньої кількості, співвідношень між ними використовується так звана ПІ-теорема. Складають матрицю розмірностей і здійснюють операції з нею. Такий підхід використовується у деяких наукових напрямках досліджень. Доцільність його використання в чинній теорії електричної тяги викликає сумнів. З наукового погляду всі процеси руху ТЗ зрозумілі й можуть бути виражені з використанням системи СІ. Тому немає потреби використовувати нестандартні, безрозмірні величини. У разі використання безрозмірних величин потрібно побудувати матрицю розмірності, обмежити кількість величин, які в неї входять, розрахувати співвідношення між ними. У навчальні посібники [19–21] входять таблиці

перехідних коефіцієнтів, але вони не повні, достатньо не опрацьовані. Крім того, відповідно положень теорії розмірності у всіх формулах повинні бути однакові розмірності, а в рівнянні електричної тяги, наприклад (1.4), в одній формулі поряд із визначенням часу в годинах його визначають у секундах, силу визначають як відношення двох сил різної розмірності, що згідно з теорією розмірностей недопустимо.

Ще однією причиною відмовитися від використання в чинній теорії електричної тяги прийнятих нестандартних одиниць вимірювання, є те, що такий підхід є гальмом для подальшого розвитку теорії. Процеси розвитку теорії вимагають, крім розрахунків механічних величин, використання таких електричних величин, як: струм, напруга, індукція магнітного, магнітного поля, температури, кількість теплоти та ін. Якщо введено безрозмірні величини, то, дотримуючись теорії розмірностей, необхідно й ці величини включити в матрицю розмірностей, та встановити їхні відношення до інших величин, розрахувати перехідні коефіцієнти й тільки після цього використовувати.

У системі СІ всі фізичні величини узгоджені, електричні й теплові величини узгоджені з механічними та забезпечене їхнє одночасне використання. Водночас одиниці, наведені в таблицях тягових розрахунків [19–21], не узгоджені з електричними та тепловими величинами, не передбачають їхнього використання.

Як приклад виконання розглянутих завдань є наукова дисципліна «Теорія електроприводу» [73]. Вона фактично вирішує ці самі завдання, що і «Теорія електричної тяги». Ці наукові дисципліни в більшості положень збігаються, хоча теорія тяги відрізняється тим, що потрібно враховувати низку чинників, які в теорії електроприводу не входять.

У теорії електроприводу всі розрахунки приводять зазвичай до моменту на валу двигуна та його швидкості, а в теорії електричної тяги основним параметром виступає шлях та його характеристики. Цими характеристиками є ухили та повороти шляху, наявність дорожніх знаків, спеціальних частин залізничного шляху та тягової мережі тощо. У ТЕТ час недоцільно приймати як незалежний параметр, оскільки основні обмеження на параметри руху накладають характеристики шляху. Отже, ТЕТ має свій предмет дослідження, проте використання методів теорії електроприводу є корисним.

Підсумовуючи розгляд принципів, яких варто дотримуватись під час удосконалення ТЕТ, потрібно виконати завдання:

- приведення основних рівнянь електричної тяги до міжнародної системи одиниць СІ і позбутися застарілих систем вимірювання фізичних величин;

- позбавити математичну модель помилкового представлення ваги як міри кількості речовини;
- включити у математичну модель електричні процеси перетворення у двигуні електричної енергії в механічну;
- привести рівняння руху до зручної форми для побудови комп'ютерної моделі, яка дозволяла б оперативне виконання розрахунки динаміки ТЗ з підвищеною точністю;
- забезпечити можливість використання комп'ютерної моделі для виконання практичних завдань експлуатації ТЗ та енергозбереження.

3.2 Аналіз математичної моделі руху транспортних засобів

У попередньому підрозділі вказано, що концептуальною моделлю руху засобів електротранспорту є модель, у якій ТЗ є матеріальною точкою із зосередженою масою. Схема прийнятої моделі подана на рисунку 3.2.

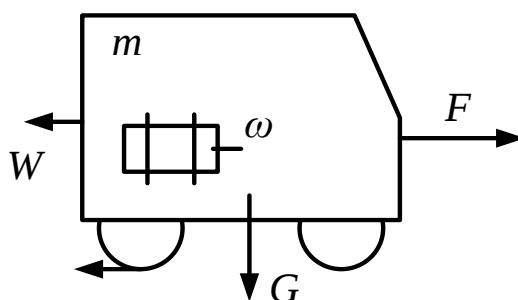


Рисунок 3.2 – Концептуальна модель ТЗ як матеріальної точки

У моделі (рис. 3.2) ТЗ має зосереджену масу m , на яку діють рушійні сили F . Двигуна, ротор якого має кутову швидкість ω , через трансмісію приводить в обертальний рух колеса. Колеса силою ваги ТЗ G притиснуті до шляху й при їхньому обертанні виникає сили тяга F , яка зумовлює рух ТЗ. Крім сили тяги на ТЗ діють сили опору W , а під час гальмування гальмівні сили B .

Математичний апарат, який використовується для аналізу руху ТЗ, відповідно такої концептуальної моделі – це рівняння Ньютона в диференційній формі, з врахуванням теореми Кеніга. Основне рівняння руху подається у двох формах (1.4) та (1.5). Перша форма відповідає рівнянню (1.4), а друга (1.5).

Форма (1.4) – це та сама формула, що і (1.5), тільки у ній формально виконано перехід від незалежної змінної час t до нової змінної шляху s відповідно до формули:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{ds} \frac{ds}{dt} = v \frac{dv}{ds} . \quad (3.7)$$

Такий перехід вимагає представлення усіх величин, які входять у рівняння руху, як функцій шляху. Швидкість можна представити як функцію шляху, адже в кожній точці шляху ТЗ має свою швидкість, залежність швидкості від точки шляху, під час руху ТЗ в певному напрямку однозначна. Величини сили тяги та сили опору залежать від швидкості руху, а швидкість є однозначною функцією шляху. Тому всі сили, що входять у рівняння руху, можуть бути представлені як функції шляху. У такий спосіб здійснюється перехід від змінної час t у рівняння руху до змінної s шляху. Після переходу можна незалежною змінною вважати шлях s й інтегрувати рівняння вздовж шляху. У попередній частині роботи було відмічено, що для аналізу руху ТЗ більш суттєву роль відіграє шлях і його параметри, а не час.

У рівнянні руху (1.1) сила тяжіння електродвигунів F_k приведена до ободу ведучих коліс. Під час виконання тягових розрахунків її задають у вигляді таблиць чи графіків як механічну та електромеханічну характеристики двигуна. Механічна характеристика – це залежність моменту на валу двигуна від величини струму, а електромеханічна – залежність швидкості обертання якоря величини струму за незмінної напруги. Під час виконання тягових розрахунків ці характеристики зазвичай приводять до залежності сили на ободі колеса до швидкості руху.

$$F_k = F_k(v) . \quad (3.8)$$

Індекс k у (3.8) відноситься до режиму роботи двигуна ТЗ. Аналогічно представляють сили опору руху та гальмівні сили: $W_k(v)$, $B_k(v)$.

Для переходу до рівняння (1.4), у якому сила тяги представлена у питомих величинах, використовують «вагу» ТЗ

$$f_k = \frac{F_k}{G'} . \quad (3.9)$$

Для практичного використання під час виконання тягових розрахунків сили основного опору та гальмівні сили приведені до питомих величин:

$$W_k = \frac{W_k}{G'}, \quad B_k = \frac{B_k}{G'} , \quad (3.10)$$

де G' – «вага» ТЗ дорівнює:

$$G' = 9,81m , \quad (3.11)$$

де $9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення земного тяжіння. Якщо в (3.11) маса виражена тонах (т), то «вага» G' подається кН.

Зауваження. Термін «вага» – G' , тут узято в лапки для позначення величини, що деколи називають «вагою», але це не є вагою згідно з визначенням, а сила земного притягання, що діє на ТЗ. Вага ТЗ визначається згідно з формулою (3.4). Тільки в особливому випадку, у стані спокою чи прямолінійного рівномірного руху, величина, розрахована згідно з (1.4), співпадає вагою ТЗ.

Значення числових коефіцієнтів ξ , ξ' залежить від одиниць вимірювання всіх величин, що входять у рівняння. Фактично розмірність коефіцієнтів – це розмірність прискорення. Проте прийнято їх вважати безрозмірними, а розмірними вважають величини питомих сил f_k , w_k , b_k , кожна з яких може бути подана в Н/кН. При такому погляді питання розмірності приводить до тупика. Невже розмірність питомих сил, тобто в нашому випадку відношення Н/кН, це розмірність прискорення?

Для різних комбінацій значень розмірності параметрів рівняння (1.4): шляху – в м чи км, часу – в годинах чи в секундах, швидкості в км/год чи м/с, значення цих коефіцієнтів різні і вони приводяться у розрахункових таблицях у джерелах (див. табл. 1.2, с. 41 [20]) та аналогічні в [18–21, 23, 26] приведено значення коефіцієнтів ξ , ξ' . Усі розрахунки виконуються так, що спочатку вибираються одиниці вимірювання, у рівняння підставляються відповідні коефіцієнти й після цього виконуються розрахунки. Так виконуються розрахунки під час розв'язання практичних завдань тяги поїздів, розрахунки руху залізничних поїздів, трамваїв, тролейбусів, поїздів метрополітену тощо. Тут закладене логічне протиріччя, яке вносить помилки у результати розрахунків.

З розглянутого логічного кута є два шляхи виходу: перший – у всіх розрахунках вважати значення абстрактними безрозмірними числами. Перед розрахунками всі фізичні величини переводити в безрозмірні величини, і вводити коефіцієнти, які після виконаних розрахунків із конкретними числами дозволяють одержати результати конкретної розмірності. Водночас завжди потрібно дотримуватися заданих наперед чисел і не допускати будь-яких перетворень рівнянь. За таких розрахунків не обов'язково, щоб рівняння відповідали певним фізичним законам, важливо тільки, щоб результат розрахунків давав потрібний результат. Із цього погляду рівняння другого закону Ньютона, коли маса ТЗ виражена в кілограмах (кг) і тонах (т), – це різні рівняння, оскільки в них входять різні коефіцієнти. Зважаючи на таку точку зору, рівняння чинної теорії електричної тяги вважаються різними рівняннями,

коли в них змінена розмірність хоча б однієї фізичної величини. Якщо дотримуватись такого підходу, за потреби виконання складніших розрахунків, наприклад із врахуванням струму та напруги двигуна, його потужності, моменту сили, моменту інерції, кількості теплоти тощо, то виникає проблема сумісності одиниць вимірювання, розрахунку значень великої кількості перехідних коефіцієнтів. Зазвичай такі рівняння руху не придатні для узагальнення. Кожна з одержаних формул придатна тільки для одноразового розрахунку.

Інший шлях – це загально прийнятий у переважній більшості наукових дисциплін метод розрахунків із використанням розмірних величин, які однозначно визначені прийнятою системою одиниць і сумісні між собою. Основою є міжнародна система СІ. У ній усі одиниці вимірювання взаємоузгоджені між собою та немає потреби ведення додаткових коефіцієнтів. Якщо використовувати одиниці міжнародної системи, то спрощуються розрахунки, забезпечується можливість одночасного виконання механічних, електричних та теплових процесів.

Перший напрям, розглянутий у попередньому підрозділі, призводить до таблиці коефіцієнтів з одиницями вимірювання, які в інших наукових дисциплінах не підтримуються. Правомірність використання при тягових розрахунках несистемних одиниць можна пояснити тільки тим, що вони дозволяють отримати результати, що задовольняють практику та є звичними для спеціалістів. Наукова дисципліна «Теорія електричної тяги» тут виступає як прикладна наукова дисципліна, у якій оправдано використання понять і фізичних величин, що не підтримуються іншими науками.

Якщо розглядати теорію електричної тяги як більш загальний науковий напрям, який об'єднує досягнення одержані за півтора століття експлуатації електричного транспорту, їхнього конструювання та виробництва, то потрібно відмовитись від застарілого підходу та оперувати загально прийнятими фізичними уявленнями й узаконеною системою одиниць вимірювання, а саме міжнародною системою одиниць СІ.

3.3 Приведення тягових розрахунків до системи СІ

Аналіз і виконані подальші дослідження показують, що перехід до системи СІ в чинній теорії електричної тяги здійснюється просто. Для цього достатньо відмовитись від приведення рівнянь руху до відносних величин. Спрощення розрахунків, які надає використання питомих одиниць у сучасних умовах, за наявності сучасної обчислювальної техніки недоцільне. Щоб задовольнити сучасні вимоги експлуатації ТЗ, потрібні індивідуальні

розрахунки. Кожен ТЗ має свої індивідуальні характеристики, певне завантаження та виконує конкретне завдання. Рух здійснюється вздовж конкретно визначеного шляху. Тому для планування руху та його здійснення повинен бути виконаний індивідуальний розрахунок. Крім того, сучасні ТЗ оснащують системами автоматичного ведення, робота яких передбачає прогнозування можливого руху й базується на тягових розрахунках. Практика експлуатації ТЗ вимагає наявності розробленої теорії та алгоритмів розрахунків та більшої точності їхніх результатів.

Відмовившись від використання питомих одиниць, відпадає необхідність використовувати поняття «ваги» ТЗ. У подальших розрахунках усі величини подаються в розмірних величинах. Розрахунки виконуються аналогічно, як і в будь-якій іншій науковій дисципліні. Це забезпечує використання в рівняннях руху не тільки механічних величин, але електричних і магнітних, теплових. ТЕТ наближається до більш загальної дисципліни, а саме теоретичної механіки, теорії електроприводу, електротехніки та електродинаміки.

Перехід до системи СІ виконаємо в межах прийнятої вище концептуальної моделі руху транспортного засобу, у якій рух транспортного засобу представлено як рух матеріальної точки з одним ступенем свободи. Це найпростіша модель, яка лежить в основі теорії електричної тяги. Крім неї можливі інші моделі, які будуть розглянуті пізніше.

У математичній моделі використовується другий закон Ньютона й теорема Кеніга. Якщо не вживати коефіцієнт інерції $(1+\gamma)$, то рівняння руху (1.4) матиме вигляд (3.12):

$$(m + m_e) \frac{dv}{dt} = F_k - W_k - B_k. \quad (3.12)$$

Рівняння руху в такій формі (3.12) доцільно використовувати у випадку, коли ТЗ під час руху, наприклад тролейбус від зупинки до зупинки, змінює свою вагу. У лівій частині ефективна маса є сумою маси ТЗ та інертної маси частин, що обертаються, а у правій частині сили, які зумовлюють рух ТЗ: сила тяги, сила основного й додаткового опору руху й гальмівні сили. Усі величини в рівнянні (3.12) відповідають системі СІ і ніяких проблем розмірності не виникає.

Далі, згідно з рекомендаціями проведення тягових розрахунків, наведені у нормативних документах та підручниках рівняння приводять до питомих одиниць. Це зумовлене потребою представити рівняння в універсальному вигляді, який дозволяє одним рівнянням описувати рух ТЗ різної маси. Такий підхід був доцільним на початку розвитку електротранспорту, оскільки в

інженерній практиці операцію інтегрування нелінійних рівнянь не використовували. Засобів сучасної обчислювальної техніки не було й доводилось інтегрування рівняння руху виконувати графоаналітичним методом. Це доволі трудомістка операція, яка потребує значних затрат часу. Тому використовували методи спрощення розрахунків і зменшення їхньої кількості, за допустимої втрати точності.

Точність розрахунків при переході до питомих одиниць втрачається з низки причин. Перехід до питомих одиниць потребує введення коефіцієнта інерції $1+\gamma$ відповідно (3.7) та подальшого використання його як постійної величини. Насправді це не так. Під час руху пасажирського електропоїзда, тролейбуса чи трамвая на різних ділянках шляху кількість пасажирів різна і маса m змінюється майже у 2 рази. Інертна маса m_i постійна. Згідно з (3.7) значення γ змінюється й отримуються різні рівняння з різними числовими коефіцієнтами, тобто принцип універсальності рівняння порушується, що призводить до неточності одержаних результатів.

Крім цього, приведення рівнянь руху до питомих одиниць, тобто вигляду незалежного від маси, математично некоректне, тому що деякі складові сил опору в (3.12) як приклад опору повітря не залежать від маси ТЗ. Вони постійні за будь-якій зміні маси ТЗ і їх не можна виразити питомими одиницями. Якщо у випадку малих швидкостей руху сили опору повітря відносно невеликі й похибка при використанні питомих величин також невелика, то за швидкостей 200 км/год, і більше ці сили величина таких більша, ніж усіх інших, такий метод обчислень, за якому незалежну від маси величину ділять на масу ТЗ, а потім множать на іншу масу, дає суттєві різницю, яку навіть неможливо вважати похибкою обчислень.

На сьогодні комп'ютерна техніка та програмне забезпечення дозволяє виконувати складні розрахунки для моделей з нелінійними диференціальними рівняннями, із системами багатьох рівнянь. Точність розрахунків суттєво більша, а затрати часу мінімальні. Зважаючи на це рівняння руху недоцільно переводити до питомих одиниць. У розрахунках потрібно використовувати математичну модель руху ТЗ, вказувати індивідуальні параметри конкретного ТЗ і виконувати індивідуальні розрахунки. За таким принципом працюють різні системи автоведення, які керують роботою ТЗ, наприклад система автоведення УСАВП [74–76], або слугують для допомоги, підказки водіям [37, 77]. Вони, крім постійних параметрів ТЗ, фіксують поточні параметри руху: координати, швидкість, масу та ін., а також виконують розрахунки згідно з математичною моделлю.

Тому в подальшому потрібно розглядати індивідуальні методи розрахунку руху транспортних засобів. Необхідність приведення рівнянь до питомих одиниць відпадає, і їх можна представити відповідно до системи одиниць СІ та виконувати розрахунки безпосередньо за цими рівняннями. У такий спосіб позбавляємося логічного протиріччя, яке виникає у випадку використання питомих одиниць в рівняннях електричної тяги. Єдиним недоліком такого підходу є необхідність приведення всіх даних виконаних раніше розрахунків, закріплених у великій кількості документації, до однієї системи. Проте такий перерахунок потрібен, тільки виконати його потрібно після розробки якомога досконалішої математичної моделі руху, тобто після теоретичного опрацювання основних положень ТЕТ.

3.4 Концептуальна та математична моделі руху транспортних засобів як матеріального тіла

У будь-якій науці настають моменти, коли для забезпечення подальшого розвитку потрібно відкоригувати деякі застарілі уявлення, оновити їх і об'єднати знання зі знаннями, отриманими в інших наукових напрямках. Щодо чинної теорії електричної тяги, то її теоретичну основу потрібно доповнити досягненнями механіки, вираженими в роботах Д'Аламбера, Ейлера, Лагранжа. Потрібно відкинути поняття ваги як еквівалента маси. Вага згідно з визначенням – це сила, з якою тіло діє на опору. Рівняння визначення ваги (3.4) отримано на основі науково підтвердженої гіпотези про тотожність гравітаційної та інертної маси. Необхідно спиратися на систему одиниць СІ, оскільки вона затверджена стандартом і побудована на основі фундаментальних понять світобудови. Це система, яка теоретично опрацьована, прийнята всім світовим науковим товариством і є основою подальшого розвитку науки. Необхідно наблизити чинну теорію електричної тяги до більш загальних дисциплін, таких як теоретична механіка, теорія електроприводу, електродинаміка, а також врахувати досягнення інформаційних технологій та математичного моделювання. Оскільки інформаційні комп'ютерні моделі в сучасній науці виступають як замітники реальних об'єктів і використовуються для наукових досліджень, а останнім часом безпосередньо для керування рухом засобів електричного транспорту, то потрібно розробляти та вдосконалювати відповідні математичні комп'ютерні моделі.

Розглянута в основах електричної тяги модель руху ТЗ є доволі спрощеною. Вона дозволяє розрахувати тільки корисний поступальний рух транспортного засобу. Рух ТЗ розглядається як рух матеріальної точки, у якій зосереджена вся маса ТЗ. Він описується другим рівнянням Ньютона з

врахуванням теореми Кеніга. В основному рівнянні руху це відображено введенням коефіцієнта інерції $1+\gamma$, який вважається постійною величиною. Метою введення коефіцієнта інерції є спрощення рівняння й подачі його в найбільш загальному вигляді, приведенню до «питомих» величин. Проте використання цього коефіцієнта і приведення рівняння руху до «питомих» одиниць, як це практикується у відомих методах тягових розрахунків, з математичного погляду є некоректною операцією і призводить до помилкових результатів розрахунків:

1) під час розрахунків руху по маршруту трамвая, тролейбуса, приміських електричок тощо не враховуються зміни маси ТЗ від зупинки до зупинки (адже вважається, що рівняння приведенне до «питомої» і його розв'язок не залежить від загальної маси ТЗ). Насправді, коли пасажери виходять та заходять у ТЗ, змінюється маса m ТЗ, а інертна маса m_e лишається незмінною, отже змінюється коефіцієнт інерції γ і розв'язок рівняння буде іншим;

2) у рівнянні руху тільки деякі сили опору пропорційні масі ТЗ, інші від маси не залежать, тому ділити всі складники рівняння (1.1) на «вагу» в кН, щоб одержати рівняння в «питомих» одиницях не можна.

Прийнята модель і рівняння (1.4) не може забезпечити адекватного опису фізичних процесів механіки руху та не задовольняє сучасним вимогам точності розрахунків. Більш конкретно необхідність удосконалення моделі руху зумовлено такими причинами.

У моделі:

- ТЗ вважається жорстким, незмінний матеріальним об'єктом і досліджується його рух. Насправді ТЗ є матеріальним тілом (системою взаємодіючих матеріальних точок), у якому відбуваються внутрішні процеси, в результаті яких це матеріальне тіло може змінювати свою форму;

- усі розрахунки виконуються за тяговою характеристикою двигуна без врахування режимів роботи, його струму, напруги, активного опору, магнітного поля, тобто без врахування процесів перетворення електричної енергії в механічну;

- у модель входить вага, питома вага ТЗ там, де повинна бути маса.

В основному рівнянні руху:

- величина прискорення виступає у двох ролях, маючи різну розмірність. Перша – як коефіцієнт перетворення сили «ваги» у масу $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. Друга – як прискорення ТЗ у $\text{км}/(\text{год}\cdot\text{с})$. До того ж одиниці вимірювання прискорення у правій і лівій частині основного рівняння різні;

- рівняння Ньютона та теорема Кеніга стосуються динаміки матеріальної точки й не дають можливостей усебічному аналізу руху ТЗ (поїзда, трамвая, тролейбуса та ін.);
- прийняті спрощення шляхом введення коефіцієнта обертальних мас, не враховують зміни маси пасажирських ТЗ під час руху;
- приведення до «питомих» одиниць і одержання основного рівняння руху допускають некоректні спрощення, коли сили аеродинамічного опору не залежать від маси;
- використовуються позасистемні одиниці вимірювань, що згідно з діючим законодавством недопустимо;
- еквівалентом маси ТЗ виступає «вага», що принципово неправильно.

Фактично транспортний засіб становить складну систему зв'язаних і взаємодіючих між собою частин та вузлів. Вони взаємодіють у різний спосіб: здійснюють відносне переміщення, коливання, обертальний рух і взаємодіють із навколишнім середовищем. У результаті цієї взаємодії відбувається рух ТЗ. Для приведення в рух на засобах електротранспорту використовують електродвигуни, які перетворюють електричну енергію в механічну. Механічна енергія від якоря електродвигуна передається колесам, які обертаються та приводять у рух ТЗ.

Аналіз процесів, які приводять до руху ТЗ, є доволі складним завданням. У роботі [60] відмічається, що тільки для аналізу механічного руху одного тіла потрібно шість диференціальних рівнянь, а для n взаємодіючих тіл потрібно в стільки ж разів більше. У транспортних засобах взаємодіючих тіл десятки, навіть десятки сотень, якщо розглядати залізничний поїзд загалом. Тому завдання вивчення руху ТЗ є доволі складним. Крім опису механічних процесів, для вивчення руху ТЗ, побудови математичної моделі руху потрібно врахувати роботу двигуна, електричні процеси в системі керування, перетворення електричної енергії в механічну, передачу механічної енергії системою приводу до коліс, взаємодію коліс зі шляхом. Потрібно також врахувати втрати енергії на подолання сил опору, перетворення механічної енергії на теплову. Завдання в такій постановці здається таким, що не підлягає виконанню. Методи теоретичної механіки та електромеханіки дозволяють виконати завдання різної складності й постійно вдосконалювати ТЗ.

У роботах Ж. Д'аламбера, Л. Ейлера, Ж.-Л. Лагранжа розглядається динаміка матеріального тіла, яке становить складну систему матеріальних точок, що взаємодіють між собою. Розроблено математичний апарат аналізу динаміки таких систем з урахуванням взаємодії частин системи, представлених

як матеріальні точки процесів перетворення механічної енергії в інші види та з урахуванням рушійних сил, що приводять у рух таку систему [60]. Будь які сили виникають внаслідок взаємодії тіл. Ці взаємодії і обмеження руху прийнято називати в'язями. Розрізняють внутрішні в'язі і зовнішні зв'язки. Згідно до третього закону Ньютона в тілі всі внутрішні сили зрівноважені. Тому під їх тією рух тіла не відбувається. Рух тіла як одного цілого може бути тільки під дією зовнішніх зв'язків.

Зауваження. У подальшому, для більш чіткого поділу типів зв'язків, термін «в'язі» буде застосовуватись для позначення внутрішніх, а термін «зв'язки» для зовнішніх зв'язків.

Динаміка руху матеріального тіла розглядається на основі принципу Д'аламбера, а саме рухоме тіло знаходиться в рівновазі, якщо до сил статки додати складники, що відповідають інерційним силам. Інерційні сили – це сили спротиву тіла активним силам, які намагаються змінити його характер руху: прискорити чи сповільнити. Цей принцип визначає загальний підхід до розгляду динаміки складних систем, а саме зводить питання динаміки до розгляду статки системи. Отже, розглядається рівновага складної динамічної системи за наявності зовнішніх сил.

Згідно з формулюванням класичної механіки Ж.-Л. Лагранжем, вивчення динаміка матеріального тіла спрощується тим, що в'язі, які обмежують взаємний рух його частин, взаємно урівноважуються, залишаючи тільки декілька степенів свободи, відносно яких може здійснюватися рух. Урахування в'язів суттєво скорочує кількість рівнянь, а використання функції Лагранжа полегшує вирішення завдань механіки.

Аналіз руху зводиться до вибору степенів свободи, тобто можливих переміщень тіла загалом та опису руху з використанням узагальнених координат, узагальнених швидкостей та узагальнених сил. Рух відбувається згідно з законом збереження енергії. Відповідно до вибраних степенів свободи розраховують зміну енергії за часом, і траєкторію та характер руху тіла визначають згідно з варіаційним принципом, за мінімумом інтегралу дії. Для математичного опису руху розроблені рівняння Лагранжа першого та другого роду. Відповідно рівнянь Лагранжа другого роду для розрахунку руху потрібно знайти похідні за узагальненими координатами та узагальненими швидкостями з функції Лагранжа:

$$L = T - U, \quad (3.13)$$

де L – функція Лагранжа, яка дорівнює різниці кінетичної – T та потенціальної – U енергії матеріального тіла.

У концептуальній моделі рух ТЗ представляється як рух матеріального тіла під дією зовнішніх сил. Матеріальне тіло – це система матеріальних точок, що взаємодіють між собою. Як матеріальні точки можуть бути прийняті самостійні вузли, деталі матеріального тіла. На систему накладено в'язі різних типів, які обмежують ступінь свободи окремих матеріальних точок та тіла загалом, тобто його можливий рух.

Рух матеріального тіла загалом викликається зовнішніми силами, а відносний рух його матеріальних точок – внутрішніми. Згідно з третім законом Ньютона внутрішні сили зрівноважені між собою та не можуть викликати зміну його стану спокою чи рівномірного прямолінійного руху тіла загалом. Сили в матеріальному тілі поділяють на консервативні та дисипативні, і відповідно до наявності таких сил самі системи поділяють на консервативні та дисипативні. До консервативних належать системи, у яких відсутні процеси перетворення механічної енергії в інші види, а можливе тільки перетворення механічної енергії з кінетичної в потенційну та навпаки. Дисипативні системи – це системи, в яких відбуваються процеси перетворення механічної енергії в інші види енергії, розсіяння, втрати енергії чи її притік.

Згідно з прийнятим визначенням концептуальна модель ТЗ (рис. 3.3) представлена як матеріальне тіло – сукупність взаємодіючих між собою матеріальних точок. Як матеріальне тіло виступає ТЗ загалом, а як матеріальні точки – двигун, трансмісія, шасі, колеса, вагони залізничного поїзда чи багато вагонного трамвая тощо. У результаті взаємодії система точок становить матеріальне тіло. У ньому діють внутрішні сили, а зовні на нього діють зовнішні сили: зчеплення коліс зі шляхом, сили опору шляху та повітря, тобто сили, викликані навколишнім середовищем [78].

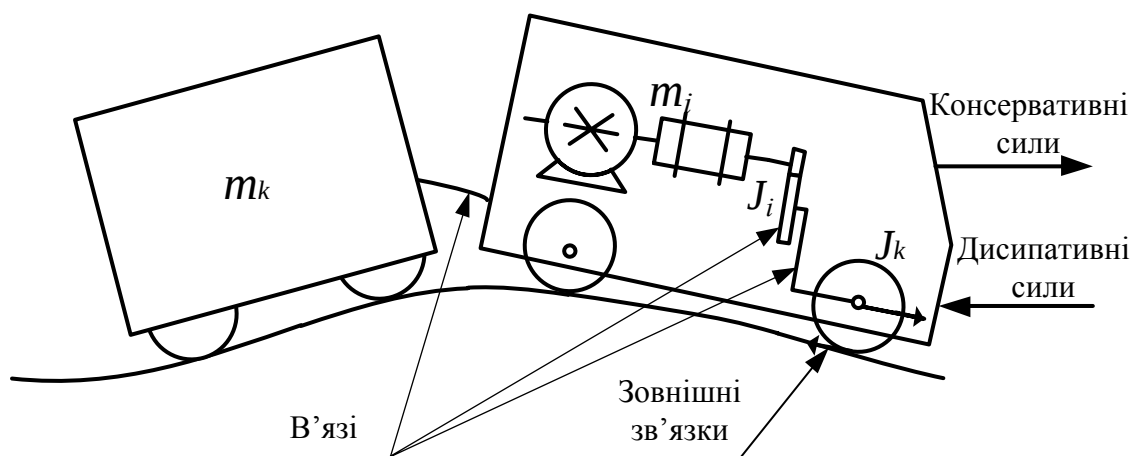


Рисунок 3.3 – Концептуальна модель динаміки транспортного засобу як матеріального тіла

У результаті внутрішніх сил, результатів взаємодії матеріальних точок між собою виникають внутрішні сили. Ці сили супроводжуються перетворенням енергії з одного виду до іншого та передачу енергії від однієї матеріальної точки до іншої. В електродвигуні електрична енергія, яка надходить до двигуна, перетворюється в механічну. У двигуні внутрішнього згоряння хімічна енергія реакції горіння палива перетворюється в теплову, а тепла у механічну. Механічна енергія обертowego руху двигуна передається через трансмісію до ведучих коліс і викликає сили взаємодії ТЗ зі шляхом. У результаті взаємодії зі шляхом виникають зовнішні сили, які приводять ТЗ у рух відносно зовнішнього середовища. Кінетична енергія обертowego руху частин ТЗ, його матеріальних точок перетворюється в кінетичну енергію поступального руху усього ТЗ як матеріального тіла. Сили опору зумовлюють часткові втрати енергії, тобто перетворення механічної енергії в теплову [78].

Оскільки транспортний засіб знаходиться в потенційному полі тяжіння Землі, то під час долаття підйомів та спусків шляху кінетична енергія руху частково перетворюється в потенціальну енергію, зумовлену зміною рівня ТЗ у потенційному полі Землі.

Водій, який керує рухом ТЗ, має можливість регулювати рух зміни сили тяги двигуна (зміни кількості енергії, яку двигун перетворює в механічну за одиницю часу). Під час гальмування він регулює швидкість втрат кінетичної енергії ТЗ в теплову або перетворення її в інші види енергії зазвичай в електричну під час рекуперативного гальмування.

Тут, замість прийнятої в чинній теорії електричної тяги моделі ТЗ як матеріальної точки, є складніша концептуальна модель. Ця модель дозволяє враховувати, окрім механічного руху ТЗ по шляху, процеси взаємодії частин ТЗ та процеси перетворення енергії. Модель окреслена тільки у загальному вигляді. Відповідно до неї можна побудувати безкінечний ряд конкретних моделей, які дозволяють аналізувати процеси, які стосуються ТЗ загалом, так і поглиблено вивчати процеси, що відбуваються в конкретних вузлах, за різних умов руху ТЗ [77].

Рух розглянутої концептуальної моделі ТЗ описується рівняннями Лагранжа другого роду [58–61]. Рівняння руху подають в узагальнених координатах, швидкостях і узагальнених силах.

Якщо не враховані зовнішні сили, рівняння Лагранжа описують кінематику системи, тобто можливі переміщення її за відсутності зовнішніх сил. Прикладаючи зовнішні сили, ми вивчаємо динаміку системи. Аналіз зазвичай здійснюється послідовно: передусім розглядається кінематика ТЗ, далі динаміка руху без врахування процесів дисипації, а потім включають в аналіз

процеси дисипації, тобто втрати енергії на подолання сил опору. Першому кроку дослідження відповідає консервативна система, наступним – дисипативна. Рівняння Лагранжа для консервативної системи має вигляд:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = 0, \quad (3.14)$$

для дисипативної системи:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j. \quad (3.15)$$

У ці рівняння входить: q_j і $\dot{q}_j$ – узагальнені координати та швидкості для j -го ступеня свободи; L – функція Лагранжа; Q_j – узагальнені, не потенційні сили. Рівняння одержані на основі принципу д'Аламбера, який вводить поняття віртуальної роботи δA , що виконана зовнішньою силою під час віртуального переміщення δs . Віртуальне переміщення – це переміщення, яке допускається в'язями, накладеними на систему. Ці рівняння містить закони Ньютона та теорему Кеніга. Використовуючи їх, немає потреби знаходити сили реакції в'язів, оскільки в рівняння входять віртуальна робота й узагальнені координати, які залежать від в'язів.

Висновки до розділу

Теорія електричної тяги як наукова дисципліна виникла й розвивається протягом століття, є основою та фундаментом розвитку електричного транспорту – від його зародження до сьогоднішніх днів. Розвиток науки й технологій, технічний прогрес, використання інформаційних технологій потребують відповідного розвитку теоретичної бази електричного транспорту, а саме теорії електричної тяги. На жаль, теорія електричної тяги у тому вигляді в якому вона подана в навчальних програмах та посібниках, методичній літературі та технічній документації, суттєво відстає від сучасних вимог технічного прогресу. Розвиток її зупинився на рівні досягнень початку та середини минулого століття і не відповідає сучасним вимогам.

Сучасний електричний транспорт є напрямком діяльності, нерозривно пов'язаним із науковими технічними досягненнями XX – початку XXI століття. Розвиток засобів транспорту потребує відповідного розвитку теорії електричної тяги, яка далека до досконалості. На електричному транспорті сьогодні частково використовуються застаріла технічна система одиниць МКГСС і

відповідно до неї поняття ваги замість маси. Міжнародна система одиниць СІ не впроваджена повністю, а змішування її з технічною системою призводить до низки проблем.

Прийнята в ТЕТ математична модель і рівняння не може забезпечити адекватного опису фізичних процесів механіки руху та не задовольняє сучасним вимогам точності розрахунків. Необхідність удосконалення моделі руху зумовлено такими причинами:

- у моделі ТЗ вважається жорстким, незмінний матеріальним об'єктом та досліджується його рух. Насправді ТЗ є матеріальним тілом (системою взаємодіючих матеріальних точок), у якому відбуваються внутрішні процеси, в результаті яких це матеріальне тіло може здійснювати рух;

- усі теоретичні розрахунки в ТЕТ виконуються за тяговою характеристикою двигуна без врахування процесів перетворення електричної енергії в механічну, теплових втрат енергії;

- тягові розрахунки виконують в питомих одинцях. Приведення рівнянь руху до «питомих» одиниць допускають некоректні спрощення, наприклад, під час одержання питомих величин діючих сил не враховується, що сили опору повітря не залежать від маси ТЗ;

- використовуються позасистемні одиниці вимірювань, що згідно з діючим законодавством недопустимо;

- еквівалентом маси ТЗ виступає «вага», що науково невірно;

- уточнення потребує визначення ефективної маси частин ТЗ що обертаються.

Фактично транспортний засіб є складною системою зв'язаних і взаємодіючих між собою частин та вузлів. Вони взаємодіють у різний спосіб: здійснюють відносне переміщення, коливання, обертальний рух і взаємодіють із навколишнім середовищем. У результаті цієї взаємодії відбувається рух ТЗ. Для приведення в рух на засобах електротранспорту використовують електродвигуни, які перетворюють електричну енергію в механічну.

У цій роботі для усунення проблем із одиницями вимірювання запропоновано відмовитись від використання методів розрахунків у відносних одиницях і виконувати розрахунки у реальних величинах. Це дозволяє повністю перейти до використання міжнародної системи одиниць. Сучасна обчислювальна техніка, за наявності розроблених алгоритмів і програмних засобів, дозволяє виконувати потрібні розрахунки миттєво в режимі безпосереднього руху ТЗ.

Як альтернатива методів тягових розрахунків запропоновано використати здобутки теоретичної механіки: рівняння Лагранжа, які дозволяють суттєво

спростити аналіз руху, збільшити точність розрахунків і враховувати вплив на рух чинників, які чинна теорія електричної тяги не розглядає. Замість моделі транспортного засобу як матеріальної точки запропонована більш загальна модель матеріального тіла, в яке входять взаємодіючі матеріальні точки. Для математичного опису такої моделі застосовується формалізм рівнянь Лагранжа II роду. Етапами аналізу руху є вибір моделі, яка у максимальній мірі відповідає поставленим завданням досліджень. Відповідно до моделі та завдань досліджень здійснюється аналіз степенів свободи руху та вибір узагальнених координат. Із врахуванням узагальнених координат, та відповідних їм узагальнених сил, розраховується функція Лагранжа системи, яка враховує кінетичну та потенційну енергію. Наступним етапом є запис рівняння Лагранжа II роду, та одержання системи рівнянь руху, які є часткові похідні функції Лагранжа по узагальнених координатах. Розв'язуючи систему одержаних рівнянь при різних початкових умовах одержують розв'язки, які описують можливі режими руху транспортного засобу. Особливістю використання рівнянь Лагранжа II роду є те, що вони розглядають рух з врахування процесів перетворення та розсіяння енергії. Вони дозволяють вивчити кінематику та динаміку руху транспортних засобів як консервативної так і дисипативної систем. Консервативна система це система у якій відбуваються тільки процеси перетворення механічної енергії з потенційної в кінетичну та навпаки, в середовищі дії гравітаційного поля земного тяжіння. Дисипативна система – це система у якій відбуваються процеси перетворення механічної енергії в інші види: теплову, хімічну, електричну. Це системи у яких відбуваються процеси дисипації енергії, тобто її розсіяння.

4 КІНЕМАТИКА ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ. РІВНЯННЯ ЛАГРАНЖА ІІ РОДУ ДЛЯ КОНСЕРВАТИВНИХ СИСТЕМ

4.1 Кінематична схема засобу електричного транспорту

Відповідно до основ класичної механіки вивчення руху матеріальних тіл вирішується послідовно у таких розділах механіки: статика, кінематика і динаміка. Статика розглядає рівновагу тіл. Кінематика вивчає опис і особливості руху матеріальних тіл без аналізу сил, які його зумовлюють. Матеріальне тіло описують кінематичною схемою, яка дозволяє найдетальніше описати матеріальне тіло й вивчити його можливий рух. Відповідно до прийнятої концептуальної моделі ТЗ становить матеріальне тіло, яке складається з взаємодіючих частин і загалом здійснює рух у просторі. Різноманіття транспортних засобів зумовлює їхню різну будову, але вони мають загальні властивості, які представляють кінематичною схемою. Основними вузлами колісних ТЗ є корпус, двигун, трансмісія та колеса. Трансмісія передає обертальний момент від двигуна до ведучих коліс. Взаємодія ведучих коліс зі шляхом забезпечує переміщення корпусу ТЗ, тобто його рух. На рисунку 4.1 подано кінематичні схеми ряду тролейбусів: ЗІУ-5 та ТАТРА, а на рисунку 4.2 – ЗІУ-9.

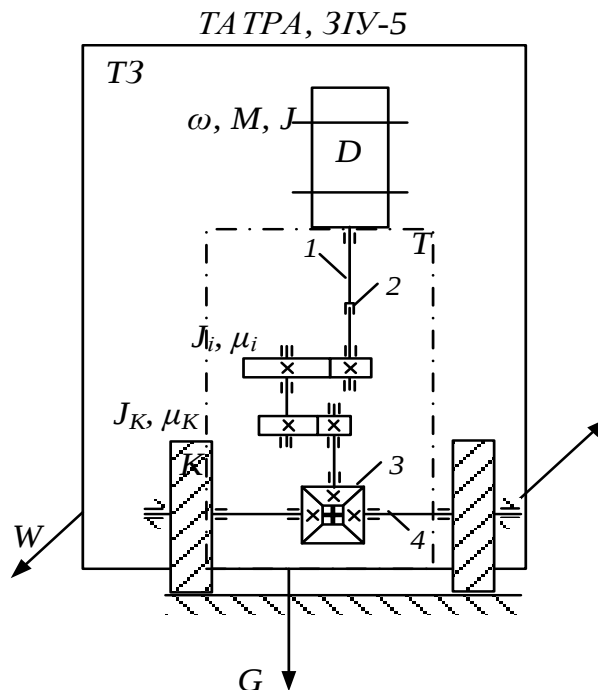


Рисунок 4.1 – Кінематична схема механічної частини тролейбуса ТАТРА та ЗІУ-5

Механічна частина тролейбусів типу ЗІУ-9, ТАТРА (рис. 4.1 та рис. 4.2) містить: корпус – ТЗ; двигун – D ; трансмісію – T і тягові колеса – K . У трансмісію входить: карданний вал – 1 із двох частин із двома хрестовинами, та шліцьове з'єднання – 2, редуктор із з однією чи декількома парами зубчатих коліс; диференціал – 3; півосі коліс – 4.

Трансмісія передає обертальний момент від валу двигуна до ведучих коліс. Хрестовини трансмісії дозволяють змінювати напрямок обертального моменту двигуна, а шліцьове з'єднання – компенсувати зміну віддалі між двигуном та колесами в разі деформації елементів ТЗ. Моменти інерції елементів трансмісій – J_i та передавальні числа – μ_i ; тягові колеса K , що розміщені на півосях, завдяки диференціалу можуть обертатись із різними швидкостями на поворотах дороги. Вони мають радіус R_k , і їхні моменти інерції J_K . Загальне передавальне число трансмісії μ_k .

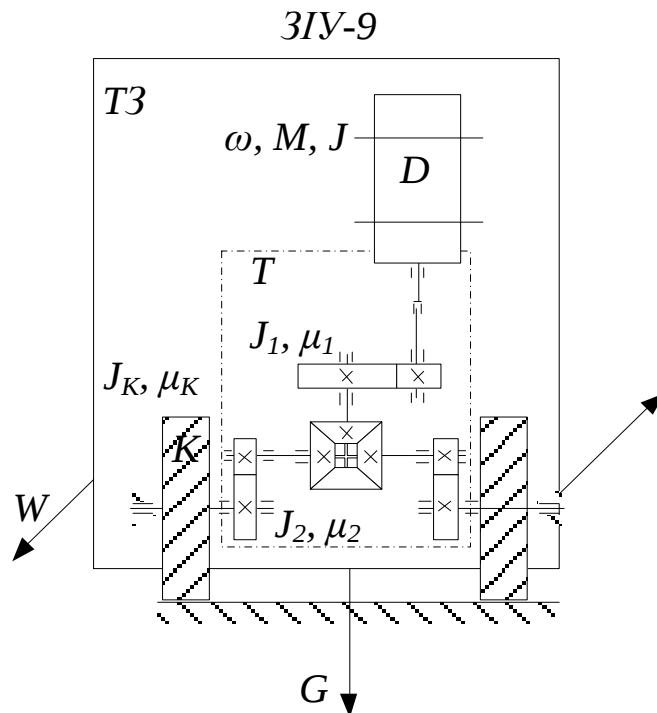


Рисунок 4.2 – Кінематична схема механічної частини тролейбуса ЗІУ-9

Рух ТЗ здійснюється так, що ротор двигуна завдяки енергії, яка передається з електричної мережі, створює обертальний момент на валу. Цей момент передається до ведучих коліс і приводить їх в обертальний рух. Колесо котиться по шляху та в результаті їхньої взаємодії з полотном дороги чи рейками перетворює обертальний момент у силу тяги, яка веде до поступального руху ТЗ.

Відповідно до прийнятої концептуальної моделі ТЗ представлено матеріальним тілом. Кінематична схема представляє ТЗ як систему пов'язаних між собою частин. Ці частини мають певну масу m і моменти інерції J . Вони переміщуються відносно одна одної та обертаються з різними швидкостями ω . В'язі між частинами в кінематичній схемі вважаються невагомими. Під час вивчення кінематики потрібно враховувати їхні жорсткості. Жорсткість в'язів визначається згідно з обертовим моментом і силою поступального руху відповідно до формул (4.1):

$$c_i = \frac{M_{yi}}{\Delta\varphi_i} \quad (4.1)$$

та (4.2):

$$c_i = \frac{F_{yi}}{\Delta l_i}, \quad (4.2)$$

де M_{yi} та F_{yi} – обертовий момент та навантаження механічного зв'язку; $\Delta\varphi_i$, Δl_i , – деформації пружних в'язів при обертальному і поступальному рухах.

Розглядаючи кінематику ТЗ в першому наближенні приймемо, що всі в'язі між її частинами абсолютно жорсткі, за винятком шліцевого з'єднання частин колінчатого валу, жорсткість якого на видовження дорівнює нулю, а відносно обертального руху рівна нескінченності.

Використовуючи одержані кінематичні схеми (рис. 4.1 та рис. 4.2), побудуємо розрахункову кінематичну схему тролейбуса ЗІУ-9.

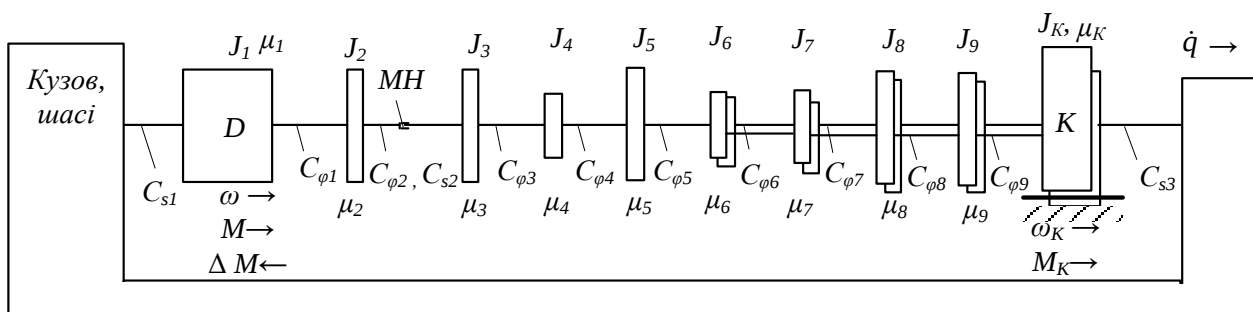


Рисунок 4.3 – Розрахункова кінематична схема електропривода тролейбуса ЗІУ-9

На рисунку 4.3 подана розрахункова кінематична схема електропривода тролейбуса ЗІУ-9 у загальному вигляді, без деталізації моментів інерції окремих частин. Вона містить: кузов і шасі тролейбуса, D – ротор двигуна, J_2 , J_3 – дві частини карданного валу, J_4 , J_5 , – шестерні редуктора головної передачі, J_6 – шестерні диференціала, J_7 – дві півосі заднього мосту, J_8 , J_9 , – дві

пари шестерень планетарних редукторів. На схемі позначені: $C_{\phi i}$, – жорсткості усіх в'язів обертального, а C_{si} – жорсткості поступальних рухів елементів трансмісії, μ_i – коефіцієнти передачі, що визначають відношення кутової швидкості елементів трансмісії.

4.2 Приведення обертального руху двигуна до поступального

Розглянута на рисунку 4.3 кінематична схема електропривода тролейбуса ЗІУ-9 має низку спрощень, а саме: не враховані робота диференціала за різного навантаження кожного з коліс ТЗ та зміна напрямку кутового моменту. Використовуючи наведену схему, виконаємо аналіз роботи трансмісії та руху тролейбуса загалом.

Для виконання розрахунків потрібно визначити швидкості обертання всіх частин трансмісії. У теорії електропривода зазвичай їх виражають через швидкість валу ротора двигуна [73]. ТЕТ вивчає рух ТЗ по вибраному шляху. Шлях, по якому рухається ТЗ, узагалі може бути описаний багатьма різними параметрами: профілем, планом, типом покриття дороги, дорожніми знаками, тощо. Привести всі характеристики шляху до швидкості та моменту на валу двигуна практично неможливо. Тому привести параметри руху ТЗ до навантаження на валу аналогічно теорії електричного приводу неможливо. Будемо приводити швидкість поступального руху тролейбуса до конкретних точок шляху – s . Через це для вивчення руху ТЗ необхідно незалежною змінною вважати шлях s , а не час руху t . Щоб виконати розрахунки руху ТЗ відповідно до рівнянь Лагранжа II роду, представимо переміщення ТЗ уздовж шляху узагальненою координатою – $q_1=s$, а швидкість узагальненою швидкістю – $\dot{q}_1 = \dot{s}$ відповідно. Оскільки рівняння Лагранжа включають кінетичну енергію, додатково переміщенню s визначимо ще один параметр шляху, а саме рівень його – z умовно відносно прийнятої початкової точки. (Пояснення узагальнених координат руху тролейбуса та їх вибору подано у наступному розділі – динаміка руху ТЗ).

Крім узагальненої координати шлях – $q_1= s$, яка відноситься до руху усього ТЗ, відповідно до кінематичної схеми (рис. 4.3) необхідно визначити узагальнені координати, які відносяться саме до руху елементів трансмісії. Такими координатами є кут ϕ повороту елементів трансмісії та відповідна кутова швидкість $\dot{\phi}$. Оскільки крім повороту елементів трансмісії можливе переміщення елементів валу, яке допускає шліцеве з'єднання півосей, то додатково враховуємо поступальний рух (відносне зміщення) двох частин

карданного валу – l . Зв'язок кута повороту елементів трансмісії пов'язаний з поступальним рухом ТЗ формулою (4.3).

Обертальний рух елементів трансмісії в'язями, які подані в кінематичній схемі, однозначно пов'язаний з обертанням ведучих коліс ТЗ і пройденим ТЗ шляхом. Отже, ми маємо одну ступінь свободи, якою можемо вважати координату шляху – s . Розглянутий в попередньому абзаці обертальний рух елементів трансмісії відповідає поступальному руху ТЗ. Ураховуючи параметри трансмісії одержуємо, що кожен її елемент під час руху тролейбуса обертається на кут, який дорівнює:

$$\varphi_i = \frac{s\mu_i}{2\pi R_K} . \quad (4.3)$$

Відповідно, швидкість обертання:

$$\dot{\varphi}_i = \frac{\dot{s}\mu_i}{2\pi R_K} . \quad (4.4)$$

Відповідно до формули (4.3) та рисунка 4.3 розглянемо передаточні числа μ_i та швидкості обертання елементів механічної частини ТЗ. Передавальне число між двигуном і шестернею J_9 дорівнює одиниці $\mu_9 = 1$. Планетарна передача, у яку входять шестерні J_8 і J_9 , має передавальне число $\mu_8 = \mu_7 = 3,66$. Шестерні диференціала за рівномірного навантаження також обертаються з тією самою швидкістю, тобто приймемо передавальне число відносно ведучих коліс $\mu_6 = 3,66$. Шестерні J_5 , J_4 є шестернями головної передачі з передавальним числом $\mu_{5,4} = 3,11$, отже маємо:

$$\mu_K = \mu_5 \cdot \mu_{5,4} = 3,66 \cdot 3,11 = 11,38.$$

Отже, згідно з рисунком 4.3 передавальні числа частин колінчатого валу J_2 , J_3 і ротора двигуна J_1 відповідно дорівнюють $\mu_{DK} = \mu_3 = \mu_2 = \mu_1 = 11,38$.

Швидкості обертання елементів трансмісії знаходимо відповідно до формули (4.4).

Розглянемо наступний ступінь свободи механічної частини тролейбуса, а саме відносне зміщення двох частин карданного валу, l . Дві частини карданного валу зі шліцьовим з'єднанням допускають відносне переміщення двигуна і ведучих коліс під час руху ТЗ і можливих деформацій його частин. Така конструкція карданного валу використана для того, щоб не допустити перенавантажень на карданний вал при виносному зміщенні двигуна та кріплення колісної пари, спричинених можливими деформаціями. Оскільки

питання деформації тут не розглядається, то можна прийняти карданний вал суцільним, або, як виконано далі, нехтувати деформаціями, прийнявши пружність з'єднання нульовою.

Усі в'язі обертального руху вважаються абсолютно жорсткими, деформації в'язів відсутні, не враховуються можливі деформації частин трансмісії, виникнення небажаних коливань, вібрацій. У разі прийняття вказаних спрощень у в'язах не накопичується потенціальна енергія, а повна енергія дорівнює тільки кінетичній обертальних мас трансмісії. Рівняння Лагранжа для розглянутої системи є найпростішим.

Отже, з врахуванням відмічених особливостей, рух ТЗ загалом зводиться до поступального руху. Транспортний засіб загалом приведено до одномасової механічної ланки. Це дозволяє привести обертальний момент сили тяги двигуна до ободу колеса силу з врахуванням передавального числа трансмісії μ_{DK} та радіуса ведучих коліс R_K [79].

4.3 Рівняння кінематики транспортного засобу

Для вивчення руху ТЗ як матеріального тіла у цій роботі використано рівняння Лагранжа II роду (3.15). Це рівняння є альтернативою основного рівняння електричної тяги чинної ТЕТ (1.2), наведеного у підручниках та службовій документації. У рівнянні (1.2) рух ТЗ розглядається як рух матеріальної точки. У запропонованій альтернативній моделі ТЗ представлено як матеріальне тіло – система з'єднаних між собою, взаємодіючих матеріальних точок. Така модель ТЗ дозволяє аналізувати рух ТЗ із враховувати взаємодії його частин між собою, враховувати процеси обміну енергією між вузлами ТЗ та взаємного перетворення механічної енергії в інші види. Наприклад, розглядати рух окремих вагонів багато вагонного трамваю чи залізничного потягу, їх взаємодію, їхнє відносне переміщення. Також можна враховувати перетворення електричної енергії двигуном в механічну, сили в'язів між вузлами ТЗ під час руху і долання ділянок шляху складного профілю.

У цьому розділі виконано аналіз кінематики руху ТЗ на прикладі тролейбуса ЗІУ-9. Кінематика вивчає можливий рух матеріального тіла і процеси перетворення кінетичної енергії в потенціальну, при відсутності зовнішніх сил. Тобто можливі процеси обумовлені дією закону збереження механічної енергії в разі відсутності втрат енергії. Рівняння руху (1.2) чинної ТЕТ не надає можливості вивчення кінематики, оскільки не враховує внутрішню структуру ТЗ, а також дію потенційного поля тяжіння Землі. Кінематику руху описує рівняння (3.14), рівняння Лагранжа II роду для консервативної системи. Воно дозволяє вивчати рух ТЗ розміщеного в полі

тяжіння Землі, вивчати власні рухи притаманні ТЗ. Вивчення кінематики дозволяє визначити основні механічні властивості складної матеріальної систем; взаємодію його частин, відносні рухи частин, їх власні коливання тощо. У нашому випадку розгляд кінематики руху дозволяє уточнити визначення такої важливої величини ТЗ як ефективна маса частин що обертаються й коефіцієнту інерції $(1+\gamma)$ та його вплив на характер руху ТЗ.

Ураховуючи прийняту концептуальну модель, ТЗ представляється матеріальним тілом складної структури. Структура ТЗ представлена розрахунковою структурною схемою (рис. 4.3). В неї входить: корпус, двигун, елементи трансмісії та колеса ТЗ. Враховані в'язі між частинами ТЗ та передача обертового моменту від ротора двигуна до коліс, а також взаємодія коліс зі шляхом. ТЗ здійснює поступальний рух у полі тяжіння Землі. Рушієм ТЗ є двигун, ротор якого здійснює обертовий рух. Накладені трансмісією в'язі приводять у рух колісні пари ТЗ. Зовнішні зв'язки і взаємодія коліс із дорожнім покриттям (рейковим шляхом) перетворюють обертовий рух ведучих коліс у поступальний рух ТЗ.

Розглянуто на рисунку 4.3 розрахункова кінематична схема ТЗ можна представити як систему з одним ступенем свободи. Як узагальнену координату – q_1 у ній прийнято пройдений шлях: $q_1 = s$. Відповідно, узагальненою швидкістю $\dot{q}_1 = \dot{s}$ є швидкість поступального руху ТЗ. Оскільки ТЗ здійснює рух по заданому шляху складного профілю, то систему ТЗ і шлях його руху можна представити як систему їх двома узагальненими координатами шлях s та рівень шляху $z(s)$. Для вивчення кінематики ТЗ представимо згідно механіки Лагранжа як консервативну систему, тобто вивчимо можливі режими руху ТЗ в разі відсутності зовнішніх сил Q_j . ТЗ знаходиться у полі земного тяжіння і враховано тільки процеси взаємного перетворення механічної енергії з потенційної в кінетичну при різних початкових умовах руху.

Враховуючи вибрані узагальнені координати, для одержання рівняння руху згідно до формули (3.14), потрібно розрахувати лагранжіан (функцію Лагранжа) системи. Згідно (3.13) у лагранжіан входить кінетична та потенціальна енергії.

Кінетична енергія – T тролейбуса складається з енергії поступального – T_p руху та енергії обертового – T_T руху.

Відповідно до кінематичної схеми (рис. 4.3) у тролейбусі обертовий рух здійснюють якір двигуна, елементи трансмісії, тягові та підтримуючі колеса. Кінетична енергія цих вузлів ТЗ у рівнянні руху згідно чинної ТЕТ (1.5) враховується коефіцієнтом інерції $(1+\gamma)$, як ефективна маса m_e частин що обертаються. Розрахунок її здійснюється за формулою (1.7).

Крім вказаного на розрахунковій кінематичній схемі обладнання у тролейбусі обертальний рух здійснює додаткове обладнання. Кінетична енергія додаткового обладнання в рівнянні руху (1.5) не враховується та питання її врахування в чинній ТЕТ не розглядається. Як відмічено в першому розділі, деякі вузли додаткового обладнання впливають на характер руху. Цей вплив частково приводить до зміни ефективної маси ТЗ m_e та частково, до втрат механічної енергії руху. Тому потрібно уточнити кінетичну енергію якого саме обладнання потрібно враховувати у величині m_e і вивчити питання, яким чином врахувати енергію, перетворену цим обладнанням з механічної в інші види.

Обертальний рух додаткового обладнання може бути одержаний за рахунок механічної енергії електроприводу ТЗ так і від сторонніх джерел енергії: акумуляторної батареї та тягової мережі, поза основною системою живлення. За рахунок механічної енергії електроприводу здійснюють обертальний рух, наприклад, підвагонні генератори залізничного поїзда, компресори деяких типів ТЗ, тощо. За рахунок сторонніх джерел обертальний рух одержують двірники ТЗ, електроприводи дверей і т. п. Виникає питання: кінетична енергія чи потрібно враховувати кінетичну енергію додаткового обладнання при розрахунку коефіцієнту інерції ТЗ, та яке саме обладнання, і яким чином, враховувати в рівнянні руху ТЗ. Як відмічено вище, чіткої відповіді на це питання не дає ні теорема Керна, ні посібники з ТЕТ.

Звернемось до рівняння Лагранжа II роду. У ліву частину рівняння входять часткові похідні функції Лагранжа, а права частина містить узагальнені сили. Формально в рівняння Лагранжа входить потенціальна енергія усіх частин, які здійснюють поступальний та обертальний рух. Тобто записуючи рівняння Лагранжа потрібно враховувати обертальний рух всього обладнання ТЗ, в тому числі й додаткового: двірників, вентилятора водія, приводу дверей, приводу нахилу кузова ТЗ тощо. З рівняння Лагранжа, як загального рівняння, одержують в рівняння руху. У рівняння руху входять тільки часткові похідні рівняння Лагранжа по узагальнених координатах.

Отже, якщо, у прийнятій відповідно завданням дослідження моделі ТЗ, враховані конкретні узагальнені координати, то в рівняння руху ввійдуть тільки ті складові енергії, які залежать від прийнятих узагальнених координат. Інші складові в рівняння руху не ввійдуть. Тобто, якщо ми формально в рівняння Лагранжа II роду введемо кінетичну енергію додаткового обладнання, таке яке не впливає на характер руху ТЗ, то в рівняння руху його кінетична енергія не ввійде. Це означає, що потрібно розглядати тільки кінетичну енергію того додаткового обладнання, рух якого відповідає прийнятими узагальненими координатами. Поступаючи формально і врахувавши кінетичну енергію усього

обладнання в лагранжіані, ми все рівно одержимо рівняння руху, в яке входять тільки прийняті узагальнені координати. Такими координатами у нашій моделі руху є значення шляху s та його рівня $z(s)$.

Відповідно наведених міркувань розглянемо додаткове обладнання. Ротор під вагонного генератора здійснює обертальний рух і його швидкість змінюється впродовж шляху залежно швидкості ТЗ. Отже кінетична енергія його обертання залежить від координати шляху s і її потрібно враховувати у лагранжіані. Її потрібно врахувати у величині коефіцієнту інерції. Інша справа з обладнанням, яке одержує енергію від сторонніх джерел, наприклад вентилятора водія. Швидкість його обертального руху не залежить від швидкості s ТЗ. (Звичайно, при відсутності хитрої системи зворотного зв'язку між швидкістю вентилятора та швидкістю руху ТЗ, якщо така реалізована.) Кінетичну енергію цього обладнання не потрібно враховувати в лагранжіані. Тобто зафіксуємо, що кінетична енергія обладнання, яке одержує обертальний рух від сторонніх джерел енергії, в рівнянні руху не враховується.

Наступний момент – це права частина рівняння Лагранжа, а саме узагальнені сили. Вище в коефіцієнті інерції m_e рахували кінетичну енергію підвагонного генератора (компресора), який обертається за рахунок механічного зв'язку із трансмісією ТЗ. Тому слід також врахувати і те, що основну частину енергії цей генератор витрачає на приведення в рух іншого обладнання. Більшість енергії генератора не повертається як механічна енергія руху ТЗ, а витрачається на певну роботу. Ці витрати енергії слід врахувати у рівнянні руху. Згідно до механіки Лагранжа вони враховуються у правій частині рівняння Лагранжа, а саме як узагальнені сили. Узагальнені сили входять у праву частину рівняння Лагранжа II роду і розраховуються за формулою віртуальної роботи (5.2). Робота виконана генератором за рахунок механічної енергії електроприводу, що перетворилась в інші види, враховується як втрати енергії руху, тобто як дія узагальнених дисипативних сил.

Аналогічним чином потрібно враховувати і теплові витрати електроенергії двигуна. Для опису дії дисипативних сил, які описують втрати енергії, використовується функція Релея. Вона пов'язана з навантаженням на валу генератора і швидкістю його обертання. Розглянуте питання відноситься до наступного розділу, а саме динаміки руху ТЗ.

Відповідно розглянутим загальним положенням перейдемо до конкретного розрахунку. Енергія обертального руху обладнання, яке одержує обертальний рух від двигуна позначено – T_p , а обладнання, яке одержує обертання від сторонніх джерел енергії – T_d . До першого T_p відноситься: якорь двигуна,

трансмiсія, ведучі колеса, підвагонний генератор, також обладнання, яке одержує обертальний рух від контакту з дорожнім покриттям. До другого – обладнання, яке живиться від сторонніх джерел енергії: електричної мережі чи акумуляторів. Таким обладнанням є: компресор, двигун підсилювача рульового керування, двигуни двірників, відкривання дверей тощо. Відповідно такому поділу кінетична енергія тролейбуса дорівнює сумі складників.

$$T = T_T + T_p + T_d . \quad (4.5)$$

Перший складник – це кінетична енергія поступального руху. Два інші – кінетична енергія обертального руху відмічених вище частин. Її величина визначається як добуток моменту інерції відносно осі обертання – J_i на квадрат кутової швидкості. Для вузлів, що одержують обертовий рух від тягового двигуна кінетична енергія дорівнює:

$$T_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n J_i \left(\frac{\mu_i \dot{s}}{2\pi R_i} \right)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=n+1}^{n+l} J_i \left(\frac{\mu_i \dot{s}}{2\pi R_i} \right)^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n+l} J_i \left(\frac{\mu_i \dot{s}}{2\pi R_i} \right)^2 , \quad (4.6)$$

де $R_i = R_K$ для усіх $i \leq n$; i – номер елемента, який здійснює обертальний рух; n – сумарна кількість елементів електроприводу, включаючи колеса ТЗ; l – кількість частин додаткового обладнання, які здійснюють обертальний рух за рахунок енергії двигуна.

У формулу (4.6) входить дві суми: перша сума відповідає кінетичній енергії усіх вузлів, що відносяться до розрахункової кінематичної схеми (див. рис. 4.3), друга сума – до додаткового обладнання, яке обертається за рахунок кінетичної енергії двигуна ТЗ, наприклад, підвагонний генератор.

Враховуючи (4.6) ефективну масу відповідних частин, що обертаються позначимо:

$$m_p = \sum_{i=1}^{n+l} J_i \left(\frac{\mu_i}{2\pi R_i} \right)^2 \quad (4.7)$$

Кінетична енергія T_d частин додаткового обладнання, які одержують обертальний рух від сторонніх джерел енергії дорівнює:

$$T_d = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k J_j \dot{\omega}_j^2 , \quad (4.8)$$

де k – загальна кількість вузлів додаткового обладнання, яке живиться від сторонніх джерел, J_j , $\dot{\omega}_j$ – їх моменти інерції та кутова швидкість.

Кінетична енергія поступального руху тролейбуса:

$$T_T = \frac{1}{2} m \dot{s}^2. \quad (4.9)$$

З врахуванням (4.5) – (4.9) одержимо:

$$T = \frac{1}{2} m \dot{s}^2 + \frac{1}{2} m_p \dot{s}^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k J_j \dot{\omega}_j^2. \quad (4.10)$$

Отже, кінетична енергія ТЗ дорівнює:

$$T = (m + m_p) \frac{\dot{s}^2}{2} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k J_j \dot{\omega}_j^2. \quad (4.11)$$

Формула (4.11) містить кінетичну поступального руху та енергію обертального руху усіх частин ТЗ. Перший доданок співпадає з відомою формулою, тільки у ньому розділена кінетична енергія частин, пов'язаних із двигуном й трансмісією та додаткових частин, обертаний рух яких не входить у кінематичну схему руху тролейбуса. Теорема Кеніга формально стверджує, що у рівнянні руху потрібно враховувати енергію обертального руху, але чітке визначення самої теореми та деталі її одержання з плином часу втрачені. У рівнянні руху ця енергія враховується тільки коефіцієнтом інерції. Відповідно механіки Лагранжа одержане рівняння (4.11) для визначення ефективної маси частин що обертаються.

Потенціальна енергія ТЗ – U має складові, зумовлені полем тяжіння Землі U_g , та складові, зумовлені накопленням потенціальної енергії пружними елементами – U_c , якими є елементи трансмісії з їхніми жорсткостями C_i (див. рис. 4.3).

$$U = U_g + U_c. \quad (4.12)$$

Потенціальна енергія під час руху в полі земного тяжіння U_g залежить від узагальненої координати рівня дороги $z(s)$, яка є функцією узагальненої координати шлях s :

$$U_g = mgz(s), \quad (4.13)$$

де $z(s)$ – рівень дороги, або висота центра маси відносно умовного, прийнятого нульового рівня.

Потенційна енергія пружних елементів, відповідно до прийнятої для розрахунків моделі ТЗ, дорівнює:

$$U_c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_{\varphi i} \Delta \varphi_i^2 + C_{li} \Delta l_i^2 = 0, \quad (4.14)$$

де $\Delta \varphi_i$ і Δl_i – кутові та поздовжні зміщення елементів трансмісії за деформацій кручення та розтягання.

Розглядаючи трансмісію ТЗ, було прийнято, що всі її елементи є абсолютно жорсткими, тобто вони не підлягають пружним деформаціям. Тому величини кутових зміщень $\Delta \varphi_i$ для всіх елементів трансмісії дорівнюють нулю. Отже, перший доданок у (4.14) дорівнює нулю. Другий доданок описує пружну деформацію розтягу частин карданного валу. У кінематичній схемі ми маємо один елемент, який підлягає такій деформації Δl , а саме шліцеве з'єднання частин карданного валу. Частини його можуть вільно переміщуватись одне відносно другого, величина пружності $C_{s2} = 0$. Решта в'язів, які можуть здійснювати поступальний рух, а саме кріплення двигуна та коліс прийнято абсолютно жорстким, тобто їхні поздовжні зміщення за будь-яких навантажень рівні нулю $\Delta l_i = 0$ тому і друга складова в рівнянні (4.14) дорівнює нулю. Отже, $U_c = 0$.

Враховуючи (4.11), (4.12), (4.13) та (4.14) лагранжіан системи:

$$L = (m + m_p) \frac{\dot{s}^2}{2} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k J_j \dot{\omega}_j^2 - mgz(s). \quad (4.15)$$

Враховуючи прийняті позначення швидкості рівняння Лагранжа (3.12) напишемо у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{s}} \right) - \frac{\partial L}{\partial s} = 0 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\omega}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial \omega_j} = 0 \end{cases}. \quad (4.16)$$

У системі рівнянь (4.16) друге рівняння є зайвим, оскільки маємо однозначну залежність $z = z(s)$ і в першому рівнянні врахована похідна $z(s)$ по змінній s . Тому перше рівняння фактично є рівнянням руху. Підставляючи в

(4.16) значення лагранжіана (4.15), одержуємо рівняння кінематики тролейбуса, а саме:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{s}} \left((m + m_p) \frac{\dot{s}^2}{2} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k J_j \dot{\omega}_j^2 - mgz(s) \right) \right) - \frac{\partial}{\partial s} \left((m + m_p) \frac{\dot{s}^2}{2} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k J_j \dot{\omega}_j^2 - mgz(s) \right) = 0. \quad (4.17)$$

Розрахувавши відповідні часткові похідні за координатою шляху, швидкістю та часом одержуємо рівняння кінематики руху тролейбуса.

$$(m + m_p) \ddot{s} + mg \frac{\partial z(s)}{\partial s} = 0. \quad (4.18)$$

Одержане рівняння руху (4.18) уздовж шляху s вивчає кінематику руху тролейбуса, коли діючі сили відсутні. За такої умови зміна механічної енергії дорівнює нулю, відбуваються тільки взаємні перетворення кінетичної та потенціальної енергій.

Рівняння руху (4.18) не містить складника кінетичної енергії обладнання (4.8), яке одержує обертальний від руху від сторонніх джерел енергії та енергетично не пов'язане з трансмісією ТЗ. Обертальний рух вузлів цього обладнання не залежить від узагальнених координат: шляху s та рівня шляху z . Оскільки кінетична енергія цих частин не залежить від параметрів руху ТЗ то згідно до рівняння Лагранжа відповідні похідні за узагальненими координатами та швидкостями дорівнюють нулю. Отже, обертальний рух цих частин не враховується у рівнянні руху.

Висновок. 1. Під час розрахунку ефективної маси частин що обертаються та коефіцієнту інерції треба враховувати кінетичну енергію усього обладнання, яке здійснює обертальний рух за рахунок енергії електроприводу ТЗ. Тобто розрахунок ефективної маси частин що обертаються слід виконувати згідно формули (4.7), яка замінює формулу (1.7). Замість величини m_e під час тягових розрахунків потрібно використовувати величину m_p .

2. Враховуючи, що введена величина m_p є ефективною масою частин ТЗ що обертаються, розрахунок якої уточнено, і що позначення величини ефективної маси m_e загально вживане, в подальшому будемо використовувати позначення m_e маючи на увазі уточнену величину.

Використовуючи результати розрахунків та визначення коефіцієнта інерції $1+\gamma$ рівняння руху спрощується і має вигляд:

$$\ddot{s} = -\frac{g}{1+\gamma} \frac{dz(s)}{ds} = 0. \quad (4.19)$$

У рівнянні часткові похідні від координати рівень шляху z замінено диференціалом, тому що $z(s)$ однозначно залежить тільки від координати шляху s .

Одержане рівняння (4.19) описує кінематику, тобто рух ТЗ у полі тяжіння Землі, без урахування зовнішніх сил. Це універсальне рівняння справедливе для ТЗ будь-яких видів та будь-якої маси. Кінематика різних видів ТЗ однакова, що не можна віднести до динаміки.

Варто відмітити, що одержані результати дозволяють уточнити формулу (1.7) визначення та розрахунок ефективної маси частин що обертаються та розрахунок коефіцієнта інерції ТЗ виконувати за формулою (4.7). У підручниках електричної тяги чітко не визначено, яке саме обладнання потрібно враховувати під час визначення ефективної маси. Із наведеного чіткого визначеного кінетичну енергію якого саме обладнання потрібно враховувати у рівнянні руху.

Під час визначення коефіцієнта інерції ТЗ повинна враховуватись кінетична енергія тільки обертального руху того додаткового обладнання, яке одержує енергію від механічної частини й нерозривно пов'язане з її роботою. Кінетична енергія обертального руху обладнання, яке енергетично не пов'язане з роботою механічної частини ТЗ, під час визначення коефіцієнта інерції не повинна враховуватись. Наприклад, усі колеса ТЗ здійснюють обертальний рух, накоплюють механічну енергію і роблять свій внесок у коефіцієнт інерції. А допоміжний двигун, який живиться від спільної для всього ТЗ високовольтної мережі, та обладнання, яке приєднане до нього, не впливають на величину коефіцієнта інерції.

При записі рівняння руху (1.2) згідно з теоремою Кеніга [20] враховують кінетичну енергію частин, які здійснюють обертальний рух, відносно центра мас. Рух відносно власного центра мас здійснюють усі частини, що обертаються. У цитованому [20] тексті, це не так. Виконаний аналіз показує, що потрібно враховувати кінетичну енергію частин, які енергетично пов'язані з рухом усього ТЗ. В технічній літературі [18–29] чітко не вказано, яке обладнання потрібно включати у формулу розрахунку додаткової інертної маси, а яке не потрібно.

Похідна $\frac{\partial z(s)}{\partial s}$ у рівняння (4.19) визначає тангенс кута нахилу шляху, тому рівняння (4.19) можна записати у вигляді:

$$\ddot{q} = -\frac{g}{1+\gamma} \operatorname{tg}(\theta). \quad (4.20)$$

Рівняння (4.20) показує, що на прямолінійній ділянці шляху, коли рівень дороги не змінюється $\frac{\partial z(s)}{\partial s} = 0$, ТЗ рухається з постійною швидкістю. Якщо ТЗ рухається на ділянці з ухилом $\frac{\partial z(s)}{\partial s} \neq 0$, то рух здійснюється з прискоренням. Під час руху на підйом $z(s_2) > z(s_1)$ швидкість зменшується, а при русі на спуск $z(s_2) < z(s_1)$ – збільшується.

У теорії електричної тяги подають ухил шляху i ‰, у проміле, тобто як одну тисячну відношення пониження шляху на величину Δz . Заміна цієї величини на тангенс кута нахилу практично не змінює результатів розрахунків.

4.4 Виконання розрахунків із урахуванням профілю шляху

Під час виконання тягових розрахунків передусім виникають питання вибору простих, точних та ефективних методів розрахунку відповідно до поставлених завдань. Тому розглянемо питання вибору методів розрахунків. Зробимо це на прикладі вивчення кінематики руху тролейбуса на маршруті зі змінним профілем шляху. Розрахунки виконаємо згідно до одержаного рівняння (4.20).

Уже давно минули ті часи, коли основними засобами інженерних розрахунків була логарифмічна лінійка та креслярська дошка, на якій робили графічні побудови. Калькулятори також в інженерних розрахунках практично не використовуються. Переважно використовуються програмні засоби, такі як математичні макети «Maple», «Mathematica», «MatCad», «MatLab», «Scilab» та інші спеціалізовані математичні пакети. Найпростішим і найрозповсюдженішим засобом розрахунків є електронна таблиця Excel. Хоча це не спеціалізований для інженерних розрахунків програмний пакет, проте він найрозповсюдженіший, встановлений практично на кожному комп'ютері та надає можливості виконувати завдання, з якими щоденно зустрічаються спеціалісти електричного транспорту. Тому будемо використовувати цей засіб для виконання розрахунків. У складніших випадках використаємо пакет «Matlab», його аналоги, наприклад пакет «Ski Lab» вільного програмного забезпечення, або інші спеціалізовані програмні продукти.

Під час виконання тягових розрахунків в інженерній практиці багато уваги приділяється вибору одиниць вимірювання. Розглянемо це завдання в разі використання рівнянь Лагранжа. Рівняння Лагранжа записані в одиницях системи СІ, тобто метр (м), кілограм маси (кг), секунда (с) і під час розрахунків потрібно використовувати одиниці СІ. Спеціалісти електричного транспорту звикли користуватись швидкістю у км/год, масою у тонах, прискорення у км/(год·с), сили тяги у Н та ще рядом одиниць, як наприклад Н сили тяги ділений на кН ваги. У системі СІ, рівняння можна подавати в цих одиницях, урахувавши прийняті коефіцієнти розмірності. Це не ускладнює розрахунків та не порушує звичних для спеціалістів електричного методів розрахунку. Проте використання прискорення у км/(год·с) у рівнянні другого порядку [18–21] не допускає його подвійного інтегрування, а використання безрозмірних одиниць у цьому ж рівнянні призводить до ймовірності появи помилок. Тому потрібно розрахунки виконувати в основних одиницях СІ, виражати прискорення в м/с^2 , а результати розрахунків приводити до одиниць, які використовуються у практичній діяльності.

Серед методів розрахунків та інтегрування рівнянь руху використовують аналітичні й числові методи. У чинній теорії електричної тяги, як у навчальному процесі, так і в інженерній практиці, використовують графоаналітичні й суто графічні методи розрахунків [18–21]. За наявності обчислювальної техніки графічні методи використовувати недоцільно. Аналітичні методи інтегрування рівнянь руху дозволяють отримати результати у найбільш загальній формі. У разі можливості потрібно їх застосовувати. Цифрові методи розв'язання диференціальних рівнянь більш універсальні, тож саме їх будемо використовувати.

Для аналізу кінематики ТЗ, а потім й динаміки, потрібно задати шлях руху, розглянути різні початкові умови та особливості ділянок шляху, по якому здійснюється рух ТЗ.

Вважатимемо шлях руху прямолінійним у плані та змінним у профілі. Це не вносить обмежень щодо методів розрахунків чинної ТЕТ. У ТЕТ обов'язковим є спрямлення шляху – заміна поворотів еквівалентними ухилами та приведення профілів окремих ділянок до величини середнього ухилу. У цій роботі не відмовляємось від заміни поворотів еквівалентними ухилами (розрахунки без такої заміни є завданням подальшої роботи), але не потрібно розбивати шлях на окремі ділянки, приводити їхній профіль до середніх ухилів. Профіль задається функцією шляху $z(s)$ з урахуванням усіх деталей, причому, чим більше деталей, тим точнішими будуть результати розрахунків. Переваги тут очевидні: замість розбивки шляху на ділянки з різними величинами ухилів,

розв'язання рівнянь для кожної виділеної ділянки та взаємного узгодження усіх результатів, виконується інтегрування одного рівняння уздовж усього шляху.

Шлях руху подаємо у вигляді таблиці значень функції $z(s)$ з постійним кроком $\Delta s = 5$ м згідно з рекомендаціями ДБН В.2.3–4 :2015 щодо оформлення профілю дороги з вказівкою його умовного рівня [80]. У подальшому для зменшення обсягу даних будемо брати більший крок Δs , або для уточнення, можливе його зменшення. Будем використовувати числові методи інтегрування рівнянь зі змінним кроком. Графік профілю шляху $z(s)$, вибраного для виконання розрахунків, наведено на рисунку 4.4, графік 1, $y(x)$, м.

Для виконання аналітичних розрахунків використано апроксимацію профілю поліномом 6-го степеню. На рисунку 4.4, 1 графік 1 відповідає табличним даним опису -шляху руху, поданим у метрах, з кроком $\lambda = 5$ м. Математична формула полінома подана у загальному вигляді формулою (4.21)

$$z(s) = a_6 s^6 + a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0. \quad (4.21)$$

Формула (4.22) одержана інструментом «лінія тренду» Excel містить значення коефіцієнтів апроксимації:

$$\begin{aligned} z(s) = \\ = -8 \cdot 10^2 s^6 + 4 \cdot 10^3 s^5 - 5 \cdot 10^3 s^4 + 2 \cdot 10^2 s^3 - 10^{-3} s^2 - 0,0678 s \\ + 3,335. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Графік 2 на рисунку 4.4, побудований згідно з формулою (4.22), наведеною програмою Excel, не відповідає графіку шляху (рис. 4.4, 1) побудованою цією ж програмою. Причина у тому, що коефіцієнти лінії тренду у формулі (4.22) виводяться в скороченому вигляді і мають тільки одну значущу цифру, а розрахунок графіка 3 (рис. 4.4, 3) виконується згідно з коефіцієнтами, що містяться в пам'яті комп'ютера. Після зміни масштабу табличних даних і подачею їх у кілометрах, одержана інша формула лінії тренду (4.23). Їй відповідає графік 4 (рис. 4.4, 4), який повністю відповідає побудованій цією ж програмою графік 3. Значення коефіцієнтів апроксимації у формулі (4.23) були використані під час аналітичних розрахунків.

$$\begin{aligned} z(s) = -77,052 s^6 + 366,74 s^5 - 534,75 s^4 + 163 s^3 + 140,86 s^2 - 67,839 s \\ + 3,335. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Причина невідповідності графіків 2 та 4 зрозуміла і пов'язана з поліномом, коефіцієнти високого степеню якого виводяться тільки з однією

значущою цифрою. Для розрахунку коефіцієнтів апроксимації можна також застосувати схему Горнера.

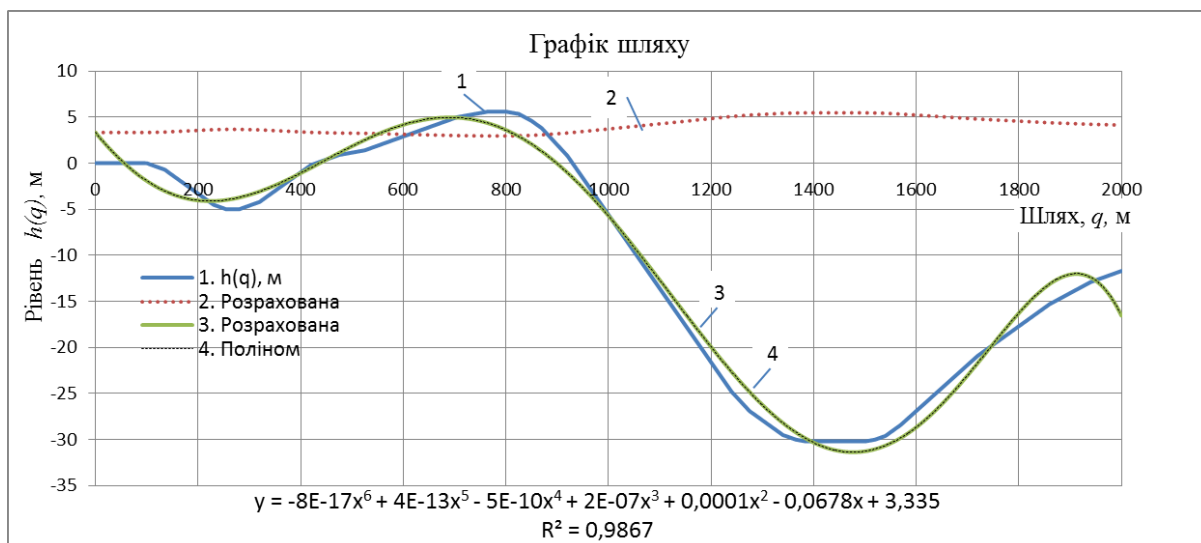


Рисунок 4.4 – Профіль вибраного шляху: 1 – графік побудований згідно з табличними даними; 2 – перший графік побудований згідно з поліномом (4.21) за програмою «лінія тренду» Excel; 3 – лінія тренду побудована програмою Excel, 4 – другий графік побудований згідно з уточненим поліномом (4.22)

Графік поліному, одержаного з використанням інструменту «Лінія тренду» електронної таблиці Excel. Він певною мірою відповідає профілю шляху $z(s)$. Значення коефіцієнта множинної регресії $R^2 = 0,9867$ доволі близьке до 1 і свідчить, що отримано майже максимально можливе наближення до дійсного значення. Відхилення оцінюється величиною 1,33 %. Одержаний поліном 6-го степеню, однак, не достатньо точно відображає дійсний профіль шляху, навіть при апроксимації стосовно невеликої ділянки протяжністю до 2 км. Побудова полінома невисокого степеню для великого числа точок методом найменших квадратів не забезпечує задовільну відповідність кривої заданим точкам. Для віддалей близько десяти кілометрів і більше використання поліномів високого степеню, чи дробово-раціональної функції для опису шляху, практично неможливе.

У практиці залізниці для опису профілю шляху використовують апроксимацію сплайнами, перевагами якої є простота реалізації на ЕОМ та висока точність апроксимації функцій, що описує профіль та одночасно її похідних. Але вона потребує наявності відповідного програмного забезпечення. Метою цієї роботи є розгляд альтернативного чинний ТЕТ методу розрахунків, тому обмежимося найбільш простими методами. У цій роботі тягові розрахунки використано аналітичними методами шляхом представлення шляху

поліномом, а числовими з використанням найпростіших формул та методів Рунге – Кутта IV порядку для інтегрування рівнянь розрахунку.

4.5 Швидкість вільного руху ТЗ. Кінематика

Продовження вивчення кінематики здійснено за відсутності дії зовнішніх сил тяги, гальмування й опору, але за наявності поля земного тяжіння.

Оскільки рівняння руху є рівнянням другого порядку, то для його розв'язання потрібно дві початкові умови: початкове положення та швидкість. На вибраній вище ділянці шляху проведено розрахунки швидкості руху ТЗ для декількох значень початкової швидкості $\dot{s}_0$.

Для інтегрування рівняння руху (4.18) надаємо його вигляд:

$$\ddot{s} = -\frac{g}{1+\gamma} \frac{dz(s)}{ds}. \quad (4.24)$$

У (4.24) порівняно з (4.18) часткова похідна від $z(s)$ замінена знаком диференціала тому, що рівень шляху (положення центру мас ТЗ) залежить тільки від однієї координати s – шляху руху.

Наступне. Оскільки:

$$\ddot{s} = \frac{d\dot{s}}{dt} = \frac{ds}{dt} \frac{d\dot{s}}{ds}, \quad (4.25)$$

то рівняння руху (4.24) має вигляд:

$$\frac{d\dot{s}}{ds} = -\frac{g}{\dot{s} \cdot (1+\gamma)} \frac{dz(s)}{ds}. \quad (4.26)$$

Інтегрування (4.26) виконаємо числовим методом. Використаємо найпростішу формулу:

$$\dot{s}_{i+1} = -\frac{g}{\dot{s}_i(1+\gamma)} \frac{z(s_{i+1}) - z(s_i)}{s_{i+1} - s_i}. \quad (4.27)$$

Оскільки у знаменнику (4.27) стоїть значення початкової швидкості, то нульові початкові умови до цього рівняння використати не можна, рівняння має особливу точку $\dot{s} = 0$. Тому задаємо відмінну від нуля початкову швидкість i , у разі зменшення швидкості до малих значень, нульову точку потрібно обходити.

Інтегрування рівняння руху, на заданому шляху (рис. 4.4), виконано із використанням електронної таблиці Excel. У першій колонці таблиці вказано

шлях. Крок значень змінний: у місцях, де профіль не змінюється або змінюється монотонно, віддаль між точками шляху вибирали більшою, а в місцях зміни профілю цю віддаль зменшували. На рисунку 4.5 наведено графік зміни швидкості на вибраній ділянці шляху при значеннях початкової швидкості 0, 1, 10, 20, 30 та 40 м/с. Початкова ділянка горизонтальна і при нульовій початковій швидкості $\dot{s}_0 = 0$ ТЗ не рухається.

При початковій швидкості $V_0 = \dot{s}_0 = 1$ м/с ТЗ рухається рівномірно по горизонтальній ділянці, проїжджаючи невеликий спуск, набуває швидкості та далі зупиняється. У продовженні побудовано графік швидкості руху ТЗ на затяжному спуску й далі, на підйомі.

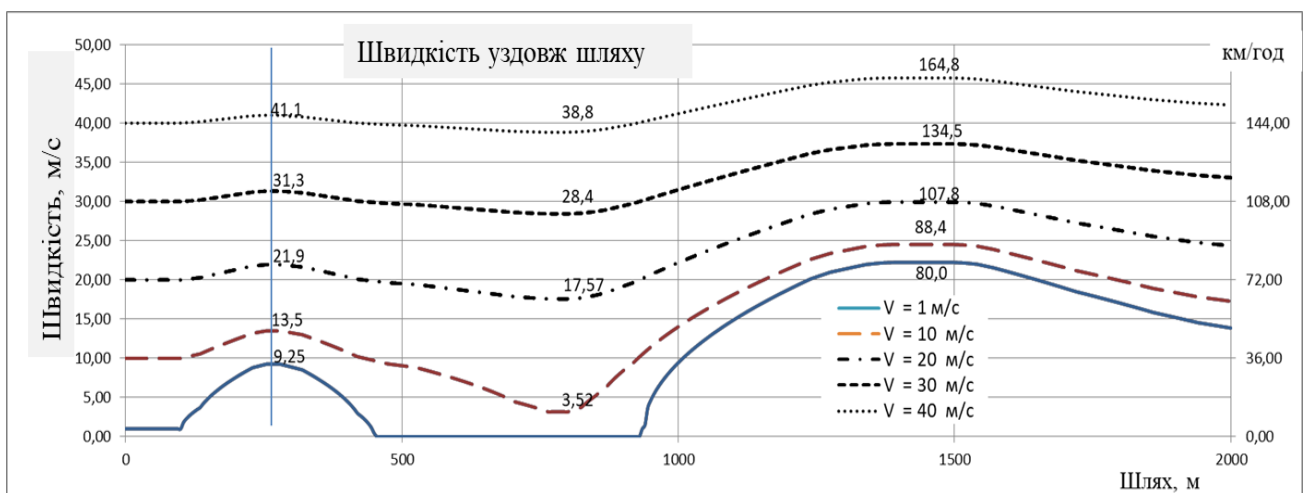


Рисунок 4.5 – Графік зміни швидкості ТЗ уздовж шляху за різних значень початкової швидкості

За початкової швидкості $V_0 = 10$ м/с (36 км/год) ТЗ на невеликому спуску прискорюється до 13,5 м/с (48,6 км/год) долає підйом, зменшивши швидкість до 3,16 м/с (12,6 км/год) і далі на затяжному спуску довжиною 700 м з ухилом на деяких ділянках до 80 ‰ рухається прискорено, досягаючи швидкості 24,51 м/с (88,4 км/год).

За початкової швидкості 40 м/с характер руху такий самий тільки величини зміни швидкості менші. Значення швидкості ТЗ на пагорбах і в долинах наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Швидкість вільного руху ТЗ при доланні нерівностей шляху
(на пагорбах і долинах профілю)

V_0 , м/с	V_0 , км/год	Швидкість руху, км/год					
		V_1	V_2	V_3	ΔV_1	ΔV_2	ΔV_3
40	144	147,9	139,7	164,8	3,96	-4,32	20,8
30	108	112,6	102,2	134,5	4,68	-5,76	26,5
20	72	78,8	63,7	107,8	6,84	-8,28	35,8
10	36	48,6	12,6	88,4	12,6	-23,4	52,4
1	3,6	33,3	0	80	29,7		76,4

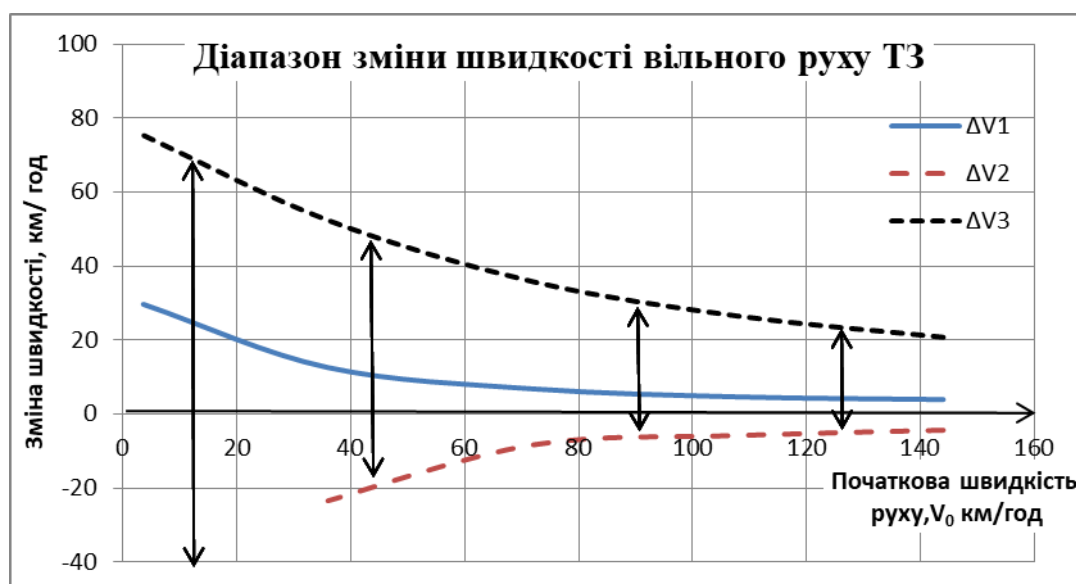


Рисунок 4.6 – Звуження діапазону швидкостей вільного руху при доланні нерівностей шляху

Діапазон зміни швидкостей вільного руху за різного значення початкової швидкості показано на рисунку 4.6. Аналіз даних, наведених у таблиці 4.1 показує, що характер руху ТЗ залежить від початкової швидкості. У разі збільшення початкової швидкості рух стабілізується та вздовж шляху швидкість змінюється меншою мірою. Коли перед долиною швидкість $V_0 = 3,6$ км/с, то при її проїзді вона збільшується на $V_3 - V_0 = 76,4$ км/год, коли $V_0 = 72$ км/с, то зміна становить всього $V_3 - V_0 = 37,2$ км/год. Оскільки зміна швидкості суттєво впливає на навантаження, яке зазнають ТЗ та їхні окремі

вузли, то такий характер зміни швидкості потрібно враховувати, особливо при використанні нешвидкісних ТЗ, зокрема трамвай, тролейбус, велосипед, скутер, гіроскутер, сегвей, дрезина на залізній дорозі та ін.

Аналіз кінематики ТЗ показує можливі режими руху, а саме відсутність руху за нульової початкової швидкості на рівній ділянці шляху, рівномірний рух на рівній ділянці, сповільнений на підйомах і прискорений на спусках. До того ж на затяжних спусках ТЗ може набувати достатньо великої швидкості. Ці якісні характеристики стосуються руху будь-якого ТЗ і не залежать від його маси.

Одержані результати показують, що швидкість ТЗ при вільному русі залежить від його коефіцієнта інерції, як це видно з рівняння (4.16). Графіки швидкості за різних значень коефіцієнта інерції показано на рисунку 4.7.

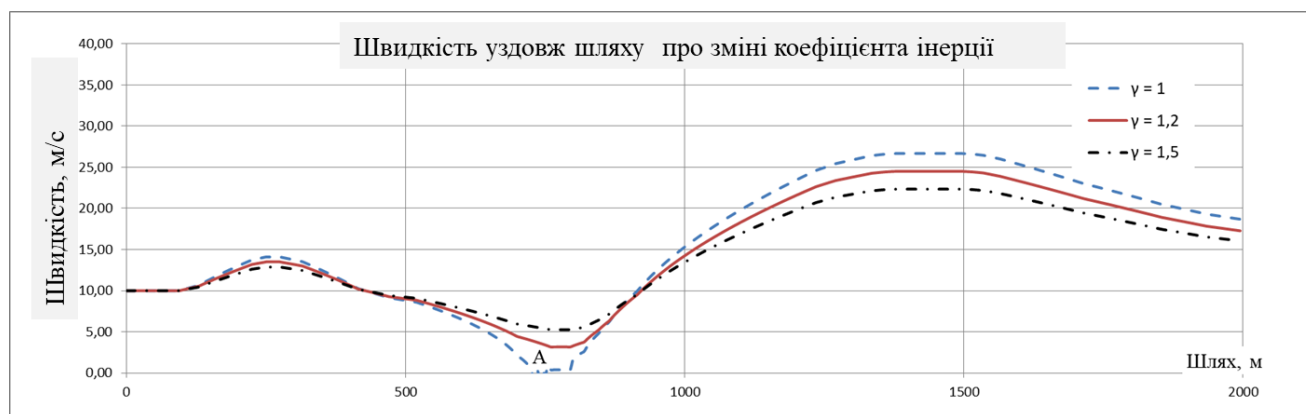


Рисунок 4.7 – Графіки зміни швидкості вільного руху вздовж шляху за різних значень коефіцієнта інерції ТЗ (1 – $\gamma = 1$; 2 – $\gamma = 1,2$; 3 – $\gamma = 1,5$).

Як видно з наведених на рисунку результатів, у разі збільшення коефіцієнта інерції змінюється характер руху ТЗ. Швидкість ТЗ упродовж маршруту стає стабільнішою. Під час проїзду долини віг розганяється більш повільно, а при проїзді пагорба повільніше наростає. На рисунку 4.7, показано, що в разі зменшення коефіцієнта інерції до $\gamma = 1$, ТЗ на пагорбі зупинився (порівняти з рис. 4.5). Зміна маси ТЗ, в разі незмінного коефіцієнта інерції на характер руху не впливає. З цього випливає, що розглядаючи рух ТЗ не можна ефективно масу повністю ототожнювати із його дійсною масою.

4.6 Врахування зміни ваги під час руху транспортного засобу на опуклих та увігнутих ділянках шляху

Проїжджаючи опуклі та увігнуті ділянки, ТЗ одержує доцентрове чи відцентрове прискорення і згідно з (3.4) змінюється його вага, тобто сила тиску

на опору, якою виступає полотно залізничної колії чи шосейної дороги (див. рис. 4.1). Доцентрове прискорення, яке діє з боку шляху і змушує ТЗ рухатись по дугі зміни профілю, визначається згідно з формулою:

$$a = \frac{\dot{s}^2}{R}, \quad (4.28)$$

де R – радіус кривизни профілю.

Відповідно з боку ТЗ виникає сила протидії, яка спрямована на увігнутих ділянках у бік полотна дороги, вниз, а на опуклих ділянках у протилежний бік. У результаті його вага збільшується чи зменшується. Відповідно до (3.4) під час проїзду екстремальної точки профілю вага ТЗ дорівнює:

$$G = m \left(g \pm \frac{\dot{s}^2}{R} \right). \quad (4.29)$$

Тут знак «+» відповідає увігнутій ділянці шляху, а «-» опуклій.

У подальшому поряд із радіусом будемо використовувати кривизну шляху, яка дорівнює:

$$K = \frac{1}{R}. \quad (4.30)$$

Кривизну профілю шляху – K у кожній його точці можна розрахувати залежно від форми представлення шляху. У разі завдання шляху аналітичною функцією, наприклад функцією інтерполяції профілю $z(s)$, кривизна визначається згідно з формулою:

$$K = \frac{\ddot{z}(s)|_{s=s_i}}{\sqrt{(1 + \dot{z}(s)^2|_{s=s_i})^3}}. \quad (4.31)$$

Якщо профіль шляху задано числовими значеннями s_i із кроком λ , то розрахунок можна виконати згідно з формулою:

$$K = \frac{\frac{z(s_{i+1}) - 2z(s_i) + z(s_{i-1}))}{\lambda^2}}{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{z(s_{i+1}) - z(s_i)}{\lambda}\right)^2\right)^3}}. \quad (4.32)$$

Якщо крива задана параметрично в декартових координатах:

$$\begin{cases} z = z(s) \\ x = x(s) \end{cases}, \quad (4.33)$$

то кривизна визначається згідно з формулою:

$$K = \frac{|\dot{z}(s)\ddot{x}(s) - \dot{x}(s)\ddot{z}(s)|}{\sqrt{(\dot{z}(s)^2 - \dot{x}(s)^2)^3}}. \quad (4.34)$$

Формула (4.34) далі буде використана під час розрахунку кривизни просторової лінії в моделі, де крім зміни профілю шляху, враховується зміна радіуса шляху в плані.

Оскільки профіль шляху представлено двома способами: дискретними значеннями в окремих точках $z(s_i)$ і у вигляді аналітичної функції інтерполяції, поліному $z(s)$, то для розрахунку використано формулу (4.32) і розрахунок виконано згідно з поліномом інтерполяції (4.23). Дискретні значення профілю для цього розрахунку малопридатні, можуть давати велику похибку. Це зумовлено тим, що згідно з правилами проектування автомобільних доріг та залізниць, висотні відмітки профілю (координата s_i), проставляють на певній віддалі одна від одної, зазвичай до 100 м, додаючи плюсові точки в місцях зміни крутості схилу. У такий спосіб шлях представляється кусково-лінійними ділянками [80–83]. За такого представлення шляху похідні у точках зміни ухилу профілю невизначені й числові розрахунки дають суттєві похибки. Для виконання розрахунків діючих сил, і відповідно до ваги ТЗ, необхідно виконати інтерполяцію профілю принаймні поліномами 3-го степеню.

Для розрахунків зміни ваги ТЗ на поданому на рисунку 4.4 шляху використано формулу інтерполяції у вигляді поліному 6-го степеню (4.23). Профіль шляху показано графіком 3 на рисунку 4.4.

Для розрахунку радіуса кривизни визначено координати точок екстремуму профілю $z(s)$. Вони відповідають нульовим значенням похідної полінома, тобто умові:

$$z(s) = 0. \quad (4.35)$$

Похідна відповідно до умови (4.33) задовольняє рівнянню:

$$\begin{aligned} -6,70 \cdot 10^{-17} s^5 + 5,367 \cdot 10^{-13} s^4 - 4,534 \cdot 10^{-10} s^3 + 3,163 \cdot 10^{-7} s^2 \\ + 2,141 \cdot 10^{-4} s - 0,067839 = 0 \end{aligned}$$

Його розв'язками є такі:

$$s_1 = 205 \text{ м} \quad \min$$

$$s_2 = 690 \text{ м} \quad \max$$

$$s_3 = 1\,476 \text{ м} \quad \min$$

$$s_4 = 1\,913 \text{ м} \quad \max$$

Останній 4-й розв'язок знаходиться близько до границі визначення апроксимаційного поліному і не відображає зміну профілю шляху. Його не враховано. Координати і відповідні швидкості руху наведено в таблиці 4.2.

Значення кривизни профілю в точках екстремуму використано (4.32). Враховуючи умову (4.33) $\dot{z}(s)|_{s=s_i} = 0$, формула (4.29) спрощується:

$$K = z''(s)|_{s=s_s} . \quad (4.36)$$

Розраховані відповідно (4.36) значення ваги ТЗ масою 10 т наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунків ваги ТЗ масою 10 т на опуклих та увігнутих ділянках шляху

Віддаль, м	Швидкість, м/с		Друга похідна	Кривизна	Радіус дуги	Приско- рення	Вага ТЗ, кН	
s	$\dot{s}_{10}$	$\dot{s}_{40}$	$\ddot{z}(s)$	K	R	$\ddot{s} \text{ м/с}^2$	G_{10}	G_{40}
205	13,5	41,1	0,000 259	0,000 259	3 861	0,44	98,8	102,6
690	3,52	38,8	-0,000 21	-0,000 21	-4, 694	-0,32	98,16	94,99
1 476	24,56	45,8	0,000 36	0,000 36	2 780	0,755	100,4	105,6

У таблиці 4.2 вказано рух на вибраному шляху й відповідна зміна ваги за двох початкових швидкостей 10 і 40 м/с. З результатів розрахунків видно, що вага ТЗ під час руху вздовж шляху змінюється на величину до 8 % початкової ваги за швидкості до 150 км/год. На увігнутих ділянках шляху вона збільшується, на опуклих – зменшується. Значення ваги залежить від швидкості ТЗ на певній ділянці та радіусу кривизни профілю ділянки.

Для детальнішого аналізу зміни ваги ТЗ під час руху вздовж шляху різного профілю виконано розрахунки для автомобільних доріг із допустимими, відповідно до норм проєктування [80], радіусами кривизни профілю. Результати розрахунків ваги ТЗ масою 10 т (вага в стані спокою 98,1 кН) наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Вага ТЗ масою 10 т під час руху по дорогах з допустимими згідно з нормативами [80] значеннями параметрів повздовжнього профілю

Швидкість руху		Радіус дуги профілю, R		Вага, на дугах профілю, G		Повздовжній ухил, проміле	Вага вільного руху на
		Опуклої	Увігнутої	Опуклої	Увігнутої		спусках підйомах
км/год	м/с	м	м	кН	кН	‰	кН
200	55,56	15 000	4 400	96,14	105,2	40	94,3
130	36,10	15 000	4 400	97,3	101,2	40	94,3
120	33,33	12 000	3 700	97,3	101,2	45	93,8
110	30,56	11 000	3 200	97,4	101,1	50	93,3
100	27,78	10 000	2 600	97,4	101,2	55	92,8
90	25,00	9 000	2 100	97,5	101,2	60	92,3
80	22,22	8 500	1 700	97,6	101,1	65	91,8
70	19,44	5 500	1 300	97,5	101,1	70	91,3
60	16,67	3 500	1 000	97,4	101,0	75	90,8
50	13,89	2 000	700	97,2	101,0	80	90,3
40	11,11	1 000	500	97,0	100,7	90	89,4
30	8,33	500	300	96,8	100,5	100	88,5

У таблиці 4.4 шрифтом виділені допустимі згідно з ДБН В.2.3-4:2015 [80] параметри доріг: розрахункові швидкості руху (1), мінімальні радіуси – R дуг профілю опуклої (2) та увігнутої (3) ділянок шляху, допустимі максимальні поздовжні ухили профілю (4). В інших колонках таблиці – розраховані значення ваги ТЗ масою 10 т під час руху на перегінах профілю (5, 6) та вільного руху на ухилах дороги (8). Розрахунки виконано при значеннях швидкості в м/с, які вказано в колонці 2.

Як видно з результатів розрахунків, вага ТЗ при русі з розрахунковими швидкостями по шляху та допустимими параметрами, відповідно до будівельних норм, збільшується на глибині від 98,2 кН до 101,2 кН, що становить 3 %, а на пагорбі зменшується до 96,8 кН – на 1,4 %, тобто збільшення не суттєві. У будівельних нормах відсутні вимоги до доріг при розрахункових швидкостях 200 км і більше, на такі швидкості розраховані сучасні автомобілі. Розрахунок ваги ТЗ під час руху зі швидкістю 200 км/год.

По дорозі, яка згідно з ДБН розрахована на швидкість 130 км/год, наведені в першому рядку таблиці і виділені курсивом. Значення ваги при проїзді у впадині 105,2 кН, що на 7 % більше від ваги в спокої. Таке перевантаження вже відчутне водію та пасажиром, проте не критичне. Наприклад, навіть для лікарняних ліфтів допускається прискорення (уповільнення) 1 м/с^2 , що відповідає збільшенню ваги на 10 %. [84]. Під час перевезення пасажирів ТЗ виникають перевантаження до 2 м/с^2 до 2 м/с^2 .

На ухилах доріг, під час вільного руху, тиск на дорогу, тобто вага ТЗ, також змінюється у результаті того, що при вільному русі ТЗ рухається з прискоренням, направленим уздовж вектора земного тяжіння. Величина зміни ваги визначається ухилом дороги і наведена в колонці «Вага вільного руху на спусках та підйомах».

У будівельних нормах також наведені допустимі радіуси доріг у плані відповідно до швидкості руху ТЗ. Розглядаючи кінематику ТЗ, потрібно враховувати і вплив руху по кривих на зміну ваги ТЗ. Рух по кривих зумовлений прискоренням, спрямованим до центра миттєвого обертання. Це прискорення викликає сила реакції шляху на повороті. Зі свого боку, реакція ТЗ зумовлює відцентрову силу, яка діє на шлях і направлена від центра миттєвого обертання. У ТЗ під час побудови шляху заборонено суміщати криві в плані з нерівностями профілю. Через це сила реакції ТЗ направлена по горизонталі (за винятком серпантину доріг у гористій місцевості) [80]. Напрямок відцентрової сили перпендикулярний силі земного тяжіння. Тому вага ТЗ під час проїзду кривих вага направлена під кутом до вертикалі. Визначити її величину можна згідно з формулою:

$$G = m \sqrt{g^2 \pm \left(\frac{\dot{s}^2}{R} \right)^2}, \quad (4.37)$$

а кут нахилу:

$$\gamma = \arctg \frac{\frac{\dot{s}^2}{R}}{g}. \quad (4.38)$$

Розраховані значення ваги ТЗ масою 10 т під час руху ділянках шляху різної кривизни наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Вага ТЗ масою 10 т при допустимих нормативних значеннях радіуса доріг в плану [80]

Швидкість,		Радіус дуги										
		1 000	800	700	600	450	300	250	150	100	65	30
км/год	м/с	Вага, кН										
130	36,1	9,91	9,95	10,0	10,1	10,24	10,7	11,4	13,1	16,3	22,3	44,6
120	33,3	9,88	9,92	9,95	9,99	10,13	10,5	11,0	12,3	14,8	19,7	38,3
110	30,6	9,86	9,89	9,91	9,94	10,04	10,3	10,7	11,6	13,6	17,4	32,6
100	27,8	9,85	9,87	9,88	9,90	9,97	10,2	10,4	11,1	12,5	15,4	27,5
90	25,0	9,84	9,85	9,86	9,88	9,92	10,0	10,2	10,7	11,6	13,7	23,0
80	22,2	9,83	9,84	9,85	9,85	9,88	9,96	10,1	10,4	11,0	12,4	19,2
70	19,4	9,83	9,83	9,83	9,84	9,86	9,90	9,96	10,1	10,5	11,4	16,0
60	16,6	9,82	9,83	9,83	9,83	9,84	9,86	9,90	9,99	10,2	10,7	13,5
50	13,9	9,82	9,82	9,82	9,83	9,83	9,84	9,86	9,90	10,0	10,3	11,7
40	11,1	9,82	9,82	9,82	9,82	9,82	9,83	9,84	9,85	9,90	10,0	10,7
30	8,33	9,82	9,82	9,82	9,82	9,82	9,82	9,82	9,83	9,84	9,88	10,1

У таблиці 4.4 за горизонталлю вказано мінімальні радіуси дуги в плані автомобільної дороги, а за вертикаллю розрахункові швидкості руху. Режимам руху, які відповідають розрахунковим згідно з ДБН значенням, розміщені в головній діагоналі таблиці. Значення нижче головної діагоналі – це режими руху, які не перевищують розрахункових. Значення вище діагоналі – це режими руху зі швидкостями, більшими від розрахункових.

Як видно з таблиці 4.4, під час руху з розрахунковими швидкостями збільшення ваги не перевищує 100,9 кН проти 98,2 кН, тобто вага збільшується на 2,8 %. При цьому напрямок дії сили ваги становить 13,3 градуси від вертикалі.

Якщо швидкість ТЗ перевищує розрахункову, то вага збільшується суттєвіше й під час руху по дорогах із радіусом дуги 100 м і менше вага може в декілька разів перевищувати її значення в стані спокою.

Вага ТЗ визначає зусилля, з яким ТЗ діє на шлях і, відповідно, величину сил, які діють на ТЗ із боку шляху. Ці сили дозволять розрахувати механічні навантаження на ТЗ і на пасажирів, а також розрахувати сили зчеплення ТЗ зі шляхом, наприклад, локомотива поїзда зі шляхом або зчіпну вагу поїзда.

У практиці розрахунків кривизни профілю розглядають локальні ділянки шляху, профіль яких описують інтерполяційними поліномами 3-го степеня. Приклад результатів таких обчислень показано на рисунку 4.8.

Профіль шляху описано дискретними значеннями рівня пікетів шляху. Розглядується локальна ділянка профілю з впадиною, наприклад 1 рисунок 4.1. Профіль інтерполюють лінією тренду – інтерполяційним поліномом третього степеня. Рівняння поліному:

$$z(s) = -1,0051 \cdot 10^{-6}s^3 + 1,1598 \cdot 10^{-3}s^2 - 0,40333s + 39,139.$$

На рисунку 4.8 додатково побудовано графік відповідно до поліному інтерполяції 5. Він повністю співпадає із лінією тренду. Його перша похідна:

$$\dot{z}(s) = -3,0153 \cdot 10^{-6}s^2 + 2,3296 \cdot 10^{-3}s - 0,40333.$$

Нульове значення похідної (рис 4.8, 3) відповідає точці мінімуму профілю (самій нижній точці впадини). Друга похідна:

$$Z(s) = -6 \cdot 3,03061E-6s + 2,3296 \cdot 10^{-3}$$

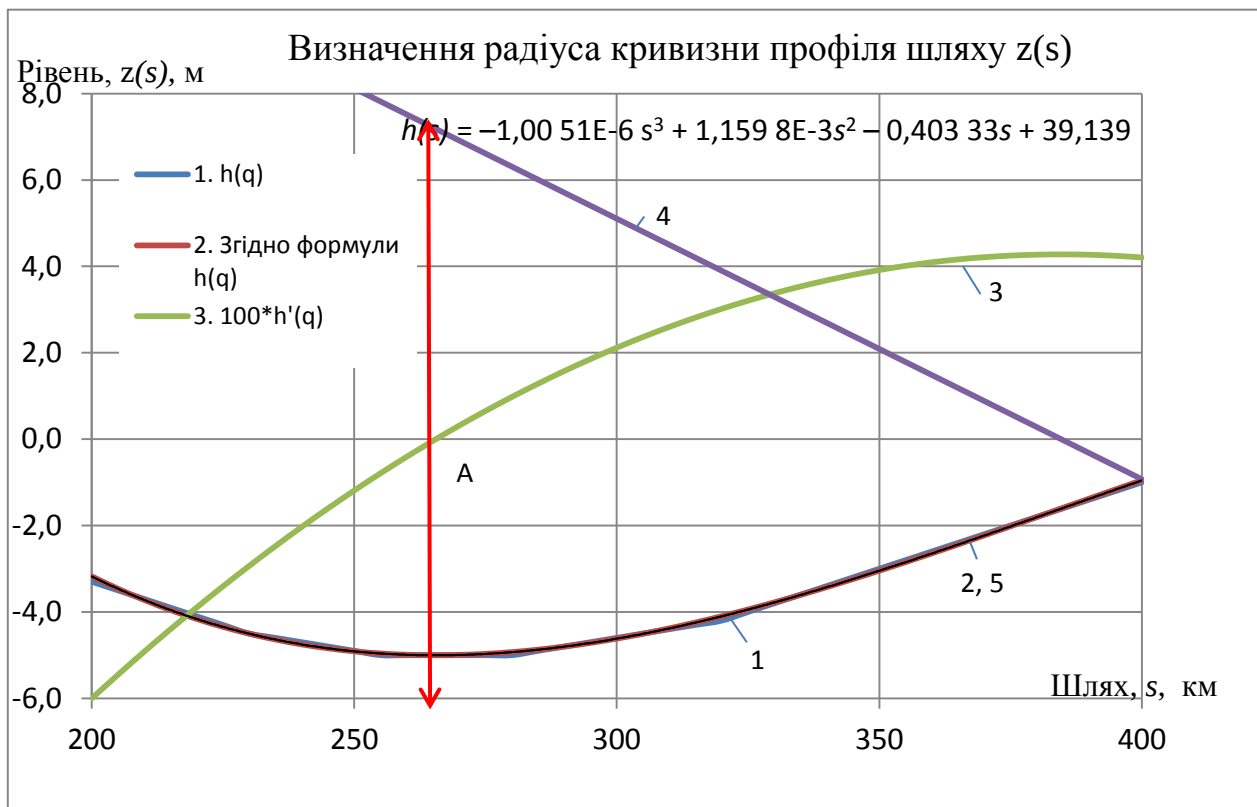


Рисунок 4.8 – Розрахунок кривизни профілю шляху на локальному відрізку

Значення другої похідної (рис 4.8, 4) у точці графіка, яка відповідає координаті шляху нижньої точки впадини $s = 1$, є величиною кривизни шляху

$$K = 2,3196 \cdot 10^{-3} = 0,00232,$$

кривизна шляху відповідно (4.32):

$$R = \frac{1}{0,002\,3196} = 461 \text{ м.}$$

Отже, кривизна шляху в долині 461 м.

4.7 Вплив дефектів дороги на рух транспортних засобів

Крім аналізу руху ТЗ на опуклих та увігнутих ділянках потрібно також врахувати рух на ділянках із дефектами у вигляді невеликих пагорбів, вибоїн, сторонніх предметів. Наприклад, розглянемо рух ТЗ через перешкоду у вигляді пагорба висотою $h = 0,1$ м шириною $l = 1$ м. Під час проїзду зі швидкістю 36 км/год о передня частина ТЗ втрачає вагу. ТЗ відривається від поверхні дороги та деякий проміжок часу рухається по параболі й падає на дорогу (рис. 4.9). На дорозі він зазнає ударні навантаження. Оскільки розмір ТЗ зазвичай більший від шляху руху, яку проходить колесо під час підстрибування, то передні та задні колеса послідовно здійснюють такий рух. Пояснити процеси, які виникають при цьому, можна скориставшись теорією удару, наприклад [85]. У результаті удару, залежно від властивостей дороги та коліс, можуть відбуватись відскоки та в результаті послідовних відскоків виникає трясіння ТЗ. Під час трясіння передній та задній мости зазнають періодичних ударів, а весь ТЗ коливається відносно горизонтальної осі, перпендикулярної до дороги.

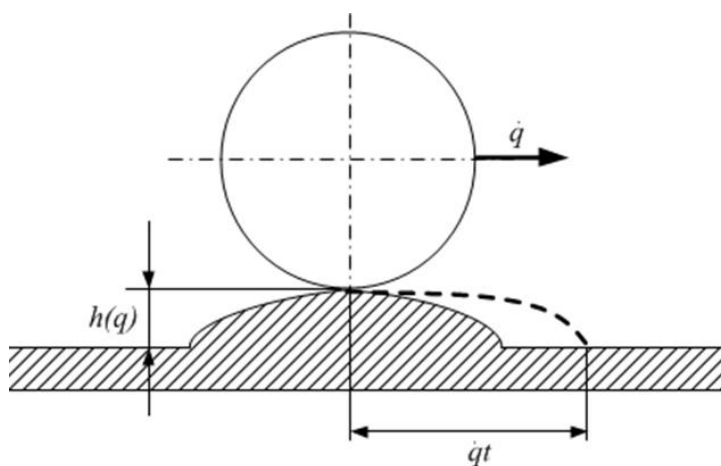


Рисунок 4.9 – Рух ТЗ по шляху з нерівностями, ударні навантаження

Після відриву від поверхні шляху рух ТЗ чи його передній міст здійснює вільне падіння. Положення, відраховуючи від найвищої точки, змінюється з часом:

$$h(t) = \frac{gt^2}{2} \quad (4.39)$$

Крім того, ТЗ продовжує рухатись за інерцією вздовж дороги зі швидкістю $\dot{s}(t)$. Так рух відбувається по параболі, рівняння якої задане параметрично:

$$\begin{cases} h(t) = \frac{gt^2}{2} \\ s(t) = \dot{s}t \end{cases} \quad (4.40)$$

де $\dot{s}$ – швидкість, з якою ТЗ наїжджає на опору, t – час, від моменту відриву ТЗ до контакту з поверхнею шляху. Максимальне значення $h(t)$ дорівнює висоті перешкоди $h(s)$.

Розраховане значення часу падіння залежить від висоти перешкоди

$$t = \sqrt{\frac{2h(t)}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,1}{9,81}} = 0,143 \text{ с.}$$

Пройдена віддаль від уздовж шляху:

$$g(t) = gt = 9,81 \cdot t = 1,41 \text{ .}$$

Траєкторії руху подано на рисунку 4.10

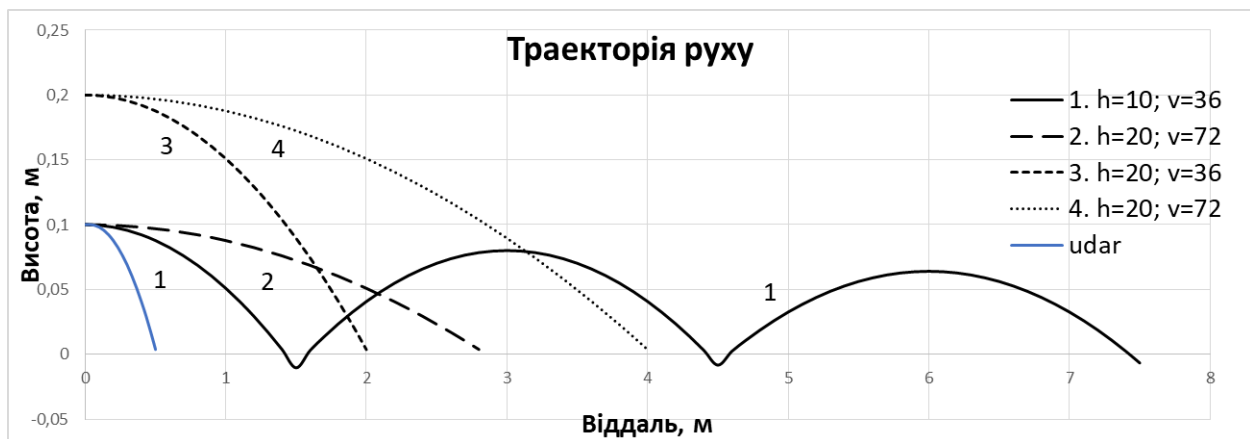


Рисунок 4.10 – Траєкторія руху ТЗ під час долаття дефектів шляху

На рисунку 10 приведено: 1 – графік руху за швидкості 36 км/год і висоти перешкоди 10 см із послідовним продовженням, багаторазовими відскоками від

абсолютно твердого шляху з коефіцієнтом відновлення 0,8; 2 – рух через ту саму перешкоду за швидкості 72 км/год (відскоки не показано); 3, 4 – рух за висоти перешкоди 20 см та початкових швидкостях 72 і 36 км/год.

Як видно з наведеного графіка (рис. 4.10, 1 за висоти перешкоди 10 см і швидкості руху 10 м/с (36 км/год), точка контактування ТЗ (одного з його мостів) розміщена на віддалі 1,5 м від точки відриву. За інших швидкостей руху та висоти перешкоди точка контакту зміщується, у нашому випадку збільшується (рис. 4.10, графіки 2, 3, 4). Характер продовження рух залежить від матеріалу шляху та колеса ТЗ.

Як видно з рисунка 4.10, під час долаття перешкод із розглянутими швидкостями, характерними для міського транспорту, і перешкодою висотою 10 см та протяжністю 1 м викликає відрив ТЗ чи його переднього моста від дорожнього полотна з подальшим ударом по поверхні дороги. Продовження руху залежить від характеристик ТЗ, його коліс. Для аналізу подальшого руху потрібно скористатись розглядом теорії удару [85]. Гіпотезу абсолютно жорстких тіл і в'язів, як прийнято при розгляді кінематики руху, у цьому випадку потрібно відкинути, оскільки вона не пояснює процесів удару.

Під час удару по нерухомій поверхні дороги розглядають прямий і косий удар, який характеризується кутами і відбиваннями. Реакція шляху як опори має два складника – нормальний й дотичний. Дотичний становить силу тертя. У багатьох випадках силу тертя не враховують. У нашому випадку тим більше її можна не враховувати, оскільки колеса продовжують обертатись і при дотику зі шляхом котитись. Тому єдиною ударною силою є нормальна реакція поверхні шляху, а саме ударний імпульс $\vec{S}$. Це векторна величина, яка дорівнює зміні кількості руху.

$$\vec{S} = m\dot{h}_1 - m\dot{h}_2, \quad (4.41)$$

де $\dot{h}_1$ та $\dot{h}_2$ – складники швидкості падіння та відбивання по вертикалі.

Величина швидкості відбивання залежить від властивостей дороги та ТЗ і визначається коефіцієнтом відновлення – k . На шосейній дорозі з асфальтовим покриттям цей коефіцієнт близький до нуля та практично швидкість відбивання дорівнює нулю $\dot{h}_2 = 0$. На іншій дорозі може приймати різні значення в діапазоні $k = 0 - 1$. Отже, рівняння визначення ударного імпульсу (4.34) набере вигляду:

$$\vec{S} = m\dot{h}_1(1 + k). \quad (4.42)$$

Тут знак плюс тому, що швидкості падіння та відбивання направлені по вертикалі в протилежних напрямках.

Значення ударного імпульсу під час долаття перешкоди не залежить від швидкості руху, а залежить тільки від розміру й форми перешкоди. При одній формі перешкоди він може виникати, а при іншій ні. Це також стосується і швидкості руху. На рисунку 4.10 показано, що ударний імпульс виникає тоді, коли розмір перешкоди менший від величини st , тобто добутку швидкості руху на час вільного падіння з висоти перешкоди.

Значення ударного імпульсу за висоти перешкоди h дорівнює:

$$\vec{S} = (1 + k)m\sqrt{2gh}. \quad (4.43)$$

За висоти перешкоди 100 мм, коефіцієнта відновлення $k = 0,8$ Для транспортного засобу масою 17 т дорівнює:

$$\vec{S} = (1 + k)m\sqrt{2gh} = (1 + 0,8) \frac{17}{2} \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,1} = 21,42 \text{ Вт.}$$

Це значний ударний імпульс. Характер руху за таких параметрів ТЗ і шляху подано графіком (рис. 4.10, 1). Транспортний засіб після долаття перешкоди зазнає періодичних ударів при продовженні із поступово затухаючим ударним імпульсом.

Транспортні засоби не є точковими об'єктами й мають принаймні дві осі, тому під час їзди по нерівній дорозі повного відриву від шляху не відбувається. Віддаль, яку проходять колісні пари під час переїзду перешкод, менша віддалі між колісними парами. Тому спочатку відриваються від опори передні колісні пари, а потім задні. Важливо відмітити, що відрив від опори відбувається для будь-якого ТЗ незалежно від його маси, а залежить тільки від швидкості руху розмірів перешкоди. Удари, які зазнає передня пара коліс, повторюються на задній міст транспортного засобу. ТЗ починає коливатись відносно поперечної осі. Жорсткі удари викликають неприємні відчуття тряски в пасажирів ТЗ, негативно впливають на його технічний стан. Оскільки такий рух ТЗ є неприйнятним, то для запобігання ударів у конструкцію ТЗ потрібно включити пружні елементи і демпфери, які зменшують ударні імпульси та спричиняють затухання коливань.

Із врахуванням наявності пристроїв демпфірування спрощений розгляд кінематики, наведений у цьому розділі, варто змінити. Зміна полягає у використанні більш складнішої моделі ТЗ, яка охоплює конструкцію ТЗ із амортизаторами та демпферами, враховує жорсткості елементів ТЗ та шляху.

Розглянувши кінематику ТЗ, тобто його рух у полі тяжіння Землі, тобто можливі режими без врахування зовнішніх сил, ми отримали характеристики руху ТЗ. Аналіз показав, що за умов відсутності зовнішніх сил ТЗ може виконувати різні типи руху залежно від особливостей його конструкції, характеристик шляху та початкового стану.

Під час відриву ТЗ від опори й падіння відбувається удар. Згідно з кінематичною схемою всі в'язі в ТЗ прийняті абсолютно жорсткими, тому в результаті удару ходова частина ТЗ може зазнати пошкодження.

Згідно з прийнятою концептуальною моделлю кінематика руху розглядалась із припущенням абсолютно жорстких в'язів у вузлах ТЗ і між ТЗ і шляхом. Щоб не допустити жорсткої тряски та запобігти поломкам ТЗ, необхідно виконати амортизацію ходової частини та її демпфірування. Кінематика ТЗ з пристроями демпфірування та відповідні кінематичні схеми ТЗ є предметом іншої роботи.

Висновки до розділу

Прийнята модель ТЗ як матеріального тіла із взаємодіючими частинами та відповідний їй математичний апарат надають можливість з однієї загальної точки зору вивчити широке коло завдань конструювання та експлуатації транспортних засобів.

Відповідно до моделі ТЗ, як матеріального тіла, розглянута детальна кінематична схема ТЗ. Ця модель забезпечує поглиблене вивчення роботи трансмісії ТЗ за різних умов експлуатації.

Уточнено порядок розрахунку ефективної маси та коефіцієнта інерції ТЗ. У підручниках електричної тяги відсутнє чітке визначення, кінетичну енергію обертального руху якого обладнання ТЗ потрібно враховувати під час визначення ефективної маси. Доведено, що потрібно враховувати кінетичну енергію обертального руху тільки частин, які енергетично пов'язані з роботою двигуна та трансмісії ТЗ. Кінетична енергія обертального руху частин додаткового обладнання, яке живиться від сторонніх джерел енергії, не впливає на величину ефективної маси.

Продемонстровано, що величина коефіцієнта інерції впливає на характер руху ТЗ в інший спосіб, ніж зміна його маси. Отже, вивчаючи рух ТЗ, не варто ототожнювати масу ТЗ і його ефективну масу.

Одержано рівняння руху ТЗ на основі рівнянь Лагранжа II роду, що суттєво спрощує тягові розрахунки: не потребує розбиття шляху на розрахункові ділянки, виконання спрощення профілю шляху; інтегрування ланцюжка рівнянь та узгодження результатів інтегрування кожної пари рівнянь.

Одержане рівняння враховує профіль шляху з усіма його особливостями, зокрема із перехідними дугами з'єднання ділянок різних ухилів.

Рівняння одержується в основних одиницях системи СІ і допускає числове одноразове та дворазове інтегрування (одноразове – визначення зміни швидкості ТЗ впродовж шляху, дворазове – розрахунок часу руху до кожної точки шляху). Цього відомі методи тягових розрахунків не допускають.

Результати інтегрування дають вичерпну відповідь на всі особливості руху ТЗ. Точність результатів суттєво більша, ніж у випадку розрахунків за чинними методиками, оскільки профіль шляху розглядається без спрощень.

Новим результатом є також аналіз зміни ваги ТЗ під час долаття перехідних ділянок шляху, між ділянками різних ухилів. Наведена таблиця зміни ваги ТЗ за різних швидкостей руху відповідно до нормативів допустимих величин радіуса кривизни профілю шляху.

5 ДИНАМІКА ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

5.1 Огляд методів вивчення динаміки руху транспортних засобів

Динаміка як наукова дисципліна вивчає питання руху матеріальних тіл під дією зовнішніх сил. Динаміка засобів електричного транспорту – це наука, предметом вивчення якої є електрична тяга, сили, що діють на транспортні засоби та їх рух під дією цих сил. Відповідно до завдань механіки розглядають питання енергетики руху, роботи тягового електроприводу, керування його роботою та характеристики руху в тяговому й гальмівному режимах. На основі результатів вивчення здійснюється оптимізація режимів руху ТЗ за різними параметрами.

Основним законом динаміки тіла є закони Ньютона. У відомих методах вивчення електричної тяги основне рівняння руху одержують на основі другого закону Ньютона з використанням теореми Кеніга [18, 21]. Моделлю вивчення є рух ТЗ, який представлено матеріальною точкою, що виконує рух під дією сили тяги та зовнішніх сил.

Механіка Ньютона описує рух матеріальних точок відповідно до системи просторових координат (декартові, циліндричні, сферичні тощо), розглядаючи ТЗ як ізольовану точку. Для опису положення ТЗ, як матеріальної точки в просторі, задають три координати (x, y, z). ТЗ розглядається як жорстке тіло. Для вивчення руху такого тіла, крім координат його розміщення в просторі, потрібно включити ще три кутові координати (α, β, γ), що визначають орієнтацію. Отже, степінь свободи дорівнює 6. Відповідно до кожної координати розраховують діючі сили (або розкладають одну діючу силу на складники), і розглядають рух відносно кожної з координат, завдаючи відповідні компоненти лінійної та кутової швидкості. Наприклад, рух описується 12 величинами, які входять у 6 рівнянь. У кожне з рівнянь входить координата й відповідна лінійна чи кутова швидкість. Рух матеріального точкового тіла згідно з механікою Ньютона описують 12 таких величин:

$$\begin{cases} \vec{r} = \vec{r}(x, y, z) \\ \dot{\vec{r}} = \dot{\vec{r}}(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}) \\ \vec{\varphi} = \vec{\varphi}(\alpha, \beta, \gamma) \\ \dot{\vec{\varphi}} = \dot{\vec{\varphi}}(\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}) \end{cases} \quad (5.1)$$

Якщо система має n матеріальних точок, то для повного опису динаміки потрібна система з $6 \cdot n$ рівнянь, на основі яких треба визначити $12 \cdot n$ величин. Система доволі складна й аналіз руху є не простим завданням. Виконують його

шляхом спрощень. Розглядається зазвичай тільки поступальний рух. Використовують ще низку спрощень, наприклад шлях руху приводять до прямолінійного. Такий опис руху стає спрощеним, наближеним.

Як приклад розглянутого підходу можна навести монографію О. Б. Мокіна та Б. І. Мокіна «Моделювання та оптимізація руху багато масових електричних транспортних засобів поверхнями зі складним рельєфом», у якій на основі ньютонівської динаміки розглядається проблема ідентифікації математичних моделей руху багатомасових електричних транспортних засобів (БЕТЗ). У монографії розглядаються модель руху на основі рівнянь Ньютона, і на думку авторів, альтернативного методу немає. У низці робіт, виконаних авторами, «реалізована ідея декомпозиції проблеми за характерними складниками рельєфу, такими як прямолінійні відрізки, спуски, підйоми та заокруглення в горизонтальній та вертикальній площині». Визначені умови припасування результатів розв'язання задач декомпозиції з урахуванням накладених обмежень [86, 87]. Прийнятий авторами підхід до вирішення проблеми ідентифікації моделей руху ТЗ є спрощеним і до того ж доволі затратний. Автори у цьому напрямку доклали значних зусиль, а їхні результати представлені в 50 наукових роботах. Вони досягнули певних успіхів, проте ускладнення на цьому шляху та наближення, які доводиться приймати, не дають можливості широкого використання запропонованих методів.

Альтернативою розглянутим методам виконання тягових розрахунків і оптимізації руху ТЗ є використання складнішої моделі руху ТЗ, як руху матеріального тіла, і використання узагальнених координат для опису динаміки. Для аналізу руху матеріального тіла в узагальнених координатах $q(t)$ розроблені теоретичні й практичні методи розрахунків, а саме рівняння Лагранжа першого та другого роду. Згідно з ними складніша модель ТЗ, модель матеріального тіла, і використання узагальнених координат, допускає простіші методи розрахунку та забезпечує більшу точність результатів. Крім того, вона дозволяє розширити коло питань, що підлягають теоретичному вивченню. Крім рівнянь Лагранжа, можна використати методи Гамільтона, у яких, крім узагальнених координат, використовуються узагальнені імпульси $p(t) = m \cdot v(t)$, що додатково розширює можливості аналізу руху. Основний матеріал цієї роботи подається з використанням рівнянь Лагранжа II роду.

У цій роботі використовується математична модель де ТЗ представляється як матеріальне тіло – система взаємодіючих матеріальних точок, об'єднаних внутрішніми в'язями. Внутрішні в'язі накладають обмеження на рух точок, з яких складається матеріальне тіло, а зовнішні зв'язки – обмеження на траєкторію руху. Внутрішні сили, які зумовлені

в'язями, зрівноважені й розгляд руху під їхньою дією виконувати не потрібно. Опис руху матеріального тіла здійснюється шляхом використання вибраних, відповідно до степенів свободи руху, узагальнених координат $q(t)$. Кількість таких координат дорівнює числу степенів свободи руху матеріального тіла. Рух здійснюється тільки по узагальнених координатах. Таким чином, кількість рівнянь суттєво скорочується, відпадає необхідність представлення руху кожної з багато- масових складових ТЗ, як руху окремих тіл. Немає також потреби складати рівняння руху по кожній просторовій координаті, виконувати декомпозицію рівнянь за складовими рельєфу та припасовувати результати окремих розв'язків. Наприклад, якщо розглядається рух ТЗ тільки вздовж шляху, то степінь свободи руху один – переміщення вздовж шляху. Відповідно потрібно тільки одне рівняння руху. Тягові розрахунки зводяться тільки до розв'язання одного рівняння. Це суттєво спрощує вирішення усіх завдань, розглянутих у роботах [86, 87], за збільшення точності розрахунків.

5.2 Рівняння Лагранжа II роду для дисипативних систем

У попередньому розділі для аналізу кінематики ТЗ використано рівняннями Лагранжа II роду для консервативних систем (3.16), тобто враховані тільки процеси взаємного перетворення механічної енергії: з потенціальної в кінетичну й навпаки. Для опису динаміки руху цього не достатньо, потрібно врахувати перетворення механічної енергії в інші види енергії: електричної, теплової, тобто енергії, яка надходить від сторонніх джерел, та процеси її розсіяння (дисипації). Для цього потрібно використати рівняння для дисипативних систем (3.17). Воно описує процеси взаємного перетворення енергії з одного виду в інший енергії, у наслідок чого виникають рушійні та гальмівні сили та здійснюється рух ТЗ.

Рух електричних ТЗ відбувається завдяки електричній енергії, яка надходить до електродвигуна від джерела живлення (розміщеного на ТЗ чи зовні), перетворюється в механічну й забезпечує режимі тяги. Зворотне перетворення механічної енергії в електричну відбувається під час рекуперативного гальмування. Механічна енергія під час руху та в режимах механічного гальмування частково перетворюється в теплову й розсіюється у зовнішньому середовищі. Рух інших ТЗ відбувається завдяки тепловій енергії, яка перетворюється в механічну в карбюраторних, дизельних чи парових двигунах. Вивчення динаміки руху насамперед вимагає аналізу процесів перетворення енергії і сил, які виникають під час цих перетворень.

Рівняння Лагранжа є рівняннями, які створені на основі аналізу процесів перетворення енергії. Вони ґрунтуються на рівняннях Ньютона та є подальшим

етапом розвитку механіки матеріальних тіл. У рівняння Лагранжа II роду входять узагальнені сили, узагальнені координати й узагальнені швидкості. Згідно з (5.2) у праву частину рівняння Лагранжа входять узагальнені сили Q_i , які діють на ТЗ. Ці сили відповідають узагальненим координатам, які використовуються для опису руху. Кожній узагальненій координаті $q(t)$ відповідає своя узагальнена сила Q_i . Згідно з принципом віртуальних переміщень Д'аламбера узагальнені сили визначають на основі віртуальної роботи δA_i . Віртуальна робота δA_i – це робота виконана при віртуальному (можливному) δq_i переміщенні вздовж узагальненої координати q_i . Визначають віртуальну роботу згідно з формулою:

$$\delta A_i = Q_i \delta q_i . \quad (5.2)$$

Віртуальні переміщення – це миттєві, малі переміщення матеріальних точок чи матеріальної системи загалом, що не суперечать в'язям і зв'язкам [69].

Узагальнені сили та сили, що входять у рівняння Ньютона, які використовуються в теорії електричної тяги, це різні сили, хоча вони можуть співпадати. Співпадають тоді, коли робота виконана по узагальненій координаті, співпадає з роботою, виконаною по просторовій координаті, вздовж якої розглядається рух ТЗ. Якщо розглядається криволінійний рух, то згідно з рівняннями Ньютона, рух розбивають на рух по кожній просторовій координаті та, відповідно, силу розкладають на складники напрямлення по кожній з них. Розраховують складний рух і представляють його рівняннями у параметричній формі або зводять до одного математичного виразу. У випадку використання узагальнених координат такою координатою є переміщення, яке розглядається вздовж усієї траєкторії руху. Узагальнена сила згідно з (5.2) також повинна в кожній точці руху співпадати із напрямком руху. Фактично напрямок узагальненої координати й узагальненої сили збігаються у кожен момент часу. Розкласти силу на компоненти не потрібно, як і не потрібно враховувати напрямок руху. Розв'язується одне простіше рівняння руху й одержується кінцевий результат, виражений через величину переміщення.

Приклад узагальненої сили при обертовому русі. Тут узагальненою координатою є кут повороту $\delta \varphi_i$. Віртуальна робота при кутовому переміщенні дорівнює добутку моменту сили на кут переміщення.

$$\delta A_i = Q_i \delta \varphi_i . \quad (5.3)$$

Наприклад, узагальненою силою є момент діючої сили M_i . Отже, розглядаючи узагальнені сили, завжди потрібно звертати увагу на їхнє

визначення згідно з формулою (5.3) і уточнювати, яка саме величина їм відповідає. Добуток узагальненої сили на узагальнену координату повинен мати значення виконаної роботи [60].

Удосконалену математичну модель руху ТЗ представлено як систему взаємодіючих матеріальних точок. Така система у теоретичній механіці розглядається як матеріальне тіло й виступає як єдине ціле. Матеріальне тіло може змінювати форму, у ньому можуть відбуватись різні внутрішні процеси. В'язі в системі визначаються її структурою (конструкцією ТЗ). До них належать в'язі, накладені підшипниками, які обмежують рух ротора двигуна, в'язі, зумовлені трансмісією ТЗ, в'язі між вагонами в складі поїзда та ін. (див. рис. 3.3).

Під терміном «в'язі» як відмічено у розділі 3.4 розуміють обмеження руху тіл і матеріальних точок всередині матеріального тіла, які накладаються в результаті внутрішньої взаємодії частин системи. Поняття «зв'язки» чи «взаємодія» використовують, коли мова йде про зовнішніх тіла, з якими взаємодіє матеріальне тіло. Це розмежування зроблено з тієї причини, що внутрішні в'язі та зовнішні зв'язки у механіці відіграють різну роль. В'язі не можуть привести до зміни характеру руху матеріального тіла. До зміни характеру руху можуть привести тільки зовнішні сили, прикладені до тіла, тобто сили, які відповідають зв'язкам із навколишнім середовищем.

Для викладу й розуміння подальшого матеріалу необхідно уточнити деякі поняття та їхні визначення.

В'язі – це тіла, або обставини, які зумовлюють обмеження на координати чи швидкості всіх, або деяких матеріальних точок. У теоретичній механіці розглядаються такі типи в'язів: голономні та неголономні. Голономні в'язі – це геометричні в'язі, які накладають обмеження тільки на просторове розміщення складових системи. Неголономні – це в'язі, які, крім геометричних обмежень, накладають обмеження на швидкість руху [59–61].

В'язі бувають одnobічні чи двобічні. Двобічні допускають прямий і зворотній рух, одnobічні тільки рух в один бік, у певному конкретному напрямку.

В'язі можуть бути стаціонарними або нестаціонарними. Стаціонарні в'язі – такі, які не змінюються з часом, нестаціонарні з часом можуть змінюватися.

Під час теоретичних досліджень в'язі описують рівняннями, які виражають накладені обмеження. Це рівняння або нерівності, які описують допустимі переміщення матеріальних точок. У рівняння стаціонарних в'язів час t не входить, оскільки вони не змінні, а нестаціонарні змінюються з плин timerу й рівняння в'язів залежить від часу t .

Розглядаючи в'язі та зв'язки між тілами, необхідно зупинитись на понятті «степені свободи». Степінь свободи – це кількість незалежних змінних, які однозначно описують стан фізичної системи. В'язі обмежують степені свободи руху матеріальних точки в середині матеріального тіла, а зовнішні зв'язки обмежують рух матеріального тіла відносно інших тіл. Наприклад, підшипник двигуна, це в'язь, яка накладає обмеження на рух ротора. Ротор двигуна може тільки обертатись в обоймі підшипника, а ось зв'язок між транспортним засобом і рейкою є зовнішнім і викликає рух ТЗ відносно рейки.

Степінь свободи ротора одна, допускається тільки обертовий рух. Рейки, по яких котяться колеса трамваю, є зв'язками, вони обмежують рух трамваю відносно інших зовнішніх тіл, трамвай може їхати тільки вздовж рейок.

У разі використання для опису руху матеріальних систем рівнянь Лагранжа II роду завдання спрощується. Це зумовлене тим, що реакції внутрішніх в'язей матеріального тіла взаємно компенсуються, а рух зумовлено тільки зовнішніми зв'язками, тобто степенями свободи щодо зовнішнього руху. Так аналіз динаміки руху суттєво спрощується. Внутрішні в'язі в матеріальній системі не впливають на рух. Величини сил реакції, викликаних внутрішніми в'язями, можуть бути самостійно розраховані. Такі розрахунки можна виконати після виконаного аналізу руху, відповідно до поставленого завдання досліджень. Вплив внутрішніх в'язів враховують у рівняннях для дисипативних систем, оскільки вони можуть приводити до втрат енергії. Ступінь такого впливу можна оцінити та розрахувати.

Залежно від типу зв'язків при аналізі руху тіла використовують різні системи координат. Зазвичай це декартові координати, які задаються положенням центра відліку та трьома взаємно перпендикулярними осями (x , y , z), уздовж яких здійснюється відлік положення тіла. Залежно від характеру руху, крім декартової, використовують сферичну, полярну, циліндричну та інші системи координат. Перехід від однієї системи координат до іншої, під час розрахунків, здійснюється за допомогою якобіану, матриці Якобі, яка дозволяє перерахувати координати тіла в одній системі до координат іншої системи. За будь-якому переході від однієї системи координат до іншої завжди необхідно використовувати три координати. Кількість координат задається метрикою простору, а ми живемо в тримірному просторі (четверний вимір – час). Для теоретичних розрахунків деколи використовуються і двомірні, навіть одномірні системи координат, але це певні спрощення, зумовлені незалежністю руху по кожній із координат.

Розглядаючи рух ТЗ, будемо вважати, що всі в'язі в ньому геометричні, (голономні), тобто обмежують тільки переміщення й не обмежують швидкості.

У двигуні підшипники обмежують рух ротора, дозволяючи тільки обертання навколо осі; в'язі в трансмісії ТЗ обмежують рух коліс, змінюють силу реакції та змушують котитися по рейках чи дорозі. Зв'язок між колесами та рейками, якщо відсутнє ковзання, може бути також віднесений до геометричного. В'язь у трансмісії потрібно вважати двобічною, оскільки передача тягового моменту здійснюється як від двигуна до коліс, так і від коліс до двигуна, в разі рекуперативного гальмування. Розглядаючи рух поїзда по рейках чи рух трамваю, накладені в'язі залишають тільки одну степінь свободи, а саме рух уздовж рейок. Якщо розглядати тролейбус, то його рух має дві степені свободи, а саме рух уздовж дороги та повороти під час керування рухом за допомогою руля. У разі тягових розрахунків руху, однак, не враховуються відхилення від напрямку центра дороги та рух вважають поступальним вздовж осі дороги, яка є лінією руху.

Транспортний засіб рухається по поверхні Землі й ми можемо розраховувати його рух, задаючи дві координати. Тут проявляється зв'язок, який накладає земна поверхня на рух ТЗ, у результаті якого ми маємо дві степені свободи. Якщо поїзд рухається вздовж колії, то для визначення його позиціонування достатньо вказати віддаль від станції. Зв'язок поїзда з колією обмежує рух і залишає один степінь свободи.

Усі сили, що діють на матеріальне тіло (поїзд, трамвай, тролейбус), поділяються на дві категорії: активні сили та реакції в'язей (пасивні сили). Активні сили виникають у результаті зв'язків (взаємодії) із зовнішніми тілами (силовими полями). Активна сила – це сила, яка почавши діяти на матеріальне тіло, що перебуває у стані спокою, може привести його в рух.

Обмежуючи положення чи переміщення точок матеріального тіла, в'язі діють на них силами, які є реакціями в'язей [70]. Реакції в'язей не приведуть тіло в рух. З якою силою одне тіло діє на інше, з тою самою силою інше тіло діє на нього. За законом дії та протидії всі реакції в'язей в системі урівноважуються.

Реакції в'язей за своєю природою дещо відрізняються від усіх інших сил. Реакція в'язі не цілком визначається самою в'яззю. Її модуль, а іноді й напрям залежать ще від інших сил, що діють на систему, і від руху системи. За відсутності активних сил і руху реакції в'язей є «статичними». Статичні реакції зумовлені будовою матеріальної системи, взаємодією тіл, що входять до її складу. Якщо механічна система рухається, то «статичні» реакції відрізняються від «динамічних». За характером руху матеріального тіла можна розрахувати й величину реакцій в'язей. Такі розрахунки потрібні, щоб врахувати внутрішню втрату енергії, швидкість спрацювання складників системи, надійність роботи.

Вирішуючи такі питання, зазвичай використовують рівняння Лагранжа першого роду.

Розглядаючи загальний випадок, відмітимо, що конструктивно в'язі реалізуються у вигляді шарнірів, напрямних стрижнів, ниток, поверхонь і тощо. Незалежно від фактичної реалізації в'язі можуть бути задані аналітично у вигляді рівнянь або нерівностей. Через це інколи самі рівняння або нерівності називають в'язями.

Активні сили не залежать від внутрішніх в'язів та їхніх реакцій. Вони є зовнішніми і виникають як результат взаємодії матеріального тіла з іншими тілами. Вони зумовлюють рух матеріального тіла. Тому під час розрахунків руху ТЗ враховувати тільки зовнішні сили.

Узагальнена сила згідно з визначенням є похідна виконаної роботи по відповідній узагальненій координаті.

$$Q_i = \frac{\delta A_i}{\delta q_i} . \quad (5.4)$$

Під час виконання завдань тягових розрахунків: найвигідніших режимів руху, економічних показників роботи транспортних засобів, швидкості руху на різних ділянках маршруту, витрат електроенергії на рух та ін., задаються активні сили. Будемо вважати, що величина та напрямок дії кожної активної сили та точка її прикладання, відома наперед, або розрахована.

Оскільки активні сили, діючи на матеріальне тіло, що перебуває у спокої, надають йому той чи інший рух, то їх називають «активними» на відміну від «пасивних» сил, якими є сили в'язів. Поділ сил на активні й пасивні суттєво спрощує розв'язання рівнянь руху.

Згідно з теоремою про рух центра мас матеріального тіла активні сили, які приводять матеріальне тіло у рух, повинні бути зовнішніми відносно нього. Зовнішні сили завжди виникають у результаті взаємодії тіла із іншими тілами, що не входять до складу матеріального тіла. Під час аналізу руху засобу електричного транспорту зовнішні сили виникають у результаті взаємодії коліс з покриттям дороги, взаємодії ТЗ з навколишнім середовищем. В усіх підручниках та нормативних документах розрахунку реалізації діючих сил приділена значна увага. Наприклад, у підручнику Г. К. Гетьмана «Основи електричної тяги» на розрахунки діючих сил виділено три розділи: «Реалізація сили тяги. Сили опору руху. Гальмівна сила» [20, 22].

На активні сили не впливає реакція в'язів, але реакції в'язів залежать, до того ж деколи дуже суттєво, від активних сил. Це зумовлено тим, що в'язі якраз і зумовлюють рух матеріальних точок і тіл у матеріальній системі під дією

активних сил. Тому під час аналізу руху ТЗ в умовах експлуатації достатньо часто доводиться розраховувати реакцію зв'язків. Наприклад, однією з перших задач тягових розрахунків електропоїздів є визначення допустимої маси поїзда при заданому типі локомотива, з врахуванням повздовжнього профілю ділянки шляху. Під час розрахунку руху поїзда, на початку руху, а також під час гальмування, необхідно враховувати реакцію в'язів між локомотивом і вагонами. У деяких випадках неврахування, чи неправильне врахування реакцій в'язів може призвести до аварійних ситуацій. Для таких розрахунків враховують взаємодію коліс локомотива зі шляхом, враховують вагу поїзда, максимальне навантаження, на яке розраховані вузли зчеплення вагонів. У разі недостатньої величини сил зчеплення, при взаємодії коліс поїзда з рейками, може відбуватись буксування й поїзд не почне рух, в іншому випадку, коли реакції в'язів між вагонами перевищують межу міцності з'єднань, вагони можуть відірватися від поїзда.

Динаміка матеріального тіла підлягає принципу Д'аламбера. Згідно з ним тіло буде знаходитися у рівновазі, якщо до діючих активних сил і реакцій зв'язків прикласти додаткову фіктивну силу інерції. В іншому формулюванні [91]: рух тіла здійснюється так, що сума всіх сил, які діють у системі, доповнена головним вектором сил інерції, дорівнює нулю.

Отже, динаміка системи матеріальних точок зводиться до рівності нулю всіх діючих сил, зокрема суми сили реакції зв'язків та сили інерції (головного вектора інерції). Сила інерції, введена Даламбермов, дорівнює:

$$\vec{D} = -m \frac{d\vec{v}}{dt}, \quad (5.5)$$

де v – вектор швидкості переміщення центра мас матеріального тіла.

Із принципу Д'аламбера випливають закони руху матеріальної системи. Ці закони відповідають другому та третьому законам Ньютона. Тільки тут розглянута не матеріальна точка, а система взаємодіючих матеріальних точок чи тіл, яка вважається матеріальним тілом. Додатково до рівняння Ньютона Д'аламбером, введені в'язі між складниками системи, сили реакції зв'язків, поняття активних сил та сила інерції.

Принцип Д'аламбера – Лагранжа вводить поняття віртуальної роботи δA (4.2) зовнішніх сил F_i та сил інерції D системи матеріальних точок, рух яких узгоджений накладеними зв'язками. Віртуальна робота δA пов'язана з віртуальним переміщенням δq_i :

З урахуванням принципу Д'аламбера, запис рівнянь динаміки електричного поїзда, в позначеннях, прийнятих у чинній теорії електричної тяги, матиме вигляд:

$$\vec{D} + \Sigma \vec{N} + \vec{F}_i + \vec{W}_i + \vec{B}_i = 0, \quad (5.6)$$

де ΣN сума сил реакцій в'язей.

З урахуванням (5.6) рівняння руху можна представити у вигляді:

$$m \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{N} + \vec{F}_i + \vec{W}_i + \vec{B}_i. \quad (5.7)$$

Це практично узагальнення другого закону Ньютона з врахуванням сил інерції. З використанням принципу Д'аламбера Лагранжем були отримані рівняння динаміки системи матеріальних точок, відомі як рівняння Лагранжа другого роду для потенціальних сил (3.16).

У реальних умовах на рухоме матеріальне тіло, поряд із потенціальними силами, діють різні непотенціальні сили у вигляді сил опору середовища, тертя і та ін., які призводять до зміни механічної енергії. Це призводить до того, що з плином часу повна механічна енергія системи зменшується. Відповідно до загального закону збереження енергії вона переходить в інші форми, наприклад у теплову енергію, і з часом розсіюється. Така система вважається дисипативною. У ній повна механічна енергія зменшується. У разі дисипативної системи, тобто при врахуванні перетворення механічної енергії в інші види, рівняння Лагранжа другого роду має вигляд, представлений формулою (3.17).

Використання рівнянь Лагранжа дозволяє глибше вивчити особливості руху ТЗ, виконати теоретичні розрахунки, суттєво підвищити їхню точність. Окрім того, забезпечує одночасний розгляд процесів перетворення енергії з різних видів, зокрема електричної, теплової механічної. Особливо важливим є те, що рівняння Лагранжа потребують, на відміну від рівнянь Ньютона, мінімальної кількості узагальнених координат. Зумовлено це тим, що сили реакції в'язів, які вже включені в рівняння Лагранжа, взаємно компенсуються.

Різниця в розглянутому підході до теорії електричної тяги полягає у тому, що на основі рівнянь Ньютона можна тільки розрахувати, за який час ТЗ прибуде в кінцевий пункт, і то з невеликою точністю. А згідно з рівняннями Лагранжа можна з більшою точністю розрахувати цей час і, крім того, розрахувати процеси перетворення енергії, процеси, які відбуваються на всьому шляху руху ТЗ: де виникають небезпечні сили, як ТЗ діє на рейки, дорогу, як навантаження діють на пасажирів та ін. Фактично вирішити питання, які в

чинній теорії навіть не підлягають розгляду, та вимагають додаткового вивчення іншими методами.

5.3 Вибір узагальнених координат

Як зазначено у попередньому підрозділі, використання принципу Д'аламбера та рівнянь Лагранжа надає можливості вивчити низку характеристик руху транспортних засобів, дозволяє суттєво розширити коло завдань, які підлягають теоретичному аналізу.

Початковим етапом вивчення є визначення мети дослідження та конкретних завдань, що підлягають вивченню. Відповідно до них уточнюють існуючу або будують нову модель руху, яка охоплює коло питань, що підлягають вивченню. Відповідно до цілей та завдань досліджень, уточнюють деталі моделі й виявляють степені руху. З урахуванням степенів свободи здійснюють вибір узагальнених координат, уточнюють узагальнені швидкості та визначають узагальнені сили, які відповідають узагальненим координатам. Відповідно до математичної моделі формують математичне визначення задачі.

Подальші кроки – це знаходження математичних виразів, які визначають кінетичну та потенційну енергії через узагальнені координати та швидкості. Ці вирази підставляють у рівняння Лагранжа II роду та відповідно до нього одержують рівняння або систему рівнянь руху. Одержані рівняння підлягають інтегруванню, у наслідок чого одержують відповіді на поставлені завдання. Ці кроки повністю формалізовані й виконуються за відомими алгоритмами.

Варто зауважити, що у разі використання рівняння Лагранжа II роду, використовують не стандартне рівняння руху, як це прийнято у відомих методах розрахунків, а кожен раз, відповідно до визначеної мети та завдань дослідження, розробляють свою модель руху та своє рівняння чи систему рівнянь, які підлягають подальшому інтегруванню.

Розглянутий підхід до вирішення питання тягових розрахунків видається доволі складним. Проте він є найпродуктивніший і дозволяє одержати відповіді на широке коло завдань, які підлягають вивченню під час розгляду складних питань, які виникають на шляху від подачі й перетворення електричної енергії до особливостей руху транспортних засобів, його окремих вузлів, взаємодії ТЗ із дорогою, навколишнім середовищем.

Якщо обмежитись тільки достатньо вузьким колом питань, які вирішують відомі методи тягових розрахунків, то рівняння руху одержується значно простіше, воно повніше описує особливості руху ТЗ, розв'язання його легше, а

результати повніші. Відповідно до наміченого порядку розглянемо низку завдань вивчення динаміки руху ТЗ у мірі їхнього ускладнення.

Розглянемо завдання, яке відповідає типовому та виконується відомими методами тягових розрахунків, а саме: визначення параметрів руху засобів електричного транспорту вздовж заданого шляху: часу руху, зміни швидкості вздовж шляху руху та витрат електроенергії. Разом із тим не будемо використовувати спрощення профілю шляху, яке є обов'язковим елементом розрахунків згідно з відомими методами [18–23].

Згідно з відомими методами шлях руху ТЗ задається у спрощеному вигляді – ухилами на спрямлених ділянках [18–23, 29]. Спрямлені ділянки виражають середніми ухилами на усьому їхньому проміжку у проміле ‰. Для рейкового транспорту додатково виконують спрямлення кривих у плані шляхом ведення еквівалентних підйомів i_r ‰, (позитивних ухилів, які створюють додатковий опір еквівалентний кривизні шляху).

Для виконання визначеного завдання використано електромеханічні характеристики двигуна, а саме залежності сили тяги та швидкості від величини струму, як це прийнято у відомих методах розрахунків.

Згідно з моделлю, наведеною на рисунку 3.3, ТЗ має один степінь свободи, а саме шлях. Узагальненою координатою прийнято віддаль від початкової точки відліку $q = s$. Крім віддалі, шлях характеризується додатковим параметром, а саме ухилом на окремих ділянках. У цій роботі для повного опису ухилу шляху (профілю шляху). задається величина рівня $z(s)$ відносно початкової точки. Такий опис шляху відповідає загальному прийнятому ухилу. З врахуванням рівня шлях має дві компоненти: $q_1 = s$ і $q_2 = z$, причому рівень функціонально залежить від конкретного значення координати шлях s , тобто $z = z(s)$. Вважатимемо, що змінна шлях має два параметри – довжину s та рівень відносно початкового z .

$$S = S(s, z), \quad (5.8)$$

де s – віддаль від умовного початку руху; $z = z(s)$ – рівень відносно рівня початкової точки, причому z позитивне, якщо знаходиться вище початкової точки.

Лагранжіан системи відповідно до (3.15) без додаткового обладнання подаємо у вигляді:

$$L = T - U = \frac{1}{2}m\dot{s}^2 + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^n J \left(\frac{\mu_i \dot{s}}{2\pi R_K} \right)^2 - mgz(s). \quad (5.9)$$

Розглядаючи динаміку в цьому розділі, ми будемо враховувати тільки обладнання, вказане на розрахунковій кінематичній схемі, отже (5.9) запишемо у вигляді:

$$L = \frac{1}{2}(m + m_e)\dot{s}^2 - mgz(s). \quad (5.10)$$

Відповідно (3.17) рівняння руху визначається як часткові похідні функції Лагранжа по узагальнених координатах шлях s та z :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{s}} \left(\frac{1}{2}(m + m_e)\dot{s}^2 - mgz(s) \right) \right) - \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{1}{2}(m + m_e)\dot{s}^2 - mgz(s) \right) = \sum_{j=1}^n Q_j. \quad (5.11)$$

Тут записувати друге рівняння, а саме часткову похідну по координаті рівень – z , не потрібно, оскільки вона функціонально залежна від змінної s та вже ввійшла у рівняння (5.11). На основі (5.11) одержуємо рівняння руху:

$$(m + m_e)\ddot{s} + mg \frac{dz(s)}{ds} = \sum_{j=1}^n Q_j. \quad (5.12)$$

Одержане рівняння (5.12), у разі відсутності зовнішніх сил, було розглянуто під час вивчення кінематики ТЗ. Це загальне рівняння руху, яке відповідає визначеному завданню вивчення руху ТЗ. Його вигляд залежить від прийнятої моделі руху, а розв'язання залежить від діючих сил. Друге рівняння виражає рівновагу сил, що діють по вертикалі.

Якщо використовувати розглянуте рівняння для аналізу руху трамвая, а не тролейбуса, то є одна особливість. Вона полягає у тому, що величина $\frac{dz(s)}{ds}$ стосується тільки профілю шляху й не враховує еквівалентні ухили, які розглядає класична теорія електричної тяги, для розрахунку руху трамвая та залізничних поїздів по кривих [18–23, 25, 29]. Під час аналізу руху ТЗ по залізничній колії у рівняння руху включають додаткові сили опору, що виникають під час руху на поворотах шляху. Обумовлені такі додаткові сили тертям ковзання реборд, зовнішніх відносно повороту коліс, по бічній поверхні рейок. Під час тягових розрахунків ТЗ, що рухається по залізничній колії, зазвичай виконують операцію лінеаризації шляху. Сутність її полягає в тому, що рух на кривих представляють як прямолінійний, уводячи додаткову силу опору. Величина цієї сили залежить від радіуса $R_{кр}$ дуги. Вводиться вона як додатковий опір руху викликаний ухилом шляху i_r ‰. Значення цього ухилу

такий, що він викликає еквівалентну за величиною силу опору. Для цього використовують емпіричні формули залежності, наприклад [18–23].

$$w_{кр} = \frac{700 \text{ м}}{R_{кр}} . \quad (5.13)$$

Тут подана «питома» величина опору руху на кривих, тобто як відношення сили в Н до «ваги» в кН. При переході до системи СІ фактична еквівалентна сила:

$$W_{кр} = mg \frac{700 \text{ м}}{R_{кр}} = mgi_r , \quad (5.14)$$

де i_r – еквівалентний ухил, зумовлений рухом по кривій.

У випадку використання рівнянь Лагранжа цю силу можна врахувати, як додаткову силу в правій частині рівняння, що у цій роботі будемо виконувати, вважаючи, що такий підхід не зменшить точності розрахунків порівняно з чинною методикою.

Більш доцільним є розгляд криволінійного руху шляху введенням додаткового, третього параметра шляху – радіуса r дуги повороту, або кривизни шляху K в плані. Доцільність введення цієї додаткової координати обумовлена і тим, що русі ТЗ по дугі виникає обертовий рух ТЗ, якого простим введенням додаткової сили опору реборд коліс врахувати неможливо. Отже, шляху відповідатиме три узагальнені координати – довжина, ухил, і радіус кривизни. Відповідно шлях є вектор із трьома компонентами:

$$\vec{S} = (q_s, q_r, q_z), \quad (5.15)$$

або більш зручніше користуватись позначеннями:

$$\vec{S} = (s, r, z). \quad (5.16)$$

Далі буде показано, що у деяких особливих випадках для опису шляху руху доводиться використовувати вектор із чотирьох координат, де четвертою координатою є перевищення зовнішньої рейки. Перевищення зовнішньої рейки є параметром будови залізничних колій. На поворотах шляху зовнішню рейку піднімають вище внутрішньої для зменшення бокових зусиль.

Узагальнені координати (5.15) не є декартовими координатами. Перша з них s відповідає віддалі вздовж поверхні шляху відносно початкової точки, вибраної за початок координат, до поточної точки знаходження ТЗ. Це віддаль у м, яку пройшов ТЗ. Друга координата $r(s)$ – радіус кривизни шляху,

координата, яка завжди перпендикулярна напрямку шляху та дорівнює модулю радіуса кривизни шляху, третя координата $z(s)$ – висота полотна дороги (або центру мас ТЗ) відносно початкової точки, початку координат. Координати $r(s)$ не впливають на величину кінетичної та потенціальної енергії ТЗ, а зумовлюють тільки величину сил, що діють на ТЗ.

Вектор шляху згідно з (5.16) характеризується трьома параметрами: віддаллю s , рівнем профілю z і радіусами кривих у плані r .

Правилами проєктування та прокладання доріг задаються такі параметри: довжина, план дороги, поздовжній профіль. Ці параметри описують просторові характеристики залізничної колії або автомобільної дороги й обумовлюють умови руху ТЗ, тому вони вибрані як узагальнені координати [59–61, 97]. Отже, шлях, по якому рухається ТЗ, можна описати за допомогою вектора з трьома координатами. Координати взаємно перпендикулярні й утворюють ортогональну систему координат, зв'язану з поточним положенням ТЗ.

Додатково для деяких типів доріг полотна дороги додають нахил відносно горизонталі, який забезпечується перевищенням зовнішньої рейки відносно внутрішньої, або нахил шосейної дороги, який іноді роблять на поворотах доріг у гірській місцевості. Тому, розглядаючи залізничну колію, потрібно враховувати ще одну, четверту компоненту. Вона обумовлена будівельними нормами [81, 83]. Згідно з ДБН на радіусах залізних доріг певних категорій встановлюють перевищення – h зовнішньої рейки на кривих ділянках відносно внутрішньої. Таке перевищення задається в міліметрах (можна виразити кутом поперечного нахилу шляху θ) і реалізується при будівництві дороги. Це перевищення призначене для компенсації складника ваги ТЗ, направленої від центра кривизни [83, 92]. Отже, баланс енергії можна подати у вигляді [94]. Ця складова ваги виникає завдяки доцентровому прискоренню під час їзди ТЗ по дугі. Величина перевищення h , відповідно до ДБН [81, 83], визначається згідно з формулою:

$$h = \frac{S_1}{g} \left(\frac{\dot{v}_{max}^{nac}}{3,6^2 \cdot R} \right) - \alpha_{nn}^{don}, \quad (5.17)$$

де $\dot{v}_{max}^{nac}$ – максимальна швидкість у кривій пасажирського поїзда прискореного руху, км/год.

Коефіцієнт α_{nn}^{don} встановлюється з дозволу Укрзалізниці для збільшення нормативу непогашених прискорень для вантажних поїздів. Розрахунок фактичних непогашених прискорень ведеться згідно з формулою [81, 83]:

$$\alpha_{nn} = \frac{v_{min}^2}{3,6^2 \cdot R} - \frac{gh}{S}. \quad (5.18)$$

Отже, залізничний шлях потрібно описати вектором чотирьох координат:

$$\vec{S} = \vec{S}(s, r, z, h). \quad (5.19)$$

Відповідно до повної моделі, якщо ввести кут поперечного нахилу шляху θ , який відповідає величині перевищення h , згідно до ДБН встановлені такі величини [83]:

$$\theta = \begin{cases} 0 - \text{для шосейних (крім гірських) та трамвайних доріг;} \\ \arctg\left(\frac{h}{1520}\right) - \text{для швидкісних та магістральних} \\ \text{доріг I – IV категорій} \end{cases}$$

Кут θ для трамвайних доріг встановлено рівним нулю, оскільки відповідно до ДБН [82] перевищення при будівництві трамвайних ліній не допускається (виняток тільки на виділених лініях).

Розглянута модель може бути спрощена або ускладнена залежно від конкретних завдань розрахунків. Наприклад, залізничний поїзд протяжний і має велику кількість вагонів. Довжина товарного поїзда може сягати більше 1 000 м, у поїзді до 50 вагонів (іноді більше). Необхідно врахувати їхнє розміщення вздовж шляху. Це можна зробити, представивши ТЗ як матеріальне тіло M , що становить суму матеріальних тіл (точок) M_i , зв'язаних між собою. У випадку в'язів, які становлять зчеплення вагонів, можна використати тета-функцію зсуву θ , яка описує просторове зміщення вагонів:

$$M = \sum_{s=1}^n M_i \theta(s - s_i). \quad (5.19)$$

З'єднання між вагонами або гнучке, як джгут, або з люфтом, що допускає повороти в горизонтальній і вертикальній площинах, як показано на рисунку 5.1.

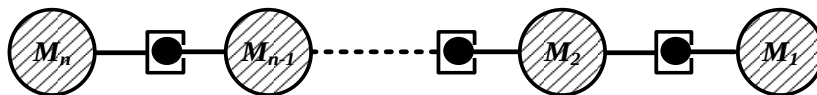


Рисунок 5.1 – Модель ТЗ як системи з'єднаних матеріальних тіл із люфтом

На рисунку 5.1 показана концептуальна модель поїзда, у якій виконано з'єднання вагонів із люфтом. У практиці експлуатації поїздів наявність люфту в зчепленні вагонів має важливе значення. Урахування люфту стосується процесів розгону поїзда та його гальмування. Величина люфту приблизно 0,05–0,1 м. Жорсткість в'язів у межах люфту нульова, а за більшого зміщення рівна безконечності. У рівнянні руху в'язі між вагонами потрібно представити у вигляді узагальнених функцій: просторового зсуву та нечутливості. Математичне формулювання лагранжіану в таких випадках включає узагальнені функції, які використовуються у галузі знань, що охоплює динамічні процеси передачі інформації та теорії автоматичного керування [24]. Моделювання таких процесів можна виконати в програмному середовищі «Simulink MatLab», у якому є блоки функцій нечутливості та просторового зсуву.

Розглянуті приклади моделей дають уявлення про широкі можливості використання рівнянь Лагранжа. Повертаючись до конкретного завдання цієї роботи, потрібно визначити всі діючі сили під час руху тролейбуса.

5.4 Аналіз діючих сил

Як зазначено в попередній частині, сили, які діють у ТЗ, поділяються на активні, тобто зовнішні сили, що приводять у рух ТЗ, та сили в'язів, що забезпечують передачу обертового моменту від двигуна до ведучих коліс ТЗ. Зовнішні сили – це: сила тяги, сили опору та гальмівні сили, сили тертя і втрати теплової енергії. Вони виникають під час взаємодії ТЗ із шляхом та навколишнім повітрям. Процеси, які приводять до реалізації зовнішніх сил, такі:

- отримання двигуном електричної енергії від джерела;
- перетворення за допомогою двигуна електричної енергії в механічну;
- передача обертового моменту двигуна до ведучих коліс;
- взаємодія ведучих коліс із полотном дороги і виникнення сил тяги;
- рух ТЗ, тертя й сили опору з боку дороги;
- взаємодія ТЗ під час руху з навколишнім повітряним середовищем;
- гальмівні сили, внутрішнє тертя й розсіювання теплової енергії;
- реалізація гальмівних сил під час реостатного та рекуперативного гальмування.

Розглянемо сили, що діють на ТЗ згідно з наведеними процесами.

До ТЗ надходить електрична енергія із зовнішніх джерел чи внутрішніх джерел, розміщених безпосередньо на ТЗ. Електрична енергія в двигуні

перетворюється в механічну, кінетичну енергію обертального руху двигуна. Через трансмісію завдяки в'язям енергія передається до ведучих коліс. У результаті взаємодії ведучих коліс ТЗ із полотном дороги (рейками) виникають сили тяги, а також сили опору. Додатково сили опору виникають у результаті взаємодії ТЗ з повітряним середовищем. До сил опору також входять дисипативні сили, зумовлені перетворенням механічної та частково з електричної енергії в теплову й частково в тертя у в'язях. Гальмівні сили виникають як результат взаємодії коліс ТЗ з дорогою і теплових витрат у гальмах. Гальмівні сили виникають також у результаті перетворення механічної енергії в електричну і втрати її на гальмівних резисторах, або під час рекуперації, передачі її споживачам. Споживачами енергії рекуперації можуть бути: гальмівні резистори, акумулятори ТЗ, споживачі, приєднані до тягової мережі, наприклад акумулятори. Важливо відмітити, що за відсутності споживача рекуперованої енергії гальмівні сили не реалізуються.

Сила тяги засобів електротранспорту зумовлена електричною енергією, яку споживає двигун з електричної мережі (для автономних ТЗ від бортового джерела енергії). Він перетворює електричну енергію в механічну, а саме в енергію обертального руху якоря двигуна. Робота двигуна полягає в наданні якорю кінетичної енергії обертального руху завдяки електричній енергії. Кінетична енергія якоря через трансмісію передається ведучим колесам ТЗ. Тягові колеса під час свого обертання взаємодіють зі шляхом і результатом цієї взаємодії є зовнішні сили, які приводять ТЗ в поступальний рух вздовж шляху. Елементарна робота двигуна полягає у переміщенні валу на кут $\delta\varphi$ під дією моменту сили на ньому M . Ця робота виконується завдяки енергії, що надходить до двигуна з електричної мережі, яка рівна потужності P двигуна помноженій на час δt , протягом якого виконана робота. Оскільки потужність двигуна – це добуток напруги $u(t)$ на струм $i(t)$

Елементарна робота виконана двигуном дорівнює:

$$\delta A_i = u \cdot i \cdot \delta t . \quad (5.20)$$

Ця робота двигуном витрачається на повертання валу двигуна, тобто на його віртуальне переміщення на елементарний кут $\delta\varphi$

$$\delta A_i = M \cdot \delta\varphi . \quad (5.21)$$

Якщо у якості узагальненої координати, яка описує роботу двигуна прийняти кут повороту якоря φ , то відповідно до (5.4) одержуємо узагальнену силу:

$$Q_i = \frac{M \cdot \delta\varphi}{\delta\varphi} = M = \frac{i \cdot u}{\delta\varphi/\delta t} = \frac{P}{\omega} \quad (5.22)$$

де $i(t)$, $u(t)$ – струм та напруга на вході двигуна, P – потужність двигуна, M , ω – обертовий момент та кутова швидкість якоря двигуна.

Тут узагальненою силою є момент M на валу двигуна, який створюється струмом якоря. Залежно від типу й конструкції двигун має кілька обмоток, а саме обмотки якоря та обмотки послідовного та паралельного збудження, які створюють магнітне поле. Струм, проходячи по обмотках, нагріває їх, на що витрачається частина електроенергії. Потужність, яка іде на створення обертового моменту, менша, ніж добуток загального струму двигуна на напруги на його вході. Втрати потужності також відбуваються в якорі двигуна та додаткові втрати через розсіяння магнітного поля. Електричні втрати ΔP_{Ei} можна подати як суму втрат на послідовно ввімкнутих резистивних елементах r_{ih} (щітках двигуна, активному опорі послідовних обмоток збудження, резисторах системи керування та ін.), і втрат у паралельно ввімкнутих елементах r_{ip} (обмотках паралельного збудження).

$$\Delta P_{Ei} = \sum_{ih=1}^n i(t)r_{ih}^2 + \sum_{ip=1}^m \frac{U(t)}{r_{ip}^2} . \quad (5.23)$$

Крім електричних втрат, у двигуні також є механічні втрати ΔP_{Em} . Отже, баланс енергії можна подати у вигляді [78]:

$$i(t)u(t) - \Delta U_{Ei}(t) - \Delta U_{Em}(t) = M(t)\omega(t) . \quad (5.24)$$

У лівій частині (5.24) подана потужність двигуна – величина електричної енергії, яка надходить з урахуванням електричних – ΔP_{Ei} та механічних – ΔP_{Em} втрат. У правій частині добуток моменту сили на валу двигуна на кутову швидкість.

Зазвичай втрати у двигуні представляються коефіцієнтом корисної дії. У такому разі момент сили на валу двигуна $M(t)$ становить:

$$M(t) = \frac{i(t)u(t) \cdot \eta(t)}{\omega(t)} , \quad (5.25)$$

де η (i) – коефіцієнт корисної дії двигуна:

$$\eta(i) = \frac{i(t)u(t) - \Delta P_{Ei} - \Delta P_{Em}}{i(t)u(t)} . \quad (5.26)$$

Момент на валу (5.25) передається трансмісією на тягові колеса й викликає їхнє обертання. У трансмісії виникають додаткові втрати енергії. Якщо величина втрат у трансмісії становить ΔP_T , то сумарні втрати будуть:

$$\Delta P_{\Sigma m} = \Delta P_{Em} + \Delta P_T \quad (5.27)$$

і загальний коефіцієнт корисної дії становитиме:

$$\eta(i) = \frac{i(t)u(t) - \Delta P_{Ei} - \Delta P_{\Sigma m}}{i(t)u(t)} . \quad (5.28)$$

Обертальний момент двигуна, з врахуванням загального коефіцієнта корисної дії, передається до коліс. Вони мають однаковий радіус R_K , і їхні моменти інерції J_i . Трансмісія ТЗ змінює момент двигуна пропорційно передавальному числу μ_i і створює момент сили на валу колеса $M_K(t)$, що дорівнює:

$$M_K(t) = M(t)\eta(t)\mu_K , \quad (5.29)$$

де μ_K – передавальне число трансмісії.

Цей момент сили перевищує момент на валу двигуна в μ_K раз, наприклад для тролейбуса, розглянутого в розділі «Кінематика» $\mu_K = 11,38$.

$$\omega(t) = \frac{\omega(t)}{2\pi R_K} . \quad (5.30)$$

При цьому кутову швидкість обертання колеса змінюється обернено пропорційно передавальному числу.

5.5 Утворення рушійної сили тяги ТЗ

Рух ТЗ відбувається завдяки взаємодії із навколишнім середовищем: шляхом, навколишнім повітрям. Результатом взаємодії є активні, зовнішні сили, які зумовлюють рух ТЗ. До них належать: сила тяги, сила опору й гальмівні сили. Сила тяги виникає в результаті взаємодії коліс ТЗ із поверхнею дороги чи залізничної колії. Процес реалізації сил тяги доволі складний і має низку особливостей. Його вивчення є предметом дисципліни «Трибологія», яка вивчає фізичну природу явищ, що відбуваються у фрикційному контакті двох тіл, механіку та термодинаміку процесів тертя [95]. У підручнику викладено сучасні наукові уявлення трибології, розглянуто фізичну природу явищ, що відбуваються у фрикційному контакті, механіку й термодинаміку процесів

тертя. Розглянуто молекулярно-механічну і структурно-енергетичну теорію тертя.

Основні здобутки аналізу виникнення сил тяги розглянуто в посібниках з електричної тяги: ґрунтовній монографії В. К. Гетьмана, роботах та підручниках В. Е. Розенфельда, С. І. Осипова, В. П. Шпачука, Л. В. Байриєвої та ін. [1–29]. Сили тяги виникають у результаті взаємодії ведучих коліс ТЗ з дорогою чи рейкою. Природа цих сил зумовлена наявністю тертя. На рисунку 5.2 наведені сили, що діють на транспортний засіб.

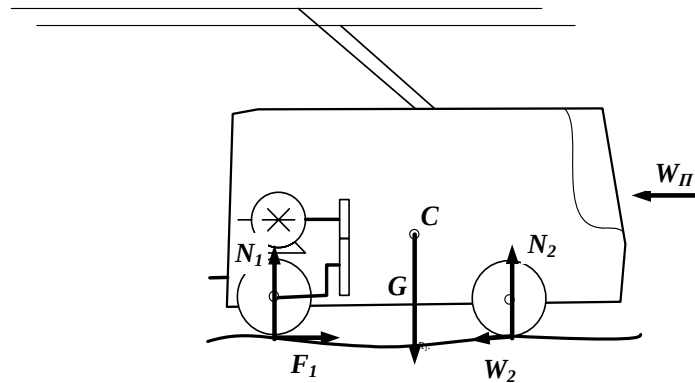


Рисунок 5.2 – Сили, які діють на транспортний засіб

Вага G транспортного засобу діє на дорожнє покриття (вектори сил виділено курсивом). Вона розподіляється між ведучими і веденими колесами. Величина сили на кожне колесо залежить від їхнього розміщення відносно центра ваги C . Відповідно до цих сил викликають реакції з боку дороги N_1 , N_2 . (рис. 5.2). Тягові колеса ТЗ обертаються під дією створеного двигуном обертального моменту. Між колесами, що обертаються, і опорою, якою слугує дорожнє полотно, виникає сила тертя. Тягові колеса в точці контакту намагаються змістити верхній шар опори у бік, протилежний напрямку обертання. Поверхня опори частково деформується, виникають сили реакції F_1 , які намагаються перемістити колесо, а з ним весь ТЗ. ТЗ починає рухатись, штовхаючи ведені колеса. Сила опору руху W_2 між веденими колесами й дорогою частково гальмує рух ТЗ. Сили тяги й опору руху направлені протилежно, хоча вони викликані однією причиною – обертанням колеса. Основну роль у виникненні сили тяги відіграє тертя. Воно також спричиняє виникнення сил опору руху.

Як зазначено в [18–20, 95], природа тертя буває двох типів: механічна й молекулярна. Механічне тертя виникає тоді, коли взаємодіють нерівності колеса та опорної поверхні, і під дією сили тиску з боку колеса ці нерівності деформуються, унаслідок чого виникає сила зчеплення. Молекулярний

складник сили тертя виникає на рівних і чистих поверхнях тіл і зумовлений силами молекулярного зчеплення. Молекули опори та колеса взаємодіють між собою. Результатом взаємодії є виникнення сил тяги й сил опору.

Фізичні процеси виникнення сил тяги та опору подані на рисунках 5.3 і 5.4. Якщо колесо вважати абсолютно жорстким (див. рис. 5.3), то під час обертання сила ваги G і сила реакції опори N прикладені в одній точці. Вони рівні, направлені в протилежні боки й не викликають переміщення колеса. Якщо до колеса прикладено кутовий момент, то воно буде вільно обертатись. Якщо прикладена будь-яка мала сила F_c , то колесо буде ковзати по поверхні опори. Такий випадок можливий тільки теоретично, оскільки абсолютно твердих тіл немає.

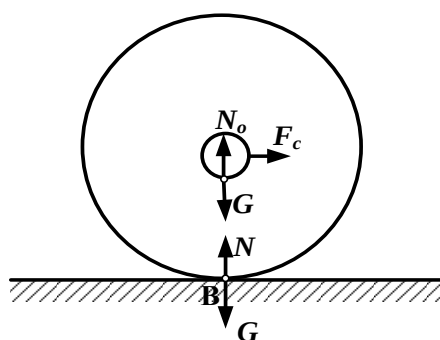


Рисунок 5.3 – Ковзання колеса по абсолютно жорсткій рейці

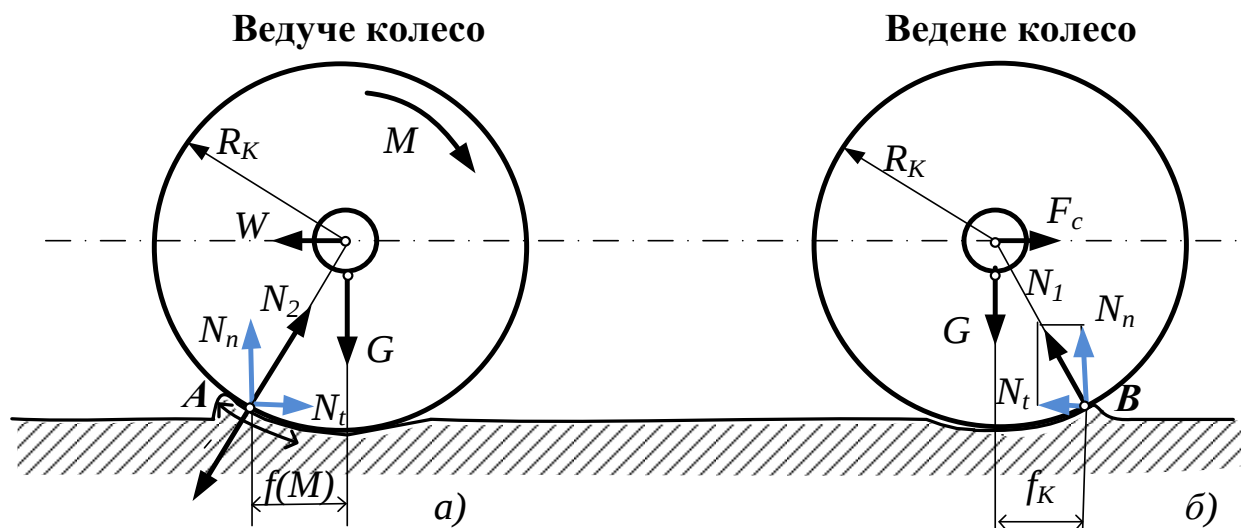


Рисунок 5.4 – Виникнення сил тяги та опору на колесо ТЗ: а) – ведуче колесо; б) – ведене колесо

Реальний випадок, це коли опора та колесо можуть деформуватись і між ними виникають сили тертя. У результаті деформації замість однієї точки контакту виникає еліпс контактування певного розміру, у якому проявляється дія молекулярних сил зчеплення [18, 20, 95]. Під час обертання ведучого колеса на поверхню опори діють сили зсуву та поверхня пружно деформується. Виникає деформаційний валик, який розміщений позаду колеса (рис. 5.4, а). Якщо розглянути ведене колесо (рис. 5.4, б), то сила F_c , яка переміщує його по поверхні опори, призводить до появи деформаційного валика перед ним. Деформація поверхні опори в межах пружності призводить до виникнення сили тяги та опору. У разі перевищення діючих сил або недостатньої пружності дороги відбувається пластична деформація її поверхні й колесо ковзає по дорозі.

5.6 Аналіз сил, що виникають під час взаємодії колеса з дорогою

Докладніший аналіз сил, що виникають під час взаємодії колеса з дорогою. *Ведене колесо*. На ньому сила тертя гальмує рух уперед. На вісь колеса (рис 5.4, б) діє сила ваги G та сила F_c . Вага G зумовлює прогин опори, а дія сили F_c проявляється у тому, що колесо намагається ковзати й з'являється деформаційний валик перед колесом. Сила ваги G та сила F_c діють на опору й викликають силу реакції N_1 у точці B . Точка B зміщена відносно вертикалі вперед. За невеликої сили F_c колесо не буде рухатися. Його руху протидіє момент сил $M(G, N_n)$, де N_n – нормальний складник сили реакції опори. У разі збільшення сили F_c точка прикладання реакції опори B зміщується на віддаль f_k та настає момент, коли момент сили F_c та тангенціальної сили реакції $M(F_c N_t)$ у точці B урівноважується моментом $M(G, N_n)$. За подальшого зростання сили F_c колесо починає котитись. Гранична величина тангенціального складника сили реакції N_t відповідає силі опору тертя кочення W_k , яка протидіє коченню колеса. Величина цієї сили визначається з умови рівності розглянутих моментів сил:

$$\vec{W}_k = \frac{f}{R_k} \vec{G}, \quad (5.31)$$

де f – коефіцієнт опору тертя кочення.

Виконаний аналіз дозволив визначити величину сили опору кочення та коефіцієнт тертя кочення. Розмірність коефіцієнта опору тертя кочення, як видно з (5.31), відповідає розмірності радіуса колеса r , тобто метру.

Зауваження. Оскільки всі одиниці виражені в системі СІ, а це самоузгоджена система одиниць, тому немає потреби в кожній формулі вказувати розмірність, як це практикується [18–29].

Наведений аналіз дозволяє пояснити різницю у величині сил тертя спокою. Під час кочення ця різниця полягає у тому, що в момент переходу від стану спокою до кочення вісь колеса, разом із ТЗ має дещо піднятися над рівнем опори, щоб компенсувати прогин опори та колеса, який утворився за час спокою, а також деформаційний валик. Під час руху колесо вже знаходиться у підвищеному стані і деформаційний валик пружно переміщується разом із колесом. Тому опір руху дещо більше менший ніж в стані спокою .

Ведуче колесо. На колесо одночасно діє вага G і обертальний момент M , створений двигуном (рис. 5.4, *a*). Опора прогинається під дією ваги, а колесо, що обертається, зміщує верхній шар опори назад, та викликає пружну деформацію поверхні опори. Між колесом і опорою виникає контактний еліпс. Момент сили, який обертає колесо (рис 5.4, *a*), пружно зміщує верхні шари опори та виникає деформаційний валик. Точка A – прикладання реакції опори зміщується проти напрямку руху. Реакція опори N_2 спрямована під гострим кутом до напрямку руху. Виникає момент сили між вагою G і силою нормального складника N_n реакції $M(G, N_n)$, спрямований уперед. (У цьому випадку сила ваги G направлена вертикально униз, оскільки відсутнє прискорення, рух рівномірний (3.4)). Діючий момент сили змушує колесо котитись по опорі, а ТЗ рухатись уперед. У разі збільшення навантаження W , тобто моменту опору $M_w(W, N_f)$, точка A зміщується бік деформаційного валика і зростає момент $M(G, N_n)$. Колесо продовжує рухатись при більшому навантаженні. У разі збільшення моменту двигуна M відбувається аналогічне зміщення і ТЗ рухається з більшою швидкістю. Це зміщення обмежено деформацію рейки в разі досягнення певної величини точка A переходить за область валика. Колесо починає вільно обертатися без переміщення вперед. Виникає буксування колеса, яке вже не може зупинитися.

Щоб позбутися буксування, необхідно зупинити колесо та змусити його котитись по опорі. Для цього потрібно зняти прикладений до нього обертальний момент. Тоді колесо переходить у режим кочення. Під ним з'являється сила зчеплення, а після наступної подачі обертального моменту відновлюється контакт колеса із опорою внаслідок чого буксування зникає.

З аналізу сил опору (рис. 5.4, *a*) видно, що в разі збільшення сили, що припадає на вісь колеса (сили тяги), буде виникати момент сил, результатом дії якого виникає сили тяги. Вона дорівнює:

$$F = \frac{M}{R_K} - W_K . \quad (5.32)$$

У створенні сили тяги (5.32) бере участь сила зчеплення W_K . Ця сила обмежена граничною величиною $W_{зч}^{гр}$, тому й сила тяги також обмежена. Силу зчеплення можна розрахувати за навантаженням на колесо. У першому наближенні на практиці приймають, що:

$$F_{зч} = \psi G_O \leq W_{зч}^{гр} , \quad (5.33)$$

де $W_{зч}^{гр}$ – гранична сила зчеплення; G_O – сила ваги, яка припадає на вісь колісної пари; ψ – коефіцієнт зчеплення колеса з опорною поверхнею.

Експериментально встановлено, що сила зчеплення залежить від розмірів і площі контакту поверхонь стикання, величини сили нормального тиску, кутової швидкості колеса, фізико-механічних властивостей матеріалу контактуючих тіл. Наприклад, для трамваїв і чистих рейок $\psi = 0,16\text{--}0,2$, для забруднених рейок $\psi = 0,12\text{--}0,14$, при листопаді коефіцієнт зчеплення зменшується до $\psi = 0,06\text{--}0,08$ [21, 95].

Для ТЗ залізничного транспорту граничне значення сили зчеплення визначає величину зчіпної ваги локомотива [28, 20]. Якщо зчіпна вага локомотива менша від ваги поїзда, то локомотив не може зрушити поїзд із місця. Вона також обмежує можливість гальмування.

5.7 Сили опору руху. Сили тертя

Основний складник сил опору швидкісних видів транспорту – сили тертя, які виникають у результаті взаємодії ТЗ зі шляхом. Вони виникають у площині дотику поверхонь і перешкоджають їхньому взаємному переміщенню. Серед сил тертя розрізняють:

- тертя спокою: виникає у разі, коли зовнішня сила недостатня для того, щоб відбулося відносне переміщення тіл. Тертя спокою, або статичне тертя, більше від тертя ковзання та кочення. Причиною цього є пружна та пластична деформація форми поверхонь тіл, що стикаються, поява окисних плівок та ін.;

- тертя ковзання є результатом взаємного переміщення тіл. Сила його направлена в протилежний зміщенню бік. Ковзання одного тіла по поверхні іншого виникає тоді, коли зовнішня сила перевищує тертя спокою. Характеризується тертя ковзання коефіцієнтом тертя. Під час руху одного тіла по поверхні іншого тертя зумовлене силами міжмолекулярної взаємодії;

деформацією мікронерівностей, забрудненням і змащуванням поверхонь [20, 77];

– тертя кочення: виникає під час кочення тіла по опорі, зумовлене пружною та пластичною деформацією тіл, що взаємодіють із силами міжмолекулярної взаємодії, напрямлена протилежно до швидкості миттєвого центра обертання тіла, що котиться.

Величина сил тертя залежить від сили, з якою тіла притискаються одне до іншого. Такою силою є вага G транспортного засобу. Вага під час руху ТЗ змінюється відповідно до величини прискорення та його напрямку (3.4). Сила дорівнює добутку коефіцієнта тертя на вагу G . Під час розрахунку сили тертя потрібно орієнтуватись на визначення ваги згідно з рисунком 3.1 і враховувати складники ваги, викликані прискореним рухом ТЗ.

$$\vec{W}_T = k_T \vec{G}. \quad (5.34)$$

Це формула визначення «сухого» тертя відповідно до закону Гука. Коефіцієнт тертя – k_T залежить від низки чинників: матеріалу тіл; стану поверхонь, їхньої шорсткості; наявності забруднень; швидкості руху ТЗ; температури повітря та ін. [20, 95]. Коефіцієнт тертя ковзання суттєво більший від коефіцієнта тертя кочення. Рух ТЗ в основних режимах характеризується коефіцієнтом тертя кочення. У кожному конкретному випадку, під час руху по дорозі із різними покриттям враховується відповідне значення коефіцієнта тертя. Під час руху ТЗ по залізній дорозі додатково враховується коефіцієнт тертя ковзання, оскільки на поворотах дороги реборди зовнішніх коліс ковзають по боковій поверхні рейок. Питання величини коефіцієнта тертя, залежності його від чинників, є предметом безлічі детальних досліджень низки робіт [18, 25–29, 95]. Його величина суттєво впливає на режим руху і енергозатрати ТЗ.

5.8 Зміна ваги транспортного засобу під час його руху по шляху зі складним профілем

До активних сил, які впливають на характер руху ТЗ, входять складники сил, зумовлені зв'язками, які накладає шлях з урахуванням змін його профілю та плану. Профіль шляху має ділянки із різними ухилами та дуги спряження ухилів у вертикальній площині. Плану дороги відповідають повороти та відповідні лінії спряження дуг різних радіусів у горизонтальній площині. Відповідно до цих елементів дороги виникають активні сили, що зумовлюють рух уздовж шляху. Сили, зумовлені ухилами дороги під час руху з постійною швидкістю профілю, такі:

- I – сила земного тяжіння, направлена вертикально вниз mg ;
- II – складова сили земного тяжіння направлена вздовж шляху, зумовлена ухилом шляху W_i ;
- III – нормальна складова сили тяжіння mg направлена перпендикулярно площини шляху, зумовлена ухилом шляху W_{in} ;
- IV – додаткова сила, зумовлена відцентровим прискоренням руху на дугах спряження різних ухилів W_R ;
- V – сила опору тертя.

Сили, зумовлені поворотами шляху у плані: їх дугами постійних радіусів та ділянками спряження, не розглядається. Шлях у плані вважається прямолінійним, тому що його повороти допускається замінити ефективними ухилами.

I – під час рівномірного руху по прямолінійній ділянці сила земного тяжіння проявляється як вага ТЗ і залежить тільки від прискорення земного тяжіння $G = mg$.

II – складник сили земного тяжіння, направлений уздовж шляху, є додатковою силою, зумовленою ухилом ділянки, який вимірюється, як величина ухилу i ‰. Ухил дорівнює відношенню пониження рівня дороги до довжини ділянки 1 000 м. Величина сили діючої вздовж шляху дорівнює:

$$W_i = mg \sin \left(\frac{\Delta z(q)}{\Delta q} \right) \approx mg \cdot tg \left(\frac{\Delta z(q)}{\Delta q} \right). \quad (5.35)$$

III – складник сили тяжіння направлений перпендикулярно площини шляху, визначає величину тиску ТЗ на шлях, згідно з яким потрібно розраховувати силу опору тертя. У практиці тягових розрахунків, через невелику відмінність цього складника від ваги ТЗ у стані рівномірного прямолінійного руху, він не враховується. Розрахувати його можна за формулою:

$$W_{in} = mg \cos \left(\frac{\Delta z(q)}{\Delta q} \right). \quad (5.36)$$

IV – додаткова сила зумовлена відцентровим прискоренням на дугах спряження та залежить від радіуса кривизни R_i , у профілі, тобто у вертикальній площині, що проходить через поточну точку шляху s . Вона відповідно до формули (3.4) викликає зміну ваги ТЗ під час руху на шляху змінного профілю із різним радіусом R . У самій верхній та нижній точках пагорба чи долини, залежно від швидкості руху, вага ТЗ дорівнює:

$$W_R = mg \pm m \frac{\dot{s}^2}{\frac{\partial^2 z(s)}{\partial s^2}}, \quad (5.37)$$

де радіус дуги шляху R_1 :

$$R_1 = \frac{1}{\frac{\partial^2 z(s)}{\partial s^2}}, \quad (5.38)$$

V – сила опору тертя W_T розраховується відповідно до формули (5.34).

Рівняння (5.37), яке описує залежність ваги ТЗ від швидкості руху, і кривизна профілю шляху з врахуванням (5.38) показує, що сили, які діють на ТЗ при зміні профілю шляху, залежать не тільки від геометричних параметрів шляху, а також залежать від швидкості руху. Розглядаючи рівень дороги в профілі $z(q)$ як узагальнену координату, видно, що, крім геометричних обмежень, ця узагальнена координата накладає на рух ТЗ обмеження швидкості. Фактично зв'язок ТЗ із дорогою, крім геометричних обмежень, накладає і кінематичні обмеження – залежність ваги G , отже і діючих сил опору, від швидкості руху. Такий зв'язок не можна звести до суто геометричного, тобто голономного, він є неголономними. Математично неголономні зв'язки приводять до не інтегрованих рівнянь, тобто рівнянь, які неможливо інтегрувати.

Аналогічна ситуація виникає під час вивчення руху ТЗ по дугі у плані, де сила ваги залежить від радіусу дуги та швидкості руху ТЗ. Зв'язок між ТЗ і дорогою виражається рівнянням (4.39), у яке входить швидкість руху. Цей зв'язок є також неголономним, диференційним зв'язком (залежить від швидкості), тому система зв'язків не є голомною. Під час побудови математичної моделі руху ТЗ була прийнята умова, що всі зв'язки є голономні. Фактично це не так, що ускладнює побудову й розв'язання рівнянь руху на основі рівнянь Лагранжа II роду. Питання розв'язку рівнянь такого типу розглянуто у роботі [96], де показано, що використання рівнянь перетворення Лежандра зводить рівняння руху до канонічної форми, і рівняння можна інтегрувати, застосувавши узагальнений метод Гамільтона – Якобі [97].

Використання розглянутих методів розрахунку та повне врахування залежності маси від швидкості руху за наявності неголономних зв'язків призводить до суттєвих математичних проблем і виходить за межі питань цієї роботи. Вивчення його потребує спеціальних математичних досліджень, які можуть бути виконані при подальшому розвитку теорії електричної тяги. У цій роботі, щоб обійти математичні проблеми, зроблені певні спрощення. Перше –

усі в'язі та зв'язки вважаються голономними та для аналізу використовуються рівняння Лагранжа II роду. Це спрощення зроблене для забезпечення простоти та прозорості подальших обчислень. Воно призводить до певних похибок. Величину похибок можна оцінити на основі того, що згідно з діючими будівельними нормами, які обмежують мінімально допустимі радіуси поворотів дороги та максимальні швидкості руху, вага ТЗ під час руху може змінитись максимум на 10 % [81]. Варто також відмітити, що у чинній теорії електричної тяги розглянуті питання зміни ваги під час руху навіть не виникають. У ній вага ТЗ прийнята постійною й усі розрахунки виконано за такої умови. Та що навіть наближене врахування зміни ваги ТЗ під час руху суттєво підвищить точність результатів розрахунків. Тому, врахування зміни ваги ТЗ під час тягових розрахунків вважається потрібним.

У цій роботі зміна ваги ТЗ під час руху ТЗ частково врахована. У випадку їзди ділянкою із зміним профілем враховано, що вага ТЗ є векторна сумі сили земного тяжіння та відцентрової сили. У випадку руху по шляху зі зміною ухилу зміна ваги розрахована відповідно до формули (5.37). Величину зміни ваги представлено як додаткову силу в правій частині рівнянь Лагранжа, тобто як доповнення до діючих сил.

У чинній ТЕТ враховано, що профіль шляху зумовлює додаткові сили. Це враховано шляхом спрощення профілю та інтегрування рівнянь руху на обмежених ділянках та подальшим узгодженням результатів. У роботах збірника [86, 87] для узгодження використовуються методи припасовування результатів інтегрування рівнянь руху на окремих ділянках шляху. Такий метод розрахунків достатньо громіздкий і вносить суттєві похибки у результати розрахунків. Крім того, що особливо важливо, під час таких розрахунків не ураховується характер руху на ділянках спряження різних ухилів дороги, тобто не ураховується режим проїзду пагорбів та долин. А це ділянки шляху, на яких можуть відбуватись різкі зміни режиму руху. Якщо для опису руху ТЗ використовувати рівняння Лагранжа II роду, то одержується рівняння, яке описує рух на протязі усього шляху руху, а його розв'язок враховує режим руху на перехідних ділянках.

У рівняння Лагранжа II роду входить величина потенційної енергії та її зміна вздовж шляху. Під час інтегрування рівняння ця зміна енергії автоматично враховує додаткові сили на ділянках з різним ухилом. Величина додаткових сил, які діють на ухилах, відповідає похідній від узагальнених координати $z(s)$ – рівня поверхні шляху:

$$F_z = mg \frac{dz}{ds}, \quad (5.39)$$

а на перехідних ділянках спряження ухилів – другий похідний відповідно до формули (5.37). Значення сили одержується під час запису рівнянь руху Лагранжа та на основі функції Лагранжа, у яку входить величини потенційної енергії. Враховуючи похідну потенційної енергії U від шляху по координаті s , або часткову похідну по $z(s)$, одержується величина сили (5.39). У чинній теорії електричної тяги ця сила належить до додаткових сил й визначається за величиною ухилу шляху. Тут величина та напрямок сили враховується автоматично за величиною похідної. Під час розрахунків відпадає необхідність виконувати операції спрямлення профілю та виконання окремих розрахунків для ділянок з різними значеннями ухилу.

Керівний профіль, відповідно до якого розраховують норму маси вантажного поїзда при одиночній тязі та заданій швидкості руху, визначають техніко-економічними розрахунками, враховуючи майбутній обсяг перевезень, темп зростання вантажообігу, масу поїздів і топографічні умови місцевості, а також масу поїздів на прилеглих лініях і напрямках мережі. Найчастіше керівний ухил дорівнює 6–9 ‰. У гірських умовах на нових лініях I і II категорій він може доходити до 15 ‰, на лініях III категорій – до 20 ‰, а IV і V категорій – до 30 ‰. Під час будівництва других колій зазвичай приймають керівний ухил існуючого шляху. У кривих ділянках керівний ухил повинен бути зменшений відповідно до додаткового опору руху поїзда від кривої.

Розрахунки руху ТЗ відповідно до рівнянь Лагранжа II роду дозволяють враховувати не тільки сили на прямолінійних ділянках з постійним ухилом, викликані ухилом шляху, а додатково врахувати сили на ділянках спряження ухилів різної величини, викликані зміною величини ухилу. Важливість урахування сил на ділянках спряження зумовлена тим, що під час руху на ділянках спряження виникають додаткові сили, які залежать від радіусу дуги та швидкості руху. Залежно від характеру кривих можуть виникати додаткові сили, які мають імпульсний характер. У разі різкої зміни величини ухилу, як впливає з (5.37), величина першої похідної в точці перегину шляху різко змінюється, а друга похідна має велике значення. Це відповідає додатковій силі, яка діє на ТЗ. Величина цієї сили залежить від радіуса дуги спряження ділянок шляху. Тому під час будівництва доріг, особливо залізних, відповідно ДБН ділянки різного ухилу з'єднують вставками різного радіусу, як показано на рисунку 5.5. Цей момент повинен відображатись у результатах тягових розрахунків. Практикою організації руху ТЗ на залізних та шосейних дорогах введені обмеження на будову доріг та дуг спряження за різних швидкісних режимів руху.

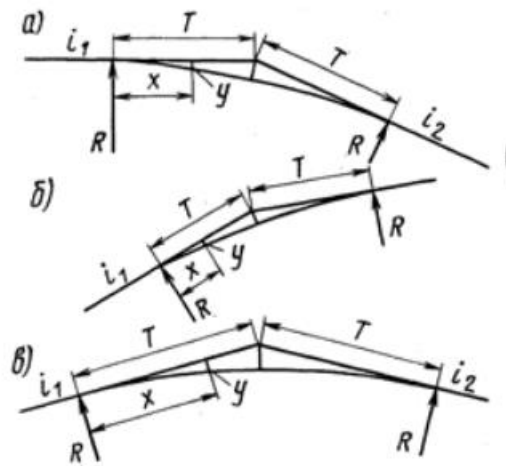


Рисунок 5.5 – Спряження елементів продовжного профілю: а – ділянки зі спуском; б – із підйомом; в – підйому зі спуском (пагорб)

Елементами спряження можуть бути рейки з постійним радіусом дуги або зі змінним перехідним радіусом. У разі безпосереднього з'єднання ділянок постійного радіуса перша похідна функції рівня $z(s)$ за шляхом s у точці з'єднання має розрив у вигляді стрибка, а друга – дорівнює нескінченності. Величина сили визначена згідно з (5.37) у точці спряження може досягати великого значення. У цій точці відбувається удар, різка зміна діючої на ТЗ сили (і відповідна реакції ТЗ на шлях). Це викликає імпульсну силу. Такі сили особливо проявляються при збільшених швидкостях руху ТЗ. Тому державними будівельними нормами залізних та автомобільних доріг встановлені допустимі величини радіусів спрямлення профілю для доріг різної категорії. Згідно з ДБН на залізницях використовується вертикальна крива спряження постійного радіуса, яка забезпечує плавний перехід рухомого складу через перелом профілю колії. Відповідно до норм [81] за максимальної швидкості руху радіус кривизни повинен бути таким, щоб вертикальне доцентрове прискорення не перевищувало величини $\ddot{s}_R = 0,2\text{--}0,3$ м/с. У розглянутому випадку доцентрове прискорення на ділянках спряження допускає зміну ваги ТЗ на величину:

$$\Delta G = \frac{\ddot{s}_R}{g} = \frac{0,3}{9,81} = 3,01 \, \%.$$

Така зміна ваги ТЗ не викликає навантажень на ходову частину, не призводить до самовільного розриву автозчеплення вагонів. Вплив її на пасажирів та їхнє самопочуття також несуттєвий. Вага кожного пасажирів змінюється. Проте зміна ваги на 3 % відповідає умовами комфортності, не

викликає суттєвих навантажень на організм та психічну систему пасажирів. Відповідно до допустимої величини вертикального прискорення ДБН уставлено радіус ділянок спряження R_e та їхню довжину залежно від допустимих швидкостей руху на залізних дорогах різних категорій. На вітчизняній залізниці радіуси кривизни ділянок спряження у профілі R_e повинні бути: 20 км – на швидкісних лініях; 15 км – на лініях I і II категорій, 10 км – на лініях III категорії і 5 км – на залізницях IV категорії. При алгебраїчній різниці ухилів суміжних елементів менше 2,0 % вертикальні криві спряження допускається не передбачати. Аналогічні вимоги встановлені й для автомобільних доріг [809].

5.9 Сили, що діють на поворотах шляху в плані

У цій роботі, під час тягових розрахунків, розглядається рух ТЗ по прямолінійному шляху без поворотів у плані. Під час виконання тягових розрахунків вважається, що шлях руху прямолінійний, а вплив сил, які виникають на поворотах, враховується введенням додаткових позитивних ухилів. Це дозволяє, з певною точністю, виконати тягові розрахунки. Проте розгляд руху на поворотах пов'язаний із рядом процесів, які потрібно обов'язково враховувати під час експлуатації ТЗ. Тому у цьому та наступному параграфі частково розглянуто питання впливу кривих шляху у плані на рух ТЗ, переважно на залізних дорогах.

До активних сил відносять зумовлені зв'язками сили, які накладають обмеження руху на характер руху ТЗ. У результаті контакту коліс із опорою – рейками чи дорожнім полотном – виникають зовнішні сили тяги та опору руху. Одним із чинників, який зумовлює характер руху, є повороти у профілі та плані шляху.

Коли транспортний засіб рухається по прямій, справедливі наведені вище формули. Під час руху на повороті дороги виникає додаткова сила, зумовлена доцентровою силою реакції зв'язків, що змушують ТЗ рухатись по кривій. Із боку шляху на поворотах дороги на ТЗ діє сила реакції опори, яка змушує ТЗ рухатись по кривій. З боку ТЗ виникає інерційна відцентрова сила, що протидіє цій силі. Під дією інерційної сили виникають механічні деформації дорожнього полотна зазвичай пружні, що змінюють напрямок руху. Сили інерції G_r подано на рисунку 3.1, а. Крім них, на дорожнє полотно з боку ТЗ діє сила земного тяжіння G_r . Разом ці сили діють на опору і є силою ваги, вагою ТЗ G . Відрізнити складові сили ваги у системі координат ТЗ, як це стверджує принцип тотожності інерційних та гравітаційних сил (3.4), не можна. З урахуванням цих сил вектор ваги ТЗ G направлений під кутом до вертикалі. Описаний розподіл сил, що діють на ТЗ, відрізняється від поданого у

навчальних посібниках із ТЕТ та монографіях (див. наприклад, рис. 3.17 [20]). На рисунку 3.1, *а* показані позначення сил, яких потрібно дотримуватись, а на рисунку 3.1, *б* застарілі, неправильні позначення. Враховано, що відповідно до визначення, вагою сила дії матеріального тіла на опору, якою для ТЗ є шлях руху.

Сила ваги як сила, що протилежна реакції опори, має вертикальний (гравітаційний) G_g і горизонтальний (інерційний) G_r складники. Інерційний складник – відцентрова сила, направлений від центра дуги шляху. Згідно з ДБН, під час побудови доріг, криві у плані розміщують повністю у горизонтальній площині. Тому відцентрова інерційна сила знаходиться в горизонтальній площині та направлена горизонтально, як показано на рисунку 5.6.

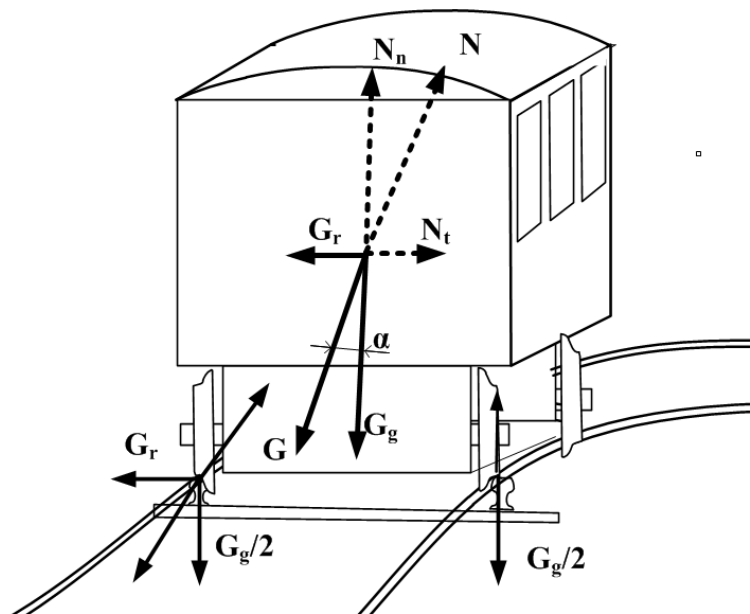


Рисунок 5.6 – Розподіл сили ваги на плоскій кривій

Вага G , під час руху на поворотах шляху, направлена під кутом до вертикалі. Відповідно сила реакції дороги N направлена протилежно до неї. Сила реакції N , як вже відмічено, може бути розбита на два складники, один з яких направлений по вертикалі N_n проти сили тяжіння, а інший по горизонталі, направлений у бік, до центра дуги повороту дороги. Цей складник є реакцією шляху N_t , яка змушує ТЗ рухатись по дугі. Він надає доцентрове прискорення ТЗ. Модуль вектора доцентрового прискорення дорівнює:

$$|\ddot{\vec{s}}| = \frac{\dot{s}^2}{r}, \quad (5.40)$$

а сила викликана доцентровим прискоренням N_r

$$|\ddot{\vec{N}}_r| = m \frac{\dot{s}^2}{r} . \quad (5.41)$$

Вираз (5.42) визначає вагу на основі принципу тотожності сили гравітації та прискорення й визначення ваги, як сили дії тіла на опору ТЗ. Ураховуючи, що вага тіла $\vec{G}$ є сума сили гравітації G_g та відцентрової сили $\vec{G}_r$, то одержуємо, що модуль сили ваги дорівнює:

$$|\vec{G}| = m \sqrt{g^2 + \left(\frac{\dot{s}^2}{r}\right)} . \quad (5.42)$$

Напрямок сили ваги визначається кутом α між вертикально направленою силою земного тяжіння та горизонтально направленою відцентровою силою, тангенс кута вектора ваги відносно вертикалі дорівнює:

$$tg(\alpha) = \frac{\left(\frac{\dot{s}^2}{r}\right)}{g} . \quad (5.43)$$

Сила доцентрового прискорення в кожен момент часу направлена перпендикулярно до напрямку руху. Вона не виконує роботи q , не змінює кінетичну енергію ТЗ, тобто рівняння Лагранжа під час руху на повороті шляху не змінюється. З умови перпендикулярності доцентрового прискорення до напрямку руху витікає, що лінійна швидкість транспортного засобу не змінюється, а змінюється тільки напрямок руху. Проявом дії відцентрової сили є зміна сил тертя, а також виникнення обертового моменту, який намагається відхилити ТЗ від вертикального положення.

У таблиці 5.1 наведено розраховані значення кута відхилення вектора ваги ТЗ α від вертикалі для залізної дороги з різним радіусом дуги повороту за різної швидкості руху поїзда. Ураховано залізні дороги для звичайних поїздів, швидкісних $V > 200$ км/год та зверх швидкісних $V > 300$ км/год.

Таблиця 5.1 – Кут нахилу вектора ваги до вертикалі, α , градус

V, км/год	V, м/с	Радіус дуги повороту, м									
		200	400	600	800	1000	2000	4000	5000	8000	10 000
30	8,3	4,1	2,0	1,4	1,0	0,8	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1
50	13,9	11	5,6	3,8	2,8	2,3	1,1	0,6	0,5	0,3	0,2
60	16,7	16	8,1	5,4	4,1	3,2	1,6	0,8	0,6	0,4	0,3
80	22,2	28	14	9,6	7,2	5,8	2,9	1,4	1,2	0,7	0,6
100	27,8	43	22	15	11,2	9,0	4,5	2,3	1,8	1,1	0,9
120	33,3		32	21	16	13	6,5	3,2	2,6	1,6	1,3
150	41,7		48	33	25	20	10	5,1	4,1	2,5	2,0
180	50,0			46	35	29	15	7,3	5,8	3,6	2,9
200	55,6				43	35	18	9,0	7,2	4,5	3,6
250	69,4						28	14	11	7,0	5,6
300	83,3						39	20	16	10	8,1
350	97,2							27	22	14	11
400	111							35	28	18	14

Як видно із таблиці, у разі збільшення швидкості поїзда кут нахилу може перевищувати 45° , тобто відцентрова сила за своєю дією на поїзд може перевищити силу земного тяжіння. Для звичайних поїздів, які рухаються зі швидкістю до 100 км/год, згідно з ДБН дорога не може мати радіус дуги менше 200 м. Для поїздів, які розвивають швидкість до 200 км/год, мінімальний радіус дуги 1 000 м, а для швидкісних поїздів радіус дуги 2 000 м і більше. По шляхах із меншим радіусом дуги та максимальними швидкостями кут нахилу сили ваги може перевищувати 45° і ТЗ буде більшою мірою викликати горизонтальне зміщення полотна дороги, ніж вертикальний тиск у напрямку поперехні Землі.

Оскільки вектор ваги поїзда на повороті направлений під кутом до вертикалі, то для компенсації дії складника ваги, направленої на зсув рейки, зовнішню рейку піднімають відносно кута повороту, її прокладають із перевищенням по висоті. Цим забезпечується кут нахилу поїзда відносно горизонтальної поверхні землі. Величину перевищення зовнішньої рейки h , для повної компенсації бокових навантаження на залізничне полотно, можна розрахувати за формулою:

$$h = l \cdot \operatorname{tg}(\beta), \quad (5.44)$$

де l – відстань між рейками для звичайних залізних доріг України $l = 1\,520$ мм.

Для зручності подальших посилань на основі (5.45) напишемо формулу визначення $tg(\beta)$

$$tg(\beta) = \frac{h}{l}. \quad (5.45)$$

Розраховані величини перевищення h , які забезпечують повну компенсацію бокових сил зсуву полотна, наведено у таблиці 5.2 для рейок стандартної ширини колії. Відстань між рейками стандартної колії дорівнює: $l = 1\,520$ мм.

У таблиці 5.2 виділені дані, які відповідають перевищенням, що виходить за межі встановлених ДБН нормативів. Розраховані значення перевищення h у деяких випадках сягають 600 мм.

Таблиця 5.2 – Перевищення зовнішньої рейки, h , мм (база 1 520 мм), яке відповідає повній компенсації відцентрового прискорення

V, км/год	V, м/с	Радіус дуги повороту, м									
		200	400	600	800	1 000	2 000	4 000	5 000	8 000	10 000
30	8,3	54	27	18	13	11	5	3	2	1	1
50	13,9	149	75	50	37	30	15	7	6	4	3
60	16,7	214	107	72	54	43	21	11	9	5	4
80	22,2	378	191	127	95	76	38	19	15	10	8
100	27,8	582	297	198	149	119	60	30	24	15	12
120	33,3		424	285	214	172	86	43	34	21	17
150	41,7		650	441	333	267	134	67	54	34	27
180	50,0			626	476	383	193	97	77	48	39
200	55,6				582	470	238	119	95	60	48
250	69,4						369	186	149	93	75
300	83,3						526	267	214	134	107
350	97,2							362	291	182	146
400	111							470	378	238	191

Згідно з правилами технічної експлуатації залізних доріг України [81] перевищення зовнішньої рейки не повинно бути більшим за 150 мм. З таблиці 5.2 видно, що під час руху звичайних поїздів зі швидкостями, з якими вони переважно експлуатуються сьогодні (порядку 80 км/год), а тим більше для швидкісних, це перевищення не забезпечує повної компенсації відцентрових сил. Виникають сили, які діють на зовнішню рейку у напрямку її зсуву. Діють вони саме на зовнішню рейку. Це тому, що реборда коліс поїзда (також

трамваю) розміщена на внутрішній частині, а зовнішня частина має конусність. Під час руху на повороті колеса зміщується в бік, протилежний від повороту, реборда зовнішнього колеса, відносно повороту, притискається до рейки, на внутрішнього внутрішню відходить від рейки. Відцентрова сила діє тільки на зовнішню рейку. Оскільки центр мас локомотива, і вагонів, розміщена вище головки рейки, на висоті приблизно 2 м, то виникає момент сили, який намагається зігнути вісь колісної пари.

Щоб запобігти виникненню бокових зусиль на рейки колію обмеження величини перевищення зовнішньої рейки бажано зняти. Тоді можна досягнути повної компенсації сили ваги. На рейки буде діяти сила направлена перпендикулярно площині зі розміщення, з врахуванням нахилу викликаного перевищенням рейки. Зникне сила зміщення зовнішньої рейки. Вагон відхилиться від горизонталі, але пасажирів будуть відчувати себе комфортно. Але при цьому виникає низка інших питань, основне – це вимушена зупинка поїзда на такій ділянці. При вимушеній зупинці весь поїзд чи окремий вагон, розміщений на ділянці з великим перевищенням, матиме великий нахил відносно горизонту. Центр ваги пасажирського вагона знаходиться на висоті близько $h_{\text{ц}} \approx 1,2$ м над рівнем головок рейок, а у вантажних вагонах приблизно $h_{\text{ц}} \approx 2$ м. [98, 99]. Якщо провести вертикаль від центра маси до рейок, то вона може вийти за габарити дорожнього полотна. Це означає, що такий вагон перекинеться. В Україні відсутні залізні дороги призначені тільки для пасажирських перевезень. Це означає, що перевищення зовнішньої рейки встановлене на рівні до 150 мм не може бути знято. Частковим рішенням проблеми є побудова поїздів, у яких вагони та локомотив на поворотах можуть нахилитись у бік повороту.

Для забезпечення швидкісних перевезень на залізній дорозі потрібно будувати окремі дороги, як наприклад залізна дорога «Shinkansen» в Японії. Необхідність побудови та реконструкції залізних доріг для забезпечення швидкісного руху в Україні зазначається в роботах [43, 46]. В них вказано, що необхідно збільшувати радіуси кривих, оскільки вони є малими і розраховані на рух зі швидкостями до 80 км/год., максимум 100 км/год.

Іншою стороною, яку потрібно враховувати це величина сили опору тертя. Некомпенсований складник сили ваги виникає при швидкісному русі на поворотах дороги. Він зумовлює збільшення сили тертя, оскільки, крім тертя кочення, виникає додаткове тертя ковзання реборди коліс по зовнішній рейці. Сили, що діють на повороті, подані на рисунку 5.7.

На рисунку 5.7 показані сили, які виникають під час руху ТЗ на кривій із перевищенням зовнішньої рейки. Кут β – це кут нахилу рейки (нахил осі

колiсної пари), обумовлений перевищенням h . Вага $\mathbf{G}$ направлена під кутом α до вертикалі. Кут α залежить від швидкості руху ТЗ і радіуса кривої. Складники сили ваги: $\mathbf{G}_g$ – гравітаційний складник, зумовлений тяжінням Землі і направлений вертикально вниз, та $\mathbf{G}_r$ – відцентровий складник, зумовлений відцентровою силою, що виникає під час руху вагону по дугі. Відцентрова сила визначається формулою (5.41).

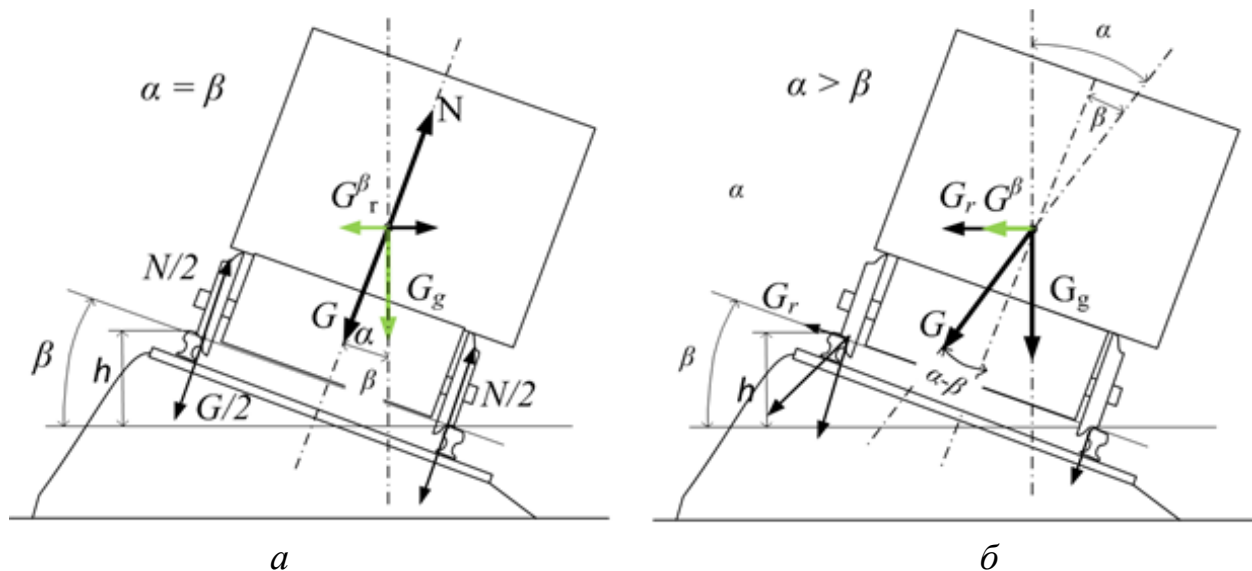


Рисунок 5.7 – Розрахунок сили тертя на кривій з компенсацією доцентрового складника ваги: *a* – повна компенсація ваги; *б* – неповна компенсація

Якщо швидкість $\dot{q}$ дорівнює величині $\dot{q}_\beta$, за якої вага $\mathbf{G}$ направлена перпендикулярно до осі колiсної пари (рис. 5.7, *a*), кут відхилення ваги від вертикалі α дорівнює куту нахилу осі колiсної пари $\alpha = \beta$. У цьому випадку відцентрове прискорення G_r^β повністю компенсується реакцією опори. Сила реакції $\mathbf{N}$ у цьому випадку направлена перпендикулярно до площини розміщення рейок. Відсутні складники, які намагаються змістити зовнішню рейку. Відсутнє тертя ковзання колiс по реборді та сила тертя пропорційна вазі поїзда, та визначається згідно з формулою (5.34).

У випадку руху поїзда з повністю компенсованої відцентровою силою доцентрова сила N_t , дорівнює складовій ваги G_r^β :

$$m \frac{(v_\beta)^2}{R} = mg \cdot \operatorname{tg}(\beta). \quad (5.46)$$

Звідки швидкість руху $\dot{s}_\beta$ визначається за формулою:

$$\dot{s}_\beta = \sqrt{R \cdot g \cdot \operatorname{tg}(\beta)}. \quad (5.47)$$

За швидкості $\dot{s}_\beta$, розрахованої згідно з (5.47), вага ТЗ діє на колеса в напрямку рейки та здійснюється вільне кочення коліс по рейці. Сила тертя кочення між рейками і ТЗ у цьому випадку збільшується порівняно до такої самої сили під часу руху по прямій. Це збільшення сили тертя зумовлене збільшенням ваги поїзда, яка визначається згідно з формулою (5.42).

Якщо швидкість ТЗ перевищує $\dot{s}_\beta$, то відбувається неповна компенсація ваги. Вага G направлена під кутом α більшим, ніж кут нахилу дороги до горизонталі $\alpha > \beta$ і повної компенсації відцентрової сили не відбувається. Некомпенсована відцентрова сила $G_r - G_\beta$ діє на колісну пару і намагається її змістити у напрямку від центра дуги. До того ж дія цієї сили розподіляється нерівномірно між зовнішньою та внутрішньою рейками. Вона зміщує колісну пару та притискає до зовнішньої відносно повороту рейки, тоді як внутрішнє колесо відходить від рейки (див. рис. 5.6, й також 5.7, б). На зовнішню рейку діє некомпенсована сила ваги, яка намагається її змістити відносно поверхні полотна дороги. А реакція опори, діючи на нижню частину реборди колеса, викликає силу, яка передається до осі колісних пар і намагається її зігнути. До того ж ця сила динамічна, оскільки колісна пара весь час обертається.

Складник сили ваги, яка направлена перпендикулярно до площини полотна дороги, діє на обидві рейки. До того ж вона також розподіляється між рейками нерівномірно, залежно від висоти центра мас вагона. На зовнішню рейку сила дещо більша, ніж на внутрішню через те, що рівнодійна сили ваги зміщена в бік зовнішньої рейки. Некомпенсована відцентрова сила викликає підвищене тертя між рейкою та зовнішнім колесом. Проте різниця сил незначна й нею можна нехтувати, а сумарна сила тертя, через лінійність формули розрахунку ваги майже не відрізняється від значення, одержаного без врахування розподілу сил ваги між рейками.

Повернемось до некомпенсованої ваги. Вона намагається змістити зовнішню рейку у напрямку від центра кривизни шляху. Між зовнішнім колесом і рейкою виникає тертя ковзання в області бокової поверхні рейки та реборди колеса. Дія всієї некомпенсованої відцентрової сили припадає тільки на зовнішнє колесо і зовнішню рейку.

Величину некомпенсованого горизонтального складника ваги $G_{нк}$, як видно з рисунка 5.7, б, можна розрахувати згідно з формулою:

$$G_{нк} = G_r - G_r^\beta = m \left(\frac{\dot{s}^2}{R} - g \cdot \operatorname{tg}(\beta) \right). \quad (5.48)$$

Коли відомо кут α відхилення вектора ваги від вертикалі (див. рис. 5.7), то величина некомпенсованої сили дорівнює:

$$G_{\text{нк}} = mg \cdot (tg(\alpha) - tg(\beta)). \quad (5.49)$$

На рисунку 5.8 наведено результати розрахунку границі компенсованого та некомпенсованого відцентрового прискорення під час руху на кривих ділянках шляху в разі допустимого ДБН [81] перевищення зовнішньої рейки $h = 150$ мм. По осі ординат наведені швидкості руху, а ординат – величина радіуса дуги.

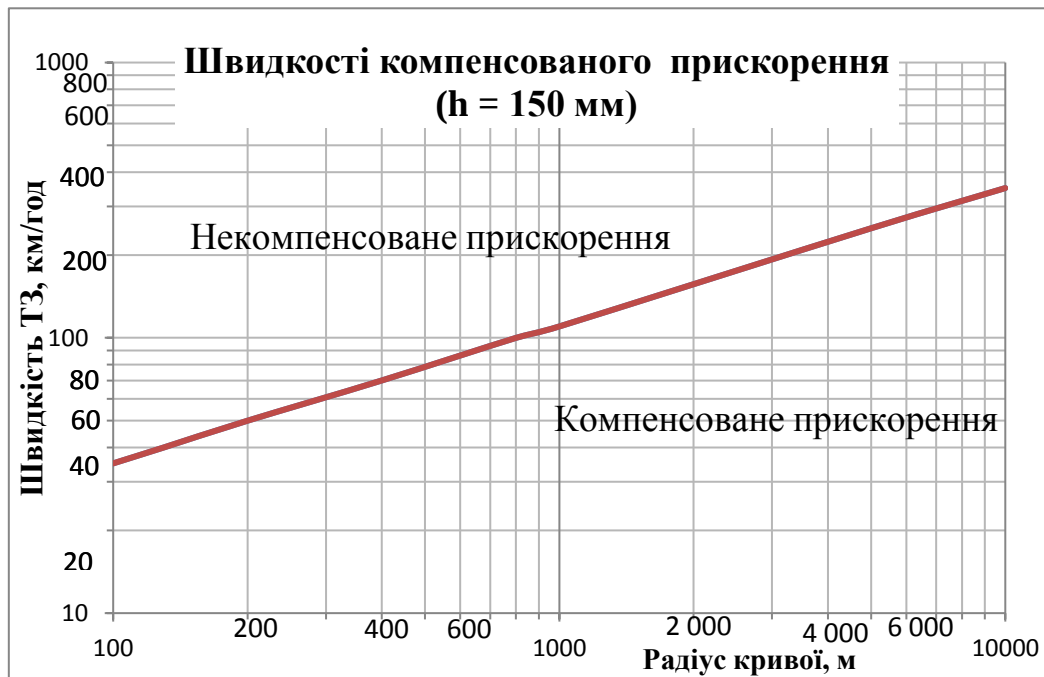


Рисунок 5.8 – Границя некомпенсованого прискорення

Неповна компенсація відцентрової сили спричиняє появу складника, направлено перпендикулярно до рейки та її бокового зміщення. Виникає додаткова сила тертя, сила ковзання. Реборд рейки під цим складником сили ваги притискується до бокової поверхні рейки й ковзає по ній. Це призводить до збільшення сили тертя та прискореного зносу рейок на поворотах. Викликані цим дефекти рейок на поворотах можуть призвести до накопчування коліс на рейку та в результаті сходу однієї колісної пари, а за нею усього поїзда з рейок.

Отже, сила тертя під час руху на кривих залежить від таких чинників: маси поїзда (локомотива чи вагона), коефіцієнтів тертя кочення – $k_{\text{ТК}}$ і ковзання $k_{\text{ТС}}$, радіуса повороту – R , швидкості поїзда – v , величини перевищення головки зовнішньої рейки відносно внутрішньої h . За результатами аналізу одержана формула розрахунку сили опору під час руху поїзда на кривій:

$$W_R = m \left(k_{TK} \sqrt{g^2 + \left(\frac{\dot{s}^2}{R} \right)^2} + k_{TC} \left(\frac{\dot{s}^2}{R} - \frac{\dot{s}_\beta^2}{R} \right) \right), \quad (5.50)$$

де k_{TK} і k_{TC} – відповідно коефіцієнти тертя кочення й тертя ковзання.

Величина опору на кривих має два складники, один із яких зумовлений тільки опором кочення, а інший опором ковзання, до того ж у випадку, якщо параметри руху знаходяться нижче границі, наведеної на рисунку 5.8, то враховується тільки опір кочення [18, 20, 21], а в іншому випадку враховується два складника. Отже, формулу розрахунку сили опору на кривих (5.50) потрібно записати у вигляді:

$$W_R = \begin{cases} m \left(k_{TK} \sqrt{g^2 + \left(\frac{\dot{s}^2}{R} \right)^2} + k_{TC} \left(\frac{\dot{s}^2}{R} - \frac{\dot{s}_\beta^2}{R} \right) \right) & \text{якщо } tg(\alpha) > tg(\beta) \\ m \left(k_{TK} \sqrt{g^2 + \left(\frac{\dot{s}^2}{R} \right)^2} \right) & \text{якщо } tg(\alpha) \leq tg(\beta) \end{cases}, \quad (5.51)$$

Одержану формулу потрібно використовувати замість емпіричної формули (5.14). Величина сили опору на кривих суттєво впливає на результати тягових розрахунків і залежить ще від низки чинників: температури, стану поверхонь, змащування рейки на повороті дороги, погодних умов руху тощо. Ці залежності досліджувались у низці робіт, у результаті чого одержано низку залежностей.

У практиці експлуатації залізних доріг України режими руху з некомпенсованим прискоренням переважають. Це зумовлено зростанням швидкостей руху та малою величиною радіусів залізничних колій. За даними Укрзалізниці (далі – УЗ), сьогодні пасажирський поїзд їде з середньою швидкістю 50 км/год, швидкісні на деяких ділянках до 95 км/год, інколи максимальна швидкість сягає 110 км/год [98]. Через рух по неякісних коліях викликає додаткове зношення рейок, колісних пар та підвищується ймовірність виникнення аварійних ситуацій, схід ТЗ з колії.

При експлуатації трамваю практично на всіх кривих руху проявляється некомпенсоване прискорення. Через малі радіуси повороту трамвайних ліній на міських вулицях виникають значні сили, які приводять до прискореного зносу трамвайних шляхів і рухомого складу. Компенсувати доцентрове

прискорення на трамвайних лініях можна тільки в разі прокладання лінії на виділеній полосі руху. У разі прокладання трамвайних ліній уздовж проїжджої частини дороги перевищення зовнішньої рейки не допускається. Іншою дією некомпенсованої ваги ТЗ на кривих є виникнення моменту сили, який намагається зігнути вісь коліс. Виникає тому, що реборда зовнішнього колеса притискається до краю рейки, у результаті чого виникає крутий момент відносно точки кріплення осі колеса. Зміщенню вагона у протилежний бік від повороту протидіє тільки реборда зовнішнього колеса, тому виникає небезпека наочування колеса на зовнішню рейку та сходження поїзда з рейок.

У разі відсутності або недостатньої компенсації відцентрового складника ваги, навантаження припадає тільки на одну реборду, та на неї додатково діє момент сили, який намагається зігнути вісь колісної пари. Сходження одного вагона, чи навіть одного колеса, призводить до сходження цілого поїзда. Для запобігання цьому необхідно виконувати жорсткий контроль усіх колісних пар вагонів та стану рейок на повороті, а саме: ступеня їхнього спрацювання та якості кріплення. Важливе значення має режим проїзду кривих і швидкість руху поїзда. Ефективною мірою запобігання сходженню поїзда на поворотах є забезпечення належної величини підвищення h зовнішньої рейки. Як видно з даних, приведених на графіку рисунку 5.8, обмеження у величині підвищення $h < 150$ мм (у метрополітені $h < 120$ мм) дозволяє компенсувати відцентрове прискорення порівняно на низьких швидкостях руху. Зараз поїзди рухаються зі швидкостями 100 км/год, 120 км/год і є постійна тенденція збільшення швидкості руху. За таких швидкостей при $h = 150$ мм повна компенсація доцентрового прискорення відбувається тільки на кривих з радіусом кривої $R > 800$ м (див. рис. 5.8). При меншому радіусі кривої поїзди, які експлуатуються сьогодні, попадають в область некомпенсованих відцентрових сил.

Некомпенсоване прискорення збільшує інтенсивність зношення рейок і коліс. Як наведено в роботі В. В. Рибкіна [99], інтенсивність зношення рейок безпосередньо залежить від правильності встановлення норм підвищення зовнішньої рейки в кривій. Зі свого боку, норми підвищення h залежать від швидкості руху, радіусу кривої та інших експлуатаційних факторів. На основі аналізу незалежних джерел встановлено, що на інтенсивність бічного зношення рейок впливає саме величина підвищення в кривих ділянках колії. Вид функції $z = f(T)$ інтенсивності зношення має вигляд, поданий на рисунку 5.9. [99].



Рисунок 5.9 – Інтенсивність бічного зношення зовнішньої рейки за різної величини підвищення h [99]

Залежність інтенсивності зношення рейок $z = f(T)$, де T – навантаження на рейку, подана на графіку рисунку 5.9, повністю відповідає наведеним вище міркуванням і одержаній формулі залежності сили тертя від параметрів рейкового шляху (5.51). Інтенсивне зношення зовнішньої рейки починається в разі потрапляння параметрів руху в зону некомпенсованого прискорення відповідно до рисунку 5.8 і лінійно залежить від величини навантаження.

5.10 Спряження кривих у плані

Наступним параметром діючих сил є їхня залежність від плану шляху та радіусу кривизни дуг спряження різних ділянок. На поворотах шляху, як розглянуто в попередньому підрозділі, виникають відцентрові сили та обертальні моменти, які діють на ТЗ. Якщо ТЗ рухається з постійною швидкістю по шляху, то у місцях поворотів і зміни радіуса дуги змінюється величина відцентрової сили, а також обертовий момент. У цьому підрозділі розглянуто вплив плану доріг та спряження кривих у плані та величину діючих сил.

Розглядаючи рух міського електричного електротранспорту (тролейбуса, трамваю, метрополітену), потрібно враховувати, що в салоні вагонів знаходяться пасажирів та часто вони займають стоячі місця. План дороги зумовлює той чи інший режим руху і, відповідно, сили, які діють на ТЗ і на пасажирів. Під час руху троллейбуса особливих питань, пов'язаних із планом та профілем дороги немає, оскільки водій на дорозі може маневрувати і рух жорстко не пов'язаний з планом дороги. Трамвай пов'язаний безпосередньо з рейковим шляхом, і цей шлях жорстко визначає умови руху. Хоча швидкості руху звичайного, не швидкісного трамваю доволі низькі, але й на таких

швидкостях деколи виникають сили, які відкидають пасажирів з одного боку в інший. Причиною цього є те, що під час побудови рейкового шляху, особливо при старих забудовах, криві спряження мають малі радіуси дуг. Відповідно до правил [82] трамвайних ліній найменші радіуси кривих у нових лініях 20 м (у деяких випадках 18 м), а в старій забудові вони ще менші. У старих забудовах прямі ділянки безпосередньо стикаються з дугами постійного радіусу. У такому випадку під час переїзду трамваєм із прямолінійної ділянки на криву майже раптово виникає відцентрова сила, величина якої може відкинути пасажирів, призвести до травмування. Ця сама сила діє на трамвай, відкидаючи передній візок відносно заднього. Водночас виникає ударна сила, яка зумовлює руйнування трамваю та вихід із ладу трамвайного шляху. Величину сили можна розрахувати згідно з формулою (5.19). Розраховані перевантаження під час такого руху наведено на діаграмі рисунка 5.10.

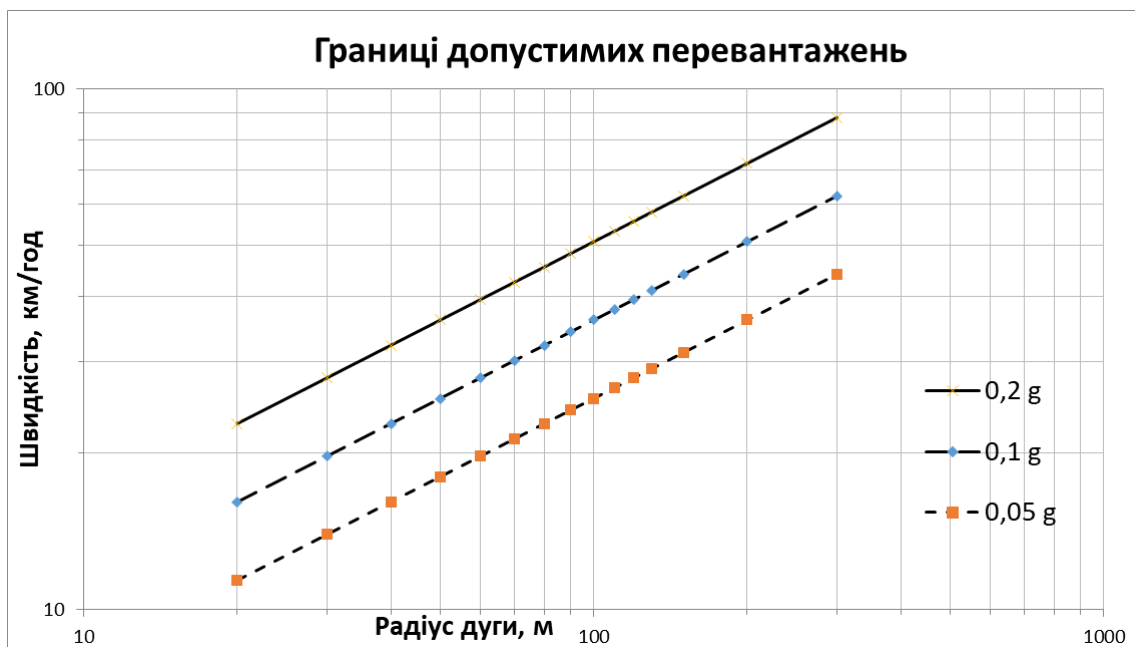


Рисунок 5.10 – Величини навантажень під час проїзду трамвая із прямолінійної ділянки на дугу постійного радіуса

Як видно з діаграми рисунка 5.10, під час проїзду трамваєм точки спряження прямолінійної ділянки з дугою постійного радіусу 20 м, вже за швидкості 11,6 км/год виникає відчутне для стоячих пасажирів перевантаження 0,05 g, а за умови швидкості 22 км/год перевантаження становить 0,2 g. Це перевантаження для пасажирів, що стоять, є боковим й за різкої його зміни пасажир може втратити рівновагу. Щоб не допустити цього, можна зменшити швидкість руху на кривих ділянках, але і так швидкість міського електротранспорту доволі мала. Для того щоб не допустити раптових великих

перевантажень, привалами побудови нових трамвайних ліній передбачені вставки, які забезпечують плавний перехід від прямолінійних ділянок до кривих. Ці вставки забезпечують спряження прямолінійних ділянок із кривими певного радіуса чи кривих різного радіуса [82].

На залізниці окремого розгляду вимагає питання входження поїзда в поворот. Будова колії буває подекуди така, що рейки прокладають по прямій, а на поворотах встановлюють рейки із заданим постійним радіусом кривизни для усього кута повороту. Під час їзди поїзда таким шляхом у місцях переходу від прямолінійного руху до руху по дугі практично миттєво виникає доцентрове прискорення й сила ваги відхиляється від вертикалі на кут, наведений в таблиці 5.1. Під час виходу з повороту аналогічна зміна напрямку сили ваги відбувається у зворотному порядку. Ця зміна напрямку дії сили ваги діє на поїзд і передається на рейки, а також діє і на пасажирів поїзда, викликаючи в них негативні відчуття. Особливо це відчутно під час руху з підвищеними швидкостями. Щоб запобігти цьому, нові залізничні колії прокладають так, що в місцях стику робиться перехідна вставка, яка забезпечує плавний перехід від прямої до дуги або між дугами різного радіуса. Плавний перехід забезпечує умови руху, за якого прискорення змінюється поступово, відсутня його раптова зміна. Між кривими з різних радіусів роблять вставки, довжина яких регламентована будівельними нормами облаштування залізних доріг ДБН [81, 83]. Типи вставок для різних варіантів кривих показано на рисунку 5.11. Розглянуте питання особливо стосується залізних доріг, по яких їздять швидкісні поїзди, а також для забезпечення прискореного руху по існуючих залізних дорогах.

Під час розрахунку та прокладання залізної дороги й вибору висоти підвищення h потрібно враховувати висота центра мас вагонів. Пасажирські та вантажні поїзди мають різну будову й висота центра мас у них різна. Для пасажирських поїздів висота центра ваги приблизно 1,2–1,5 м, тоді як для вантажних вона може бути 2 м або більшою [100, 101]. Це залежить від типу вагону, типу вантажу, який перевозить поїзд. Визначаючи підвищення h , потрібно врахувати поведінку ТЗ під час його руху та під час зупинки (вимушеній чи запланованій). Щоб не допустити перевертання поїзда за висоти центра мас 1,2 м і ширині колії 1 520 мм, тангенс кута нахилу обмежений величиною $tg(\alpha) < 0,75$, а за висоти 2 м – $tg(\alpha\beta) < 0,37$. З урахуванням цього кут нахилу не може бути більшим у роботі [94] відмічається що « $\alpha < 36^\circ$ та $\alpha < 20^\circ$ відповідно. Цим значенням відповідає підвищення $h < 519$ мм. Отже, допустимі підвищення значно більші, ніж значення 150 мм. З огляду на це доцільно було б переглянути технічні умови відносно обмеження величини підвищення h

зовнішньої рейки кривої. Потрібні різні технічні умови для побудови залізничних шляхів для вантажних і пасажирських поїздів. В Україні немає розділу залізних доріг на пасажирські і вантажні, по одних і тих самих коліях одночасно здійснюється проїзд пасажирських і вантажних поїздів. Щоб забезпечити рух високошвидкісних поїздів, необхідна побудова залізничних колій за іншими технічними умовами, ніж для вантажних перевезень. Розглянуті питання є доволі складними і на їхнє вирішення направлена низка робіт, у яких розглядаються питання експлуатації залізничних шляхів, а також і безпеки руху. Розроблено стандарти, які регулюють питання розподілу ваги та моментів сил під час експлуатації залізних доріг і методів дослідження безпеки та причин виникнення аварійних ситуацій, які можна знайти в стандартах і наукових розробках [80–90, 99]. Докладний розгляд питання виходить за межі роботи.

Розглянуті питання важливі під час проектування й побудови залізниць, проектування та виготовленні транспортних засобів: локомотивів, поїздів, трамваїв. Особливо це стосується швидкісних та надшвидкісних поїздів, побудованих на основі нових технологій та технічних рішень. Завданням цієї роботи є створення моделі руху і розрахунки техніко-економічних показників експлуатації ТЗ. Розгляд питання руху на поворотах та безпека руху є окремими завданнями, на вивчення яких спрямована низка робіт. Метою цієї роботи є розробка альтернативних методів тягових розрахунків, які усувають відмічені недоліки існуючих методів. Основані на положеннях аналітичної механіки, застосування рівнянь Лагранжа, методи досліджень є доволі перспективними, навіть необхідними та під час вивчення динаміки руху ТЗ. Вони дозволяють розробити ефективні моделі, які враховують цілий ряд параметрів таких взаємодій частин ТЗ між собою, сукупність усіх в'язів, їхню жорсткість, моменти інерції ТЗ і моменти діючих сил. На жаль, питання положення теоретичної механіки, електродинаміки, теорії електроприводу не входять у програму підготовки спеціалістів електричного транспорту у сучасних технічних університетах України та країн східної Європи, а викладання математики, фізики постійно скорочують навіть у середніх навчальних закладах.

На залізних дорогах пасажирського та вантажного руху швидкості суттєво більші, ніж на трамвайних лініях. У результаті цього сили, які виникають на дугах спряження суттєво більші. Питанню з'єднання ділянок із різним радіусом кривизни приділяється велика увага. Згідно з матеріалом приведеним в [43], основна причина обмеження швидкостей руху на залізних дорогах України є малі градуси кривих та ділянок їхнього спряження. У роботі

[94] відмічається що «в умовах українських залізниць, проблеми швидкості в двох третинах випадків пов'язані не з радіусом, а з довжиною перехідних ділянок кривих і прямолінійних вставок між суміжними кривими шляху. Отже, основну увагу потрібно приділяти радіусам кривих ділянок, та вставкам між ділянками, які підпадають до категорії залежних. На таких ділянках одна з них впливає на умови руху поїзда по іншій». Для виконання такого завдання у роботі [94] була запропонована методика визначення допустимої швидкості руху поїзда на ділянках складного плану, що передбачає покрокове виконання розрахунків залежно від типу сполучень у плані дороги в точках зміни кривизни дуги повороту. Типи сполучень, які найчастіше зустрічаються на залізній дорозі наведені на рисунку 5.11.

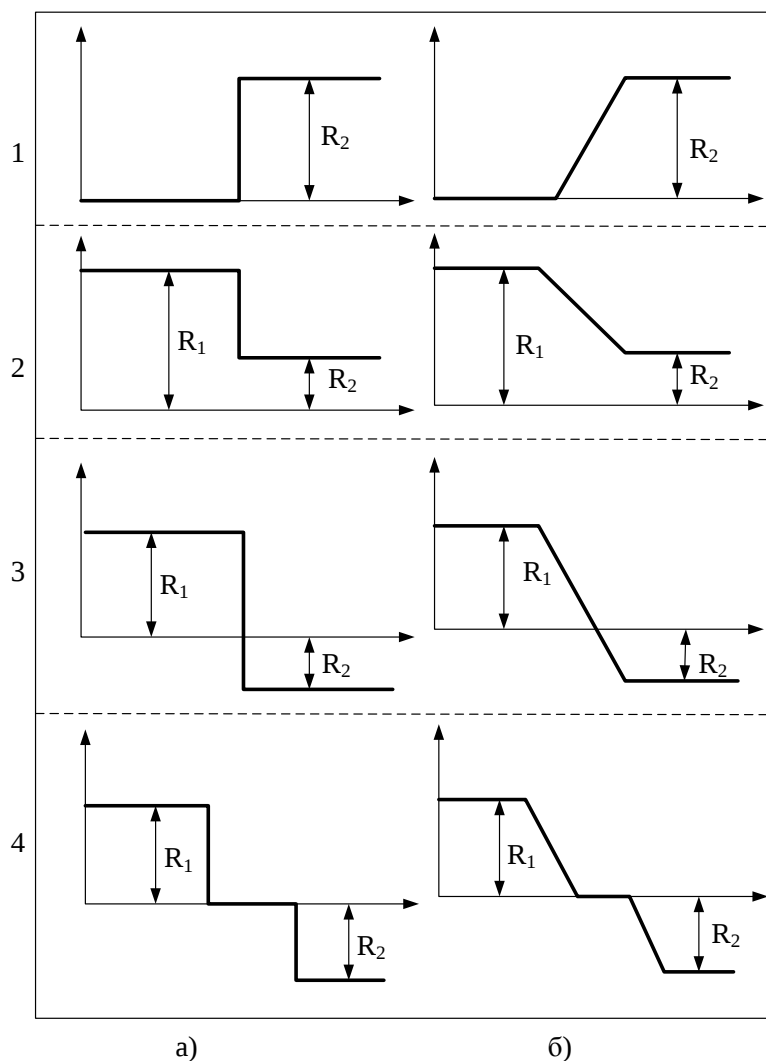


Рисунок 5.11 – Типи сполучення у плані ділянок залізничної колії:
а) – пряме з'єднання; б) – з'єднання із перехідними кривими; 1 – прямолінійна ділянка і дуга; 2 – дуги різного радіуса; 3 – дуги різних напрямків;
4 – дуги різних напрямків із прямолінійною вставкою

Як видно із рисунка 5.11, на залізних дорогах використовуються типи з'єднань ділянок, що мають дуги постійного радіуса в плані. На рисунку 5.11, а) подано сполучення дуг різного радіуса безпосередньо без перехідних кривих, а на рисунку 5.11, б) ці самі типи з'єднань із використанням вставок та кривих спряження. Рисунок 5.11, 1, а) та б) відповідає з'єднанню прямих ділянок із дугами; рисунок 5.11, 2, а) та б) – дуг різних радіусів одного і того саме напрямку; 3 – дуг різних напрямків; а на рисунку 5.11, 4, а) та б) показано більш складні з'єднання, за яких, крім ліній спряження є прямолінійні вставки. Типи з'єднань та їхні параметри: довжина ділянок спряжень l_1 , l_2 та довжина прямолінійних вставок d регламентуються будівельними нормами залізниць, трамвайних ліній та метрополітену [102–104].

Додатковим параметром, який регламентує будову залізничних колій на кривих, є перевищення зовнішньої рейки h . Під час проєктування та побудови залізниць, крім вибору величини перевищення, забезпечують його плавне зростання при заході на криву та зменшення на ділянках виходу із кривої. Порядок розрахунку й вибору побудови цих ділянок регламентується в нормативній документації та методиках [80–83, 102–104]. Залежно від типу залізних доріг та розрахункових швидкостей руху на них встановлюються нормативи: типові спряження, довжини ділянок, величина підвищення зовнішньої рейки h та крутизна зміни підвищення на протязі дуги спряження. Нормативами встановлюється низка параметрів кривих α , ψ та f , відповідно до яких розраховується допустима швидкість руху ТЗ.

Відповідно до діючої методики тягових розрахунків усі ці особливості рейкового шляху не беруться до уваги і не можуть бути врахованими. Запропоновані у цій роботі альтернативні методи тягових розрахунків дозволяють враховувати особливості шляху руху ТЗ, тому що шлях представляється неперервним, із врахуванням усіх особливостей зміни його профілю. У разі подальшої розробки запропонованих методів та включення у модель руху додаткової узагальненої координати, що описує шлях руху у плані, з'явиться можливість не тільки розраховувати техніко-економічні показники руху, але також враховувати зусилля, що діють на ТЗ і зумовлені можливими особливостями шляху. Як уже було відмічено, більш повна модель може включати ще і додаткову узагальнену змінну, якою є величина перевищення зовнішньої рейки h . Така модель є найбільш загальною і придатною для вирішення питань, пов'язаних із надійністю та безпекою руху ТЗ [90].

Розраховуючи рух ТЗ на кривих, необхідно враховувати сили, які виникають під час входження ТЗ у криву, руху по кривій та виходу з кривої. Ці

сили зумовлені формою ділянок спряження. Якщо розглядати з геометричної точки зору лінії спряження кривих, то сили, які виникають, обумовлені величиною першої та другої похідних форми кривої. Ці лінії повинні бути плавними, їхні перша та друга похідні повинні бути неперервними без розривів. Із цієї умови виходить, що форма кривих повинна описуватись лінією не менше ніж третьої степені.

Питання побудови перехідних ліній залізничних колій проглядається у низці робіт. Наприклад, у роботах [91–93] розроблені методи моделювання перехідних ліній спряження залежно від умов місцевості та радіусів ділянок, які повинні бути спряженими. Переважно розглядаються лінії третьої, четвертої степені, хоча в деяких, особливо складних випадках використовують лінії другої степені. Для вирішення форми ліній спряження зазвичай достатньо ліній третьої степені. У проєктуванні та описі плану залізничних колій, відповідно до будівельних норм [81], рекомендується використовувати сплайни третього порядку. Якщо колія залізної дороги, рейок метрополітену чи трамвайні рейки, побудовані так, що прямі ділянки плавно переходять у дуги певного радіусу, або навпаки на прямолінійні ділянки, то під час руху ТЗ у місцях з'єднання прискорення змінюється плавно і не виникає ударних сил на пристрої ТЗ, на дорожнє полотно, пасажирів і вантажі.

Розглянуті питання важливі під час проєктування й побудови залізниць та транспортних засобів: локомотивів, поїздів, трамваїв. У цій роботі завданням є створення моделі руху. Розгляд питання руху на поворотах є окремим завданням, на вивчення якого спрямована низка окремих робіт. Розглянуті питання враховуються в процесі виконання тягових розрахунків із використанням рівнянь Лагранжа. Згідно з існуючими методиками розрахунків ці питання не розглядаються. Існуючі методи тягових розрахунків у випадку руху на кривих ділянках шляху спрощують план і профіль шляху та використовують тільки формули, якими описується тільки зміна сил опору на кривих залежно від їхнього радіуса.

У продовженні цієї роботи буде виконано моделювання руху ТЗ по дорогах різного профілю та плану й розрахунки режимів руху, які відповідають вимогам експлуатації доріг з упровадженням енергоефективності.

5.11 Сили, зумовлені взаємодією транспортного засобу та навколишнього повітря

Крім рейкового шляху чи дорожнього полотна, яке визначає рух ТЗ, на них діють сили опору навколишнього повітря. Як показано в першому розділі, ці сили є основними силами опору швидкісних і надшвидкісних електричних

поїздів та інших швидкісних транспортних засобів. Розрізняють два складники, зумовлені взаємодією ТЗ з повітрям. Один із них пропорційний швидкості $k_v v$, інший її квадрату та $k_v v^2$. Коефіцієнти цих сил, які наведені у чинних підручниках і методичних посібниках тягових розрахунків, одержані шляхом математичної обробки експериментальних даних та їхнього теоретичного узагальнення.

Теорія суцільних середовищ і дослідження руху тіл у повітряному середовищі показала, що під час руху в повітряному середовищі виникають сили двох типів: в'язкого опору, зумовлені явищем перенесення, і аеродинамічні сили, зумовлені утворенням вихрових потоків. Перші сили, пропорційні відносній швидкості руху тіла й нерухомого повітряного середовища. Вона виникає у результаті тертя між шарами повітря, що захоплюються транспортним засобом і нерухомими, більш віддаленими шарами повітря [60].

$$W_B = K_B v, \quad (5.52)$$

де K_B – коефіцієнт в'язкого опору повітря:

$$K_B = \frac{\eta}{\Delta Z} S, \quad (5.53)$$

де η – в'язкість повітря, [Па·с]; S – площа поверхні, що стикається з повітрям; ΔZ – віддаль між шарами повітря, які прилягають до транспортного засобу й тими шарами, які є відносно нерухомими.

Сила в'язкості гальмує шар повітря, що захоплюється тілом і рухається разом із ним. Повітря, що безпосередньо прилягає до ТЗ, рухається з більшою швидкістю та захоплює більш повільний віддалений шар. Величина цієї сили тим більша, чим більша відносна швидкість шарів повітря й чим менша відстань між ними. Її знаходять згідно з формулою Ньютона:

$$F = \eta \frac{dV}{dZ}, \quad (5.54)$$

де $\frac{dV}{dZ}$ – градієнт швидкості направленого руху шарів повітря.

У випадку тягових розрахунків руху трамваїв і тролейбусів цю силу зазвичай не враховують, вважаючи малою [21, 28]. Під час розрахунків руху залізничних поїздів, а особливо поїздів метрополітену, ця сила є суттєвою, оскільки віддаль dz між рухомими шарами повітря, що примикають до поїзда, і нерухомими, які прилягають до стінок тунелю, є малою. Залізничний потяг має велику довжину та поверхню S , що стикається з повітрям, велика, а у випадку

метрополітену суттєвий вплив має мала віддаль ΔZ між шаром повітря, що прилягає до поїзда, та нерухомим шаром, який прилягає до стінок тунелю.

Сила аеродинамічного, або лобового опору зумовлена вихровими потоками і пропорційна квадрату швидкості. Виникає вона, коли порушується ламінарний потік повітря, і за рухомим тілом виникають вихрові потоки. За великих швидкостей переважну роль відіграє різниця тисків. Попереду тіла тиск більший, ніж позаду. Різниця сил тиску направлена проти швидкості. Розраховується величина аеродинамічної сили опору згідно з формулою [91]:

$$W_A = K_A v^2 = C_x \frac{\rho v^2}{2} \sigma, \quad (5.55)$$

де C_x – коефіцієнт лобового опору, залежний від форми тіла; ρ – густина повітря; σ – площа січення поперечного перетину.

Коефіцієнт лобового опору C_x залежить від форми тіла, яке рухається. Найменше його значення спостерігається, коли форма тіла має вигляд краплі. Оскільки величина опору за великих швидкостей залежить від форми тіла, тому першому й останньому вагонам швидкісного поїзда надають особливої аеродинамічної форми, а поверхню решти вагонів роблять якомога рівнішою. Особливо це стосується швидкісних та надшвидкісних поїздів, де сили опору повітря є основними силами опору [60].

Під час тягових розрахунків засобів електротранспорту коефіцієнти в'язкого K_B і аеродинамічного K_A опору зазвичай визначають емпірично та наводять в методичних посібниках чи в підручниках. Емпірично визначені формули залежності сил опору повітря для різних типів рухомого складу магістральних залізних поїздів наведено в [20].

Потрібно зауважити, що величина аеродинамічного опору збільшується під час руху по кривій поїздів, особливо швидкісних, через те, що поїзд вигинається й лобовий опір збільшується.

5.12 Сили Коріоліса

Розглядаючи вектор сили ваги необхідно врахувати, що напрямок дії цієї сили потрібно визначити в інертній системі координат. Якщо системою координат є поверхня Землі, то рух ТЗ задається тільки переміщенням по цій поверхні. Проте поверхня Землі не є інерційною системою відліку. Земля здійснює обертальний рух навколо своєї осі з періодом 24 год на добу і ТЗ бере участь у цьому русі. У результаті добового обертання Землі точки поверхні, розташовані на різних широтах, мають різну лінійну швидкість. На екваторі ця швидкість дорівнює 1 666 км/год, а на високих широтах, біля полюса,

швидкість зменшується до 0 км/год. Складник швидкості направлений по напрямку обертання Землі. ТЗ, рухаючись по поверхні Землі, переміщуючись з однієї широти в іншу, має швидкість Землі на цій широті. На іншій широті він має іншу швидкість, тобто одержує прискорення. Цю зміну швидкості викликає сила Коріоліса, яка є однією з інерційних сил [89]. Прояв сили Коріоліса видно на прикладі підмивання правого берега річок, які течуть у північній півкулі. Правий берег рік крутіший, ніж лівий берег, деколи він гористий, лівий пологий. У південній півкулі все відбувається навпаки. Яскравим прикладом сил Коріоліса є маятник Фуко. Сила Коріоліса діє на всі об'єкти, які переміщуються по поверхні Землі, зокрема на ТЗ. Величина її залежить від швидкості та напрямку руху, а також від широти місцевості.

На залізниці дія сили Коріоліса проявляється у різній швидкості зношення рейок. У підручнику з теоретичної механіки [60, 85, 89] вказано, що сила Коріоліса зумовлює більшу швидкість спрацювання правої рейки двоколісного залізничного шляху. Наявністю сили інерції Коріоліса пояснюється швидке зношування на двоколісних залізницях правої колії в північній півкулі, й лівої в південній півкулі [88]. У результаті дії сил Коріоліса, як відмічається в [89], «на двоколісних залізних дорогах північної півкулі внутрішня сторона правої рейки буває сильно стерта». Ще в цілій низці посібників наводяться аналогічні висновки.

Можна показати, що в південній півкулі сила Коріоліса, що діє на рухомі тіла, буде спрямована вліво щодо напрямку руху. Дисертаційна робота М. Д. Кацмана спрямована на розв'язання технічної задачі кількісної оцінки взаємодії колісної пари та рейки з урахуванням гіроскопічних, коріолісових, відцентрових, тангенційних інерційних сил і моментів під час проходження локальних нерівностей рейкового шляху [90]. Коріолісові сили у цій роботі розглядаються відносно роботи різних механізмів, у яких є взаємні переміщення одних частин по інших рухомих частинах. Питання дії коріолісових сил на залізничну колію у ній не розглядається. У інших роботах з електричного транспорту відповідь на це питання відсутня.

Величина сили Коріоліса, що діє на рейки, залежить від швидкості руху ТЗ. Тенденція розвитку транспорту полягає у постійному збільшенні швидкості руху. Звичайні поїзди сьогодні рухаються зі швидкостями 80–120 км/год. Автомобілі по автобанах Європи рухаються зі швидкостями понад 200 км/год. Швидкісні поїзди також мають швидкість понад 200 км/год, високошвидкісні – 350 км/год, а встановлений рекорд швидкості руху поїзда на залізниці 531 км/год.

З урахуванням розглянутого потрібно більш детально вивчити вплив сил Коріоліса на рух ТЗ.

На рисунку 5.12 показана земна поверхня. ТЗ рухається вздовж меридіана з точки А в точку В, зі швидкістю V . Точки А та В розміщені на широтах φ_A та φ_B одного меридіана. Векторами V_A та V_B подано швидкості обертання земної поверхні у відповідних точках. Радіуси r_A та r_B – це радіуси паралелей на відповідних широтах. R_3 – радіус земної кулі, L – довжина меридіана.

Для спрощення розрахунків приймемо, що поверхня Землі має форму сфери (не еліпсоїда обертання), тобто довжина екватора дорівнює довжині меридіана. Довжина меридіана була прийнята за перший еталон одиниці довжини – 1 метр. Згідно з визначенням 1 м дорівнює одній сорока мільйонній частці від довжини Гринвіцького меридіана. Отже, довжина меридіана L дорівнює $L = 40\,000$ км. Крім довжини меридіана, за вихідні дані розрахунку взято період обертання Землі навколо своєї осі. Земля обертається із заходу на схід, якщо дивитись з боку північного полюса. Період обертання T становить $T = 24$ год. Як ТЗ приймемо швидкісний поїзд, який рухається зі швидкістю $V = 350$ км/год від полюса до екватора.

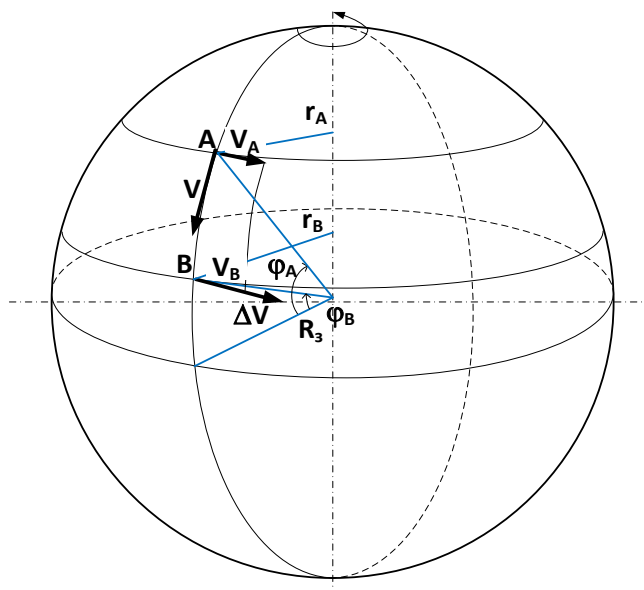


Рисунок 5.12 – Виникнення сил Коріоліса

Під час добового обертання Землі точка поверхні, яка знаходиться на екваторі, рухається зі заходу на схід із швидкістю V_E , що дорівнює:

$$V_E = \frac{L}{T} = \frac{40\,000}{24} = 1\,667 \text{ км/год.} \quad (5.56)$$

Швидкість поверхні Землі на екваторі 1 667 км/год. Точки А (див. рис. 5.12), яка знаходиться на паралелі φ_A , рухається з меншою швидкістю, оскільки під час обертального руху Землі вона здійснює рух по паралелі, довжина якої менша екватора й дорівнює.

$$L_A = 2\pi R_3 \cos(\varphi_A) , \quad (5.57)$$

де R_3 – радіус земної кулі.

Точка Б розміщена на іншій паралелі φ_B , лінійна швидкість обертального руху поверхні Землі на цій паралелі інша. ТЗ, здійснюючи рух по меридіану, переходить із точки А в точку В і бере участь в обертальному русі Землі. Швидкість обертального руху змінюється, у нашому випадку зростає, на величину:

$$\Delta L_{AB} = \frac{L_B - L_A}{T} = \frac{2\pi R_3}{T} (\cos(\varphi_B) - \cos(\varphi_A)) . \quad (5.58)$$

Збільшенням швидкості обертального руху ТЗ під час руху вздовж меридіана до екватора викликає сила Коріоліса. Величина сили Коріоліса становить:

$$F = m \frac{\Delta L_{AB}}{\Delta T_{AB}} , \quad (5.59)$$

де ΔT_{AB} – час руху ТЗ уздовж меридіана з точки А до В.

Час руху ТЗ визначимо за віддаллю між точками А та В. У формулу (5.58) входять значення широти в градусах. Виберемо ці точки на відстані 1 градус. Тоді шлях, який пройде ТЗ, дорівнює 360 частці довжини меридіана, або $L/360$. Отже, час руху ΔT_{AB} дорівнює:

$$\Delta T_{AB} = \frac{L}{360 \cdot V} . \quad (5.60)$$

Зміна швидкості на цій ділянці шляху розраховується за формулою (5.60). Тому прискорення, яке надає сила Коріоліса:

$$a_K = \frac{\Delta L_{AB}}{\Delta T_{AB}} = \frac{360 \cdot V}{T} (\cos(\varphi_B) - \cos(\varphi_A)) . \quad (5.61)$$

Зауважимо, що різниця широт $\varphi_B - \varphi_A$ дорівнює одному градусу. Формула (5.61) показує, що прискорення, яке надає тілу сила Коріоліса, не залежить від діаметра Земної сфери чи іншої кулі, вздовж якої рухається матеріальна точка, а залежить тільки від лінійної швидкості V та періоду обертання (або кутової

швидкості обертання). Цей факт справедливий за умови, що Земля є сферою, а якщо замість сфери розглядали еліпсоїд обертання а, залежність є наближеною.

Напрямок сили Коріоліса у північній півкулі в правий бік відносно напрямку руху. Це пояснюється так. Оскільки сила (див. рис. 5.12) співпадає з напрямком прискорення та направлена на схід, то реакція ТЗ, тобто тиск на опору направлений у протилежний бік, на захід, або в правий бік відносно напрямку руху ТЗ. За руху від екватора до полюса сила Коріоліса направлена на захід, реакції опори знову направлені в правий бік відносно напрямку руху. У південній півкулі буде навпаки. Прояв сили Коріоліса яскраво видно на ріках, які в північній півкулі мають круті береги справа, а течії і пологі зліва.

Значення сили Коріоліса розраховуються згідно з формулою:

$$F_K = m \frac{360 V}{T} (\cos(\varphi_B) - \cos(\varphi_A)). \quad (5.62)$$

Розраховані згідно з формулою (5.62) для ТЗ масою 1 тонна величини сили Коріоліса наведено на графіку (рис. 5.13).

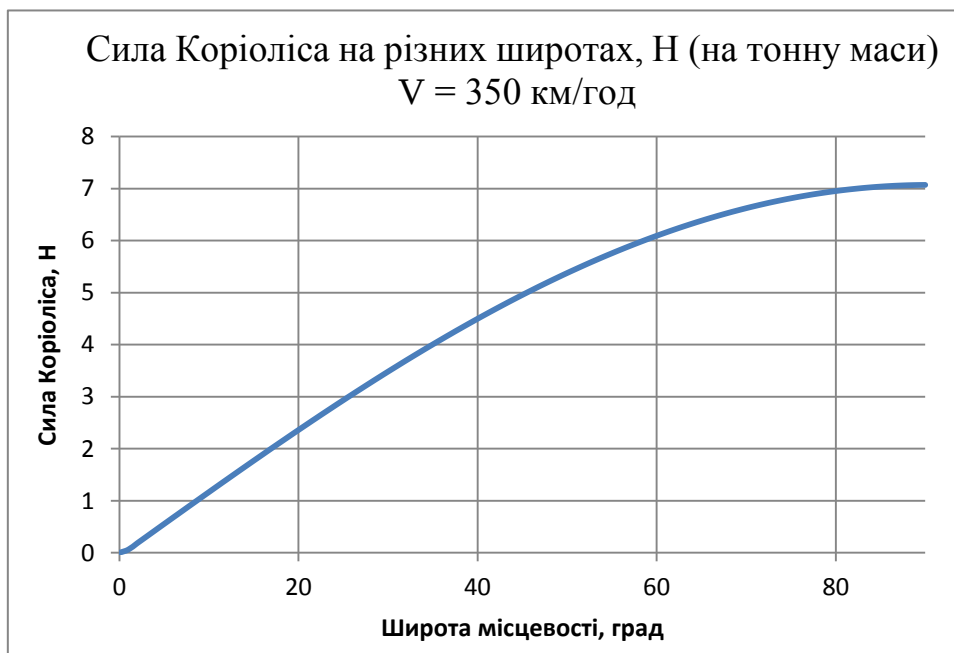


Рисунок 5.13 – Сила Коріоліса на різних широтах, Н (на тонну маси ТЗ, за швидкості 350 км/год)

Як видно з даних, наведених на графіку (рис. 5.13), величина сили Коріоліса становить максимум 7 Н на тонну маси ТЗ. Вона залежить від широти. На екваторі сила дорівнює нулю, а максимальне значення має у високих широтах, біля полюсів. Якщо ТЗ рухається під кутом β до меридіана, то сила Коріоліса буде меншою на косинус відповідного кута:

$$F_K^\beta = m \frac{360 V}{T} (\cos(\varphi_B) - \cos(\varphi_A)). \quad (5.63)$$

За результатами виконаних розрахунків визначимо вплив сили Коріоліса на силу ваги ТЗ. Максимальне значення тангенса кута відхилення ваги від вертикалі, розраховане відповідно величини зовнішніх коріолісових сил, становить:

$$tg(\alpha_K) = \frac{F_K}{mg} = \frac{7}{1\,000 \cdot 9,81} = 0,000\,71.$$

Значення кута нахилу сили ваги відносно вертикалі викликане силою Коріоліса $\alpha_K = 2,5''$, тобто 2,5 кутової секунди. Отже, порівняно з іншими силами, які впливають на рух ТЗ, сила Коріоліса достатньо мала і нею можна нехтувати.

Результати розрахунків суперечать з наведеними у низці робіт, особливо теоретичних, висновками відносно впливу сил Коріоліса на залізничний транспорт, а саме на динаміку руху та ступінь зносу рейок залізної колії та коліс рухомого складу. Величина сили Коріоліса порівняно з відцентровою силою, навіть за радіуса дуги в 10 км, є достатньо малою. Спрацювання рейок виникає з багатьох причин, деякі з яких розглянуті вище. У літературних джерелах із теорії тяги поїздів та інших джерел дослідження залізничного транспорту [20, 18, 26–29] даних про вплив сили Коріоліса не знайдено. У цьому напрямку зі спеціалістами шляховиками Харківської залізниці були проведені консультації та аналіз спрацювання рейок. Різниці у ступеню зносу лівої і правої рейок автошляхових не виявлено. Оскільки на залізниці рейки піддаються впливу певних чинників, зокрема погодних, то аналогічні дослідження проведено в Харківському метрополітені, де умови експлуатації значно кращі. Проте й там різниці у ступеню спрацювання лівої та правої рейок не виявлено, навіть на Олексіївській лінії, яка проходить майже по меридіану. У цьому напрямку проаналізовано результати досліджень, виконані різними авторами [18, 20, 26–29] безпосередньо на залізниці, що спрямовані на вивчення впливу різних чинників на спрацювання рейок і коліс поїздів. У результаті вплив сил Коріоліса на інтенсивність спрацювання рейок і коліс не виявлено. Причина, ймовіріше, полягає у малому значенні розглянутих сил і відносно не достатньо точному визначенні їхнього впливу.

Питання сил Коріоліса розглядається в роботі [90]. Проте в ній розглядається це питання не з погляду дії зовнішніх сил, зумовлених рухом ТЗ вздовж меридіана Землі, а винятково внутрішніх сил, які виникають у точках

контакту елементів конструкції швидкісного екіпажу: кузов – надресорна балка – візок – колісна пара – рейки, під дією відцентрових, гіроскопічних, коріолісових, тангенційних інерційних сил і моментів. Ці сили виникають під час руху по колії та змінюються залежно від плану, профілю та локальних нерівностей шляху. Зокрема відмічається, що коріолісові сили обумовлені коливаннями колісної пари відносно візка й суттєво впливають на безпеку руху [90].

Вплив сил Коріоліса, викликаних обертанням Землі, на роботу залізних доріг, наведений вище, в теоретичних роботах потрібно вважати завищеним. У подальших дослідженнях впливом зовнішніх коріолісових сил, як таких, що впливають рух ТЗ, будемо нехтувати. У конкретних конструкційних елементах ТЗ, типу кулісних механізмів, ці сили можуть мати суттєве значення, але їх потрібно розглядати як внутрішні в'язі. Вони зумовлюють тільки величину втрат енергії в ТЗ, і їх потрібно включати як складові сили опору.

5.13 Інші сили

Фактично сили опору мають доволі багато аспектів і точно врахувати їх не можна. Вивченню питання виникнення сили тертя та його розрахунку присвячена низка робіт [26–29]. У навчальних посібниках і методичних рекомендаціях розрахунків наводяться емпіричні формули одержані на основі практики й експериментальних досліджень, які можна використовувати для розрахунків.

На величину сили тертя впливає низка чинників. Додаткова сила тертя виникає в результаті ковзання коліс, через те що зовнішні й внутрішні колеса відносно повороту проходять різний шлях. Ковзання коліс відбувається і під час руху по прямій лінії та виникає воно через дію низки чинників, а саме вібрації й зміни моменту сили двигуна, нерівностей поверхні рейки, забруднень тощо. Сила тертя також виникає у підшипниках, у механізмах передачі обертального моменту двигуна до коліс, до того ж ці сили тертя можуть перевищувати сили тертя між колесами та рейкою. На величину сил тертя впливає кількість і ширина стиків між рейками дорожньої колії. При збільшенні ширини стиків сила тертя збільшується. Крім цього, додаткова сила тертя з'являється під час переходу від прямолінійного руху до руху по кривій через зміни положення візків, на яких кріпляться колеса. Під час прямолінійного руху ці візки розміщені в одному напрямку, а в разі руху на повороті напрямок осей передньої та наступних пар коліс відрізняється, що також впливає на величину тертя й витрат.

Одним з постійно діючих чинників є залежність сили тертя від швидкості ТЗ і зміна її в часі після початку руху. На початку руху ТЗ сила тертя спокою завжди більша, ніж сила, яка виникає під час руху. На початку руху, за час попередньої стоянки мастильні матеріали витісняються з підшипників, і це є також причиною збільшення тертя. У процесі руху підшипники краще змащуються й сили тертя зменшуються.

5.14 Гальмівні сили

Під час тягових розрахунків розглядають три режими руху, а саме: тяги, вибігу та гальмування. У режимі вибігу струм відсутній і складники, у які входить величина струму, дорівнюють нулю. Механічні втрати в двигуні залишаються, оскільки в режимі вибігу двигун механічно зв'язаний з ведучими колесами.

$$\left(m + \sum_{i=1}^n J_i \frac{\mu_i^2}{R^2}\right) \frac{dv}{dt} = mg(i + i_r) - \frac{\Delta P_M}{v} - \frac{\eta}{\Delta Z} S v - C_x \frac{\rho v^2}{2} \sigma. \quad (5.64)$$

У режимі гальмування діють сили електричного та механічного гальмування. Електричне гальмування здійснюється шляхом переведення двигуна в режим генератора та навантаження його гальмівним резистором або іншим споживачем електроенергії (режим рекуперації). У робочому режимі чи режимі вибігу двигун відмикається від контактної мережі й переходить у режим генератора. Після натискання водієм педалі гальма до нього приєднується гальмівний резистор або коло рекуперації. Вироблена ним енергія гаситься на гальмівних резисторах r_{Γ} . Потужність втрат на гальмування дорівнює:

$$\Delta P_{\Gamma} = \frac{U_g^2}{r + r_{\Gamma}} = \frac{(C\Phi\omega)^2}{r + r_{\Gamma}}. \quad (5.65)$$

Робота δA , виконана за проміжок часу Δt силою електричного гальмування, на елементарній ділянці шляху $\delta S = v \Delta t$ дорівнює:

$$\delta A = \frac{(C\Phi\omega)^2}{r + r_{\Gamma}} \Delta t. \quad (5.66)$$

Звідки величина сили:

$$B_{\Gamma} = \frac{(C\Phi\omega)^2}{(r + r_{\Gamma})v}, \quad (5.67)$$

де C – конструкційна постійна двигуна, Φ – магнітний потік, r – опір послідовного кола двигуна, r_Γ – опір гальмівного резистора (кола рекуперації).

Оскільки $\omega = \frac{\mu_D v}{R}$, то сила електричного гальмування дорівнює:

$$B_{E\Gamma} = \frac{\delta A}{\delta S} = \frac{(C\Phi\omega)^2}{(r + r_\Gamma)R^2} v. \quad (5.68)$$

Сила електричного гальмування пропорційна швидкості транспортного засобу. Для забезпечення потрібної гальмівної сили при зменшенні швидкості перемикають гальмівні резистори r_Γ та збільшують величину магнітного потоку Φ . За подальшого зменшення швидкості вступають у дію механічні гальма.

Сили механічного гальмування зумовлені притисканням гальмівних колодок до гальмівних барабанів чи гальмівного диску, залежно від конструкції гальмівної системи. Момент сили в дисковому гальмі:

$$B_{M\Gamma} = K_\Gamma W_\Gamma. \quad (5.69)$$

У разі розміщення гальмівних барабанів безпосередньо на колесі, гальмівна сила, приведена до ободу колеса, дорівнює:

$$B_{M\Gamma} = \frac{K_\Gamma W_\Gamma R_\Gamma}{R}, \quad (5.70)$$

де R_Γ – радіус гальмівного барабана та K_Γ , W_Γ – коефіцієнт тертя та сила притискання накладок гальмівних колодок.

Реалізуються сили гальмування шляхом тертя між колесами й поверхнею, по якій вони рухаються. Величина гальмівної сили обмежена коефіцієнтом тертя ковзання між колесами та полотном шляху (рейками).

У загальному вигляді рівняння руху в режимі гальмування має вигляд:

$$\begin{aligned} & \left(m + \sum_{i=1}^n J_i \frac{\mu_i^2}{R^2} \right) \frac{dv}{dt} = \\ & = mg(i + i_r) - \frac{\Delta P_M}{\mu_D v} - \frac{\eta}{\Delta Z} S v - C_x \frac{\rho v^2}{2} \sigma - B_{E\Gamma} - B_{M\Gamma}. \end{aligned} \quad (5.71)$$

5.15 Обертальний рух транспортних засобів

Крім поступального ТЗ здійснює обертний рух. На поворотних, в планах дороги від повертається навколо вертикальної осі, під час руху по дорогах зі складним профілем він нахиляється відповідно до величини ухилів, під час їзди

по дорозі, де є перевищення рейки, він нахиляється відносно горизонту. Згідно з чинної ТЕТ під час тягових розрахунків обертальний рух ТЗ не враховують.

Першою причиною є те, що з точки затрат електроенергії цей рух відіграє другорядну роль. Він несуттєво впливає на швидкість руху, на економічні показники і його вплив можна врахувати шляхом корекції коефіцієнтів, які входять у рівняння руху.

Другою причиною є складність питань розрахунку обертального руху. Рівняння Ньютона при цьому не ефективні. Є цілий ряд чинників, які ускладнюють розрахунки. Тому такі розрахунки не виконують, вважається, що обертовий рух не має відношення до тягових розрахунків. Проте обертовий рух суттєво впливає на якість роботи ТЗ, комфорт поїздки, можливість перевезення різних товарів, а також на безпеку руху [90].

Оскільки обертальний рух ТЗ впливає на якість роботи ТЗ, на безпеку руху, тому розгляд його потребує детального вивчення. Чи враховувати цей рух під час тягових розрахунків питання скоріше техніки виконання розрахунків. Складність тягових розрахунків, які виконуються відповідно чинної ТЕТ, не дозволяє включити розгляд обертального руху в коло завдань, які повинні виконуватись під час тягових розрахунків. Прийнята найпростіша модель ТЗ як матеріальної точки не дає можливості враховувати складові обертального руху. Інша ситуація виникає під час виконання розрахунків згідно зі запропонованими альтернативними методами. Вони дозволяють виконати такі розрахунки з відносно невеликими затратами праці, то чому їх не виконати, чи хоча б розглянути можливості виконання.

Характер обертального руху залежить від параметрів ТЗ та визначається характеристиками шляху і станом дороги, по якій він рухається. Рух ТЗ загалом є складним, що складається з поступального та обертового рухів.

Згідно з теоремою про зміну кінетичної енергії [91], якщо тіло здійснює складний рух, то такий рух можна розглядати як суперпозицію двох простих рухів – поступального руху центра мас зі швидкістю $\dot{s}$ та обертального руху з кутовою швидкістю ω . Кінетична енергія T визначається як сума кінетичної енергії поступального руху та кінетичної енергії обертального руху:

$$T_{\omega} = \frac{(m + m_e)\dot{s}^2}{2} + \frac{J_o \omega_o^2}{2}. \quad (5.72)$$

Ця теорема дає можливість розглядати окремо поступальний та обертальний рухи. У чинній ТЕТ вона є обґрунтуванням спрощеного виконання тягових розрахунків, без врахування обертального руху. У цій роботі виконано більш розширений підхід та розглянуто доповнення тягових розрахунків.

Модель ТЗ, яка дозволяє врахувати обертальний рух ТЗ, наведена на рисунку 5.14. ТЗ представлений як матеріальне тіло, яке має конкретні геометричні розміри і, крім поступального руху, здійснює обертальний рух відносно трьох осей. Ці осі позначені так: ϕ – вертикальна вісь ТЗ, направлена перпендикулярно полотну дороги, відносно неї ТЗ здійснює обертання в плані під час руху по кривих ділянках із радіусом r . Поперечна вісь ТЗ ψ – направлена перпендикулярно напрямку руху в площині полотна дороги (вважається, що площа полотна дороги враховує перевищення зовнішньої рейки). Навколо цієї осі ТЗ здійснює обертовий під час зміни рівня шляху в профілі – z , галопування, нахил відповідно ухилу дороги. Поздовжня вісь – ϑ відносно якої ТЗ боковий нахил, зумовлений перевищенням зовнішньої рейки на повороті та нахилом шосейної дороги, який деколи допускається під час її будівництва (5.45).

На рисунку 5.14 вказано величини головних моментів тензора інерції для кожної з відмічених осей і напрямки обертального руху відносно цих осей: ϑ , ϕ , ψ .

Кут нахилу ТЗ на поворотах ϑ зумовлений величиною перевищення h зовнішньої рейки відносно внутрішньої. Він заданий формулою (5.44) і розглянутий на рисунку 5.14 як ϑ – кут нахилу осі колісної пари.

Кут галопування, або нахилу поздовжньої осі відносно профілю шляху ψ відповідає ухилу дороги й визначається як зміна рівня шляху. У практиці виконання тягових розрахунків [22] прийнято використовувати величину ухилу проміле. Ухил ділянки шляху відповідає похідній рівня по шляху:

$$\lambda = \frac{\partial z(s)}{\partial s}, \quad (5.73)$$

де λ – нахил ТЗ на повороті, він співпадає з ухилом шляху і ‰, інша літера для позначення використана тому, що ухил прийнято визначати у проміле ‰, крім того ТЗ має амортизатори, здійснює повздовжні коливання і його нахил змінюється.

Звідки кут нахилу поздовжньої осі ТЗ дорівнює:

$$\psi = \arctg(\lambda) = \arctg\left(\frac{\partial z(s)}{\partial s}\right). \quad (5.74)$$

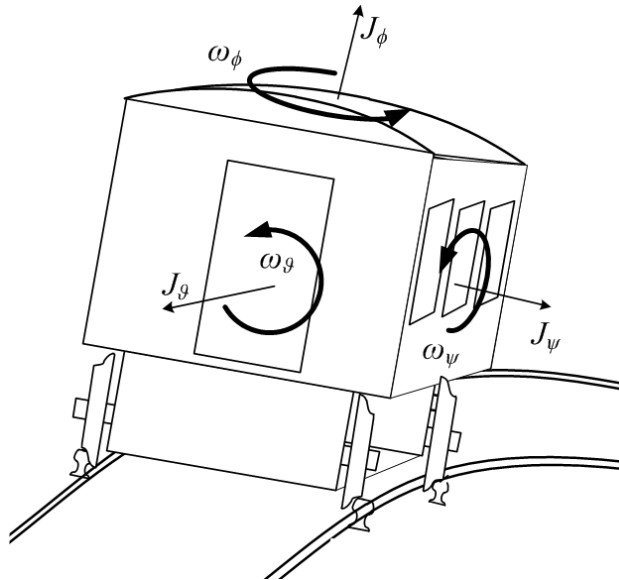


Рисунок 5.14 – Обертальний рух ТЗ

Наступною координатою є кут розвороту ТЗ в плані дороги ϕ . Це обертання здійснюється відносно вертикальної осі ТЗ під час руху по кривих ділянках шляху. Величина його становить

$$\phi = \frac{s}{r}. \quad (5.75)$$

Відповідна кутова швидкість

$$\dot{\phi} = \frac{\dot{s}}{r} - \frac{s}{r^2} \dot{r}. \quad (5.76)$$

Отже, для опису динаміки ТЗ по шосейній дорозі, а також трамваїв відповідно моделі 5.14 маємо 3 узагальнені координати відповідно до формули (5.76). Крім трамваїв можна розраховувати і рух залізничних поїздів на ділянках, де рейки встановлені на одному рівні.

Розглядаючи кути нахилу, ми бачимо, що два із трьох параметрів, а саме кут повороту ϕ на кривих та кут галопування ψ , залежать від параметрів шляху s, z, r . Отже, ці кути не є незалежними й повністю враховуються узагальненими координатами. Кут бокового нахилу ϑ , який відповідає перевищенню зовнішньої рейки h , розглянутими параметрами шляху не визначається. Його необхідно розглядати як незалежну змінну, яка може визначатись конструктивним елементом залізничного шляху. Тому визначаючи степені вільності ТЗ необхідно додати додатковий степінь вільності, а саме перевищення зовнішньої рейки відносно кута повороту. Це перевищення можна визначати розміром h в метрах, або величиною кута ϑ , розрахованого за

формулою (5.47). Перевищення зовнішньої рейки встановлюється переважно на залізних дорогах швидкісного руху, тому для виконання тягових розрахунків швидкісних поїздів потрібно враховувати чотири степені свободи. Їхніми узагальненими координатами є s, ϑ, ϕ, ψ відповідно до моделі, поданої на рисунку 5.14.

Загалом вивчення кінетичної енергії тіла при довільних кутових швидкостях обертання розраховують з урахуванням тензора інерції згідно з формулою:

$$\frac{J_0 \omega_0^2}{2} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 J_{i,j} \omega_i \omega_j, \quad (5.77)$$

де $J_{i,j}$ – тензор інерції матеріального тіла відносно заданої точки обертання із дев'яти компонентів, ω_i, ω_j кутові швидкості відповідно до кожної осі обертання: $i, j = (\vartheta, \phi, \psi)$.

Розрахунок за формулою (5.77) підлягає спрощенню, якщо розглянуті на рисунку 5.14 осі обертального руху проходять через центр мас і взаємно перпендикулярні. Для ТЗ, у першому наближенні ці осі можна вважати осями симетрії. Вони у просторі утворюють ортогональний векторний базис. Компоненти цього базису є ортогональні одиничні вектори $\mathbf{e}_\vartheta, \mathbf{e}_\phi, \mathbf{e}_\psi$. Кут повороту ϕ ТЗ має складові розкладу вектора повороту по ортогональному базису. Вектором повороту $\boldsymbol{\phi}$, як загально прийнято, є вектор, що розміщений вздовж осі обертання:

$$\vec{\phi} = \vartheta \vec{e}_\vartheta + \phi \vec{e}_\phi + \psi \vec{e}_\psi. \quad (5.78)$$

Кутову швидкість обертового руху $\boldsymbol{\omega}$ завжди можна представити у вигляді розкладу по векторному базису:

$$\vec{\omega} = \dot{\vec{\phi}} = \dot{\vartheta} \vec{e}_\vartheta + \dot{\phi} \vec{e}_\phi + \dot{\psi} \vec{e}_\psi. \quad (5.79)$$

Відповідно кутову швидкість обертового руху ТЗ $\boldsymbol{\omega}_0$, яка входить у рівняння (5.77), подамо у такий спосіб:

$$\vec{\omega}_0 = \vec{\omega}_\vartheta + \vec{\omega}_\phi + \vec{\omega}_\psi, \quad (5.80)$$

де для спрощення запису введені позначення $\vec{\omega}_\vartheta = \dot{\vartheta} \vec{e}_\vartheta, \vec{\omega}_\phi = \dot{\phi} \vec{e}_\phi, \vec{\omega}_\psi = \dot{\psi} \vec{e}_\psi$.

Тут $\vec{\omega}_\vartheta$ – кутова швидкість відносно поздовжньої осі рейки на дугі $\vec{\omega}_\phi, \vec{\omega}_\psi$.

Обертний рух матеріального тіла описується тензором інерції. Загалом тензор інерції ТЗ має дев'ять компонент:

$$J_{i,j} = \begin{vmatrix} J_{\vartheta\vartheta} & J_{\vartheta\phi} & J_{\vartheta\psi} \\ J_{\phi\vartheta} & J_{\phi\phi} & J_{\phi\psi} \\ J_{\psi\vartheta} & J_{\psi\phi} & J_{\psi\psi} \end{vmatrix}, \quad (5.81)$$

де $J_{\vartheta\vartheta}$, $J_{\phi\phi}$, $J_{\psi\psi}$ – діагональні елементи тензора, $J_{\vartheta\phi}$, $J_{\vartheta\psi}$, $J_{\phi\psi}$, $J_{\phi\vartheta}$, $J_{\psi\vartheta}$, $J_{\psi\phi}$, – недіагональні елементи, причому: $J_{\vartheta\phi} = J_{\phi\vartheta}$, $J_{\vartheta\psi} = J_{\psi\vartheta}$, $J_{\phi\psi} = J_{\psi\phi}$. Отже, тензор інерції є асиметричним тензором другого рангу, має 6 незалежних компонентів.

Кінетична енергія обертального руху ТЗ визначається за формулою (4.77) [91]. Для розрахунку кінетичної енергії потрібно розрахувати шість моментів інерції ТЗ. Проте асиметричний тензор інерції завжди може бути приведений до діагонального вигляду. Тензор інерції має діагональний вигляд, якщо осі обертання є головними осями інерції. Якщо для спрощення розрахунків ТЗ, наприклад тролейбус чи вагон поїзда, розглядати як паралелепіпед, то головними осями його будуть поздовжня вісь, вертикальна вісь і горизонтальна вісь, перпендикулярна до напрямку руху, як показано на рисунку 5.14.

Практично всі ТЗ мають симетрію відносно поздовжньої осі. Для таких тіл однією з головних осей симетрії є поздовжня вісь, що проходить через центр маси. Отже, з достатнім ступенем наближення ТЗ можна представити як тіло, головними осями симетрії якого є осі, що відповідають (див. рис. 5.14), тобто розглянутим осям (ϑ , ϕ , ψ). Відповідно до цих осей тензор інерції набирає діагонального вигляду:

$$J = \begin{vmatrix} J_{\vartheta} & 0 & 0 \\ 0 & J_{\phi} & 0 \\ 0 & 0 & J_{\psi} \end{vmatrix}, \quad (5.82)$$

де J_{ϑ} – момент інерції відносно продовжної осі, що проходить через центр маси;

J_{ϕ} – момент інерції відносно вертикальної осі;

J_{ψ} – момент інерції відносно горизонтальної, поперечної осі.

Тут прийнято, що центр маси знаходиться в центрі уявного паралелепіпеда. Це майже так, тільки по вертикалі центр мас знаходиться ближче до шасі ТЗ. Не порушуючи загального підходу до розрахунків, можна

прийняти висоту ТЗ як рівну подвійній віддалі висоті центра маси до поверхні, над якою він рухається.

Діагональні елементи моменту тензора є головними моментами інерції ТЗ, вектором з трьома компонентами J_0 . Кутові швидкості обертального руху ТЗ відносно них – це розглянуті нами три величини (ω_ϑ , ω_ϕ , ω_ψ). У такому разі формула розрахунку кінетичної енергії (5.77) спрощується:

$$\frac{J_0 \omega_0^2}{2} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 J_i \omega_i^2. \quad (5.83)$$

Або, в прийнятих позначеннях:

$$\frac{J_0 \omega_0^2}{2} = \frac{1}{2} (J_\vartheta \omega_\vartheta^2 + J_\phi \omega_\phi^2 + J_\psi \omega_\psi^2). \quad (5.84)$$

Отже, кінетична енергія має складові, які відповідають кожній з координат базисного вектора.

Осі обертального руху ТЗ вибрані взаємно перпендикулярними так, що моменти інерції відносно цих осей J_ϑ , J_ϕ , J_ψ , є головними моментами інерції ТЗ. З огляду на вибір осей системи координат та моменти інерції відносно них є діагональними моментами тензора, а система координат – головною. У цій системі координат потенціальна енергія обертального руху ТЗ виражена формулою (5.84) [61].

Кутові швидкості ω_ϑ , ω_ϕ , ω_ψ відповідно кутів ϑ , ϕ , ψ повністю залежать від ділянки, якою здійснюється рух ТЗ, та швидкості руху $\dot{s}$. Визначимо ці залежності.

Кутові швидкості ω_ϑ , ω_ϕ , ω_ψ відповідно кутів ϑ , ϕ , ψ повністю залежать від ділянки шляху, по якій здійснюється рух та швидкості руху ТЗ $\dot{s}$.

Перший складник кінетичної енергії відповідає координаті ϑ . Базисний вектора обертального ϑ руху визначає нахил ТЗ відносно поздовжньої осі. Залежить від перевищення зовнішньої рейки або поперечного нахилу дорожнього полотна. Він виражається координатою h залізничного полотна, або відповідним кутом нахилу полотна дороги. Відповідна швидкість

обертального руху відносно цієї координати визначена як ω_g . Кінетичної енергії обертального руху T_g :

$$T_g = \frac{1}{2} J_g \omega_g^2. \quad (5.85)$$

Кут поворот ТЗ у горизонтальній площині відносно вертикальної осі базисного вектора ϕ зумовлений рухом по дугі і виражається через елемент шляху Δs та радіус кривої в точці r :

$$\Delta \phi = \frac{\Delta s}{r}, \quad (5.86)$$

де r – радіус кривої в точці з координатою s .

Кутова швидкість під час ТЗ відносно осі ϕ базисного вектора:

$$\omega_\phi = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta s}{r} \right) = \frac{\dot{s}}{r} - \frac{s\dot{r}}{r^2} = \frac{\dot{s}r - s\dot{r}}{r^2}. \quad (5.87)$$

Кінетична енергія, яка відповідає координаті ϕ базисного вектора обертального руху:

$$T_\phi = \frac{1}{2} J_\phi \left(\frac{\dot{s}r - s\dot{r}}{r^2} \right)^2. \quad (5.88)$$

Формула (5.88) відповідає імпульсній зміні кінетичної енергії, яка відбувається на ділянках спряження дуг шляху різного радіусу. На прямих ділянках шляху $1/r = 0$, а на дугах постійного радіуса r незмінна і її похідна дорівнює нулю $\dot{r} = 0$. У точках з'єднання дуг різного радіуса, а також з'єднанні прямолінійних ділянок шляху, з дугами згідно (5.88) одержуємо безконечність. Це означає, що виникають ударні зусилля, які негативно впливають на ТЗ і на рейковий шлях. Щоб врахувати їх величину сил потрібно врахувати пружні властивості шляху та конструкцій ТЗ. Тільки спрощений розрахунок, а в нашому розрахунку не враховуються пружність, дає значення рівні безконечності. Проте спрощений розрахунок вказує проблемні місця на які слід звернути увагу. У практиці побудови залізних доріг у місцях спряження дуг різних радіусів роблять вставки, ділянками спряження, кривизна яких змінюється плавно, щоб похідна форми кривої не мала розривів. Для забезпечення плавності руху ТЗ необхідно, щоб форма лінії вставки була

такою, щоб неперервними були перша і друга похідні лінії спряження, тобто лінія вставки описувалась принаймні поліномом третьої степені, як показано на рисунку 5.11. У практиці будови залізниць, як було відмічено, установлені рекомендації до форми та довжини ділянок спряження. Практика побудови трамвайних шляхів знає випадки, коли спряження кривих здійснюється без вставок. Такі місця з'єднання є проблемними і у них відбувається прискорене руйнування рейкового шляху, та негативний вплив на вагони трамваїв.

Під час виконання тягових розрахунків сили, які виникають у місцях спряження кривих ділянок шляху, не враховують. Їх імпульсна дія на швидкісні та енергетичні показники руху практично не впливає. Вважається що рейковий шлях побудовано відповідно рекомендацій нормативної документації.

Третій складник обертального руху є поворот, який здійснюється у профільній площині на опуклих чи увігнутих ділянках шляху. Він зумовлений обертання ТЗ відносно горизонтальної осі перпендикулярно напрямку шляху на кут ψ . Профіль дороги ми описуємо координатою рівня $z(s)$, а кут нахилу в промілі, як величинами ухилів λ_i (i ‰), ділянок Δs , розміщених вздовж шляху. Відповідно до ДБН профіль шляху має ділянки з ухилами, які з'єднані дугами спряження постійного радіусу. Мінімально допустимі радіуси дуг спряження у профілі приведені у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Радіуси дуг спряження

Параметр	Мінімально допустимі радіуси дуг спряження у плані та профілі залізної дороги залежно від швидкості руху поїздів										
Швидк. км/ГОД	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30
Швидк. м/с	36,1	33,3	30,6	27,8	25,0	22,2	19,4	16,7	13,9	11,1	8,3
Ухил $\lambda_{\max}$, ‰	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	100
План, $R_{\min}$, м	1 000	800	700	600	450	300	225	150	100	65	30
Профіль, опуклий $R_{\min}$, м	15 000	12 000	11 000	10 000	9 000	8 500	5 500	3 500	2 000	1 000	500
Профіль, увігнутий $R_{\min}$, м	4 400	3 700	3 200	2 600	2 100	1 700	1 300	1 000	700	500	300

Кінетична енергія, яка відповідає координаті ψ базисного вектора обертального руху дорівнює:

$$T_{\psi} = J_{\psi} \left(\frac{d^2 z}{ds^2} \dot{s} \right)^2 \quad (5.89)$$

Одержані рівняння (5.97), (5.88) і (5.89) виражають кінетичну енергію обертового руху в узагальнених координатах. Відповідно (5.83) отримуємо:

$$T = \frac{J_0 \omega_0^2}{2} = \frac{1}{2} \left(J_{\vartheta} \omega_{\vartheta}^2 + J_{\phi} \left(\frac{\dot{s}r - s\dot{r}}{r^2} \right)^2 + J_{\psi} \left(\frac{d^2 z}{ds^2} \dot{s} \right)^2 \right) \quad (5.90)$$

Наступна складова кінетичної енергії пов'язана з узагальненою координатою $\mathbf{r}$, тобто відповідає поступальному руху по кривій. Згідно з принципом Д'аламбера кінетична енергія визначається віртуальною роботою, виконаною за можливого переміщення вздовж узагальненої координати. Зміна кінетичної енергії системи дорівнює сумі робіт на цьому переміщенні всіх зовнішніх і внутрішніх сил, прикладених до системи: відповідає узагальненій координаті $\delta A = \delta \mathbf{s} \cdot \mathbf{r}$, тобто елементарна робота дорівнює скалярному добутку елементарного переміщення. У нашому випадку кінетична енергія не змінюється, оскільки вектори швидкості і радіуса вектора $\mathbf{r}$ взаємно перпендикулярні і їхній скалярний добуток дорівнює нулю. Через ортогональність кінетична енергія на кривих не входить в лагранжіан і входить тільки в сили опору.

$$T\mathbf{r} = 0. \quad (5.91)$$

Отже, вважаємо, що кінетична енергія ТЗ відповідає формулі. Потенціальна енергія

$$U = mgz, \quad (5.92)$$

де z – висота центра мас ТЗ відносно точки відліку.

Отже, лагранжіан має такий вигляд:

$$L = \frac{m + m_e}{2} s^2 + \frac{1}{2} \left(J_{\vartheta} \omega_{\vartheta}^2 + J_{\phi} \left(\frac{\dot{s}r - s\dot{r}}{r^2} \right)^2 + J_{\psi} \left(\frac{d^2 z}{ds^2} \dot{s} \right)^2 \right) - mgz. \quad (5.93)$$

Одержане значення лагранжіану, відповідно методів теоретичної механіки, з врахуванням узагальнених сил, використовується для

одержання рівняння руху та тягового розрахунку, а також для вирішення інших завдань аналізу руху транспортного засобу.

Зауваження. Залізнична колія в плані має три типи елементів: прямі, дуги та ділянки спряження від s_i до s_{i+k} . На прямих ділянках величина кривизни $K = \frac{1}{r}$ нульова, на дугах радіус постійний $r = const$, і похідна радіуса $\dot{r} = \frac{\partial r}{\partial s}$ дорівнює нулю. На ділянках спряження радіус r змінюється за певним законом: лінійним чи квадратичним. На прямих і дугах із постійним радіусом узагальнені швидкості $\dot{r}$, λ , $\mathcal{J}$ дорівнюють нулю. Вони відмінні від нуля тільки на ділянках спряження. На ділянках плану відрізняються від нуля тільки швидкості r та $\mathcal{J}$, на дугі профілю тільки λ . Згідно з ДБН під час будівництва залізниці суміщати дугу спряження в плані з дугою в профілі не рекомендується.

Висновки до розділу

Для вивчення динаміки руху ТЗ та розрахунку електричної тяги виконано аналіз сил, що діють на ТЗ. Розділ містить 15 параграфів, у яких розглянуто основні сили. Показано, що кожна із розглянутих сил проявляє себе по-різному. Ці сили різні за своєю природою, мають різну величину, та у різному ступені впливають на рух ТЗ. У кожному підрозділі розглянуто, на які саме параметри руху впливають конкретні сили та запропоновані математичні моделі для аналізу результатів дії цих сил. Виконаний аналіз показав, що деякі сили впливають на швидкість руху, час руху та величину енергозатрат. Інші стосуються будови й конструкції транспортних засобів. Ще інші визначають вимоги до залізничних та шосейних доріг. Більшість сил визначає безпеку руху та надійність експлуатації ТЗ [90].

Виконаний аналіз виділяє низку напрямків досліджень, які розгалужуються на більш конкретні завдання. Ці завдання об'єднує метод досліджень, який полягає у використанні механіки Лагранжа. Він передбачає побудову концептуальних моделей ТЗ та вивчення взаємодії між виділеними елементами ТЗ. Для математичного опису взаємодій розраховують кінетичну та потенціальну енергію взаємодіючих елементів, обирають узагальнені координати та узагальнені сили і розв'язують диференціальні рівняння руху. Аналіз здійснюється за допомогою математичного апарату рівнянь Лагранжа. У такий спосіб може бути удосконалена теорія електричної тяги і приведена до єдиного математичного базису. Використання механіки Лагранжа дозволяє суттєво спростити розгляд питань аналізу руху ТЗ та розширити коло завдань, які підлягають теоретичному аналізу.

Підводячи підсумки розділу, потрібно виділити основні сили, які безпосередньо пов'язані із цілями роботи. Коло виділених завдань може бути вирішене послідовно. Спочатку потрібно розглянути найпростіші завдання, а потім перейти до більш складних. Метод Лагранжа для цього передбачає створення та аналіз різних концептуальних моделей. Найпростіша модель динаміки ТЗ як матеріального тіла подана на рисунку 3.3. Ця модель враховує узагальнені координати, приведені у формулі (5.12).

Узагальненими силами, які зумовлюють динаміку руху ТЗ, відповідно до представленої моделі, є консервативні та дисипативні сили. Консервативні сили зумовлюють збереження механічної енергії. Дисипативними, або неконсервативними є сили, які викликають перетворення енергії в інші види та її розсіювання. Сили Лоренца, які діють в провідниках тягового двигуна є неконсервативними. Вони перетворюють електричну енергію, яка надходить до двигуна з електричної мережі, чи від власного джерела енергії, в механічну та зумовлює його рух ТЗ. Дисипативні сили – це сили опору, які призводять до втрат енергії, розсіювання її в просторі. Дисипативні сили проявляють себе по-різному, вони не тільки є причиною втрат енергії, небажаними силами, а у багатьох випадках є корисними, виступають як рушійні сили та регулятори режимів руху.

Серед консервативних сил потрібно виділити сили, що зумовлюють режими руху, а саме сили, які викликають перетворення потенціальної енергії в кінетичну а також потенційної енергії обертального руху в енергію поступального руху та зворотні перетворення. Це, насамперед, сили тяги, які супроводжують перетворення кінетичної енергії ротора двигуна в енергію обертального руху коліс та кінетичну енергію поступального руху ТЗ в цілому. Вони виникають на ободі ведучих коліс та супроводжують процеси перетворення кінетичної енергії обертального руху ротора двигуна в поступальний рух ТЗ. Вони супроводжуються зі дисипативними силами. Вилами тертя, які приводять до часткової втрати механічної енергії.

Результатом тягових розрахунків є: графіки зміни швидкості руху вздовж маршруту, часу руху, величини струму і зміни її під час руху, а також результати розрахунку витрат електроенергії на перевезення. Результати розрахунків та залежності використовуються: для вибору оптимальних режимів руху, розробки графіків руху ТЗ, вибору оптимальних режимів руху вздовж маршруту із врахуванням критеріїв часу руху та величини енергозатрат. Під час тягових розрахунків враховують сили: тяги, основного і додаткового опору та гальмівні сили.

Відповідно до завдань механіки розглядають питання енергетики руху, роботи тягового електропривода, керування його роботою та характеристики руху в тяговому й гальмівному режимах. На основі результатів вивчення здійснюється оптимізація режимів руху ТЗ за різними параметрами.

Тягові розрахунки є теоретичною основою наукової дисципліни «Теорія електричної тяги». За результатами тягових розрахунків організовується робота електричного транспорту загалом. Розраховують рух транспортних засобів, складають маршрутні карти, визначають витрати електроенергії. Проектування і розробка транспортних засобів здійснюється на основі тягових розрахунків. Будівництво транспортних доріг і розробка вимог до організації руху також опирається на тягові розрахунки. Тому питанню тягових розрахунків надається велика увага: видаються навчальні посібники, методики, інструкції, проводять наукові дослідження. Теорія електричної тяги є одним із наукових напрямків, з якого присвоюються вчені ступені.

6 ТЯГОВІ РОЗРАХУНКИ

6.1 Вступ

Тягові розрахунки є основою наукової дисципліни: «Теорія електричної тяги». За результатами тягових розрахунків організовується робота електричного транспорту загалом. Розраховують рух транспортних засобів, складають маршрутні карти, визначають витрати електроенергії. Проектування та розробка транспортних засобів здійснюється на основі тягових розрахунків. Будівництво транспортних доріг і розробка вимог до організації руху також опирається на тягові розрахунки.

Тягові розрахунки є основою проектування тягової мережі доріг із зовнішнім електричним живленням. Розрахунки навантаження мережі, розміщення тягових підстанцій, ліній електропередачі виконуються на основі результатів тягових розрахунків [40]. Результати розрахунків дозволяють уточнити параметри тягової мережі та вибрати оптимальний варіант її модернізації.

У сучасному електричному транспорті все ширше упроваджуються системи автоведення, комп'ютерного керування рухом. Такі системи завжди опираються на результати тягових розрахунків. Тільки досконалі та ефективні методи тягових розрахунків можуть забезпечити можливість керування рухом ТЗ. Вони дозволяють передбачити події, які можуть відбутися при тій чи іншій керуючій дії і прийняти ефективне вирішення в конкретній дорожній ситуації.

У попередніх розділах показано, що рух ТЗ по криволінійних ділянках шляху призводять до зміни його ваги. Зміна ваги ТЗ призводить до відповідної зміни сили тертя і відповідної зміни режимів руху. На поворотах малого радіуса, за великих швидкостей руху, вага ТЗ змінюється в 1,5–2 рази. Відомі методи розрахунків не дозволяють враховувати цю зміну ваги та відповідної зміни сили опору. Це призводить до неточності результатів розрахунків, помилок які при цьому виникають. Особливо це відчутно при збільшенні швидкостей руху ТЗ, які в залізничному транспорті уже досягають та перевищують 100 км/год.

Практична експлуатації ТЗ потребує удосконалення методів розрахунку, збільшення точності одержаних результатів, спрощення методів розрахунків й зменшення затрат праці. Крім цього експлуатація сучасних ТЗ ставить ряд додаткових завдань, які ТЕТ не розглядає. Запропонований, новий для теорії електричної тяги, метод розрахунків, який ґрунтується на рівняннях Лагранжа II роду, направлений на збільшення точності та розширення кола питань, які вирішуються з їхньою допомогою.

6.2 Виконання тягових розрахунків відомими методами

У цьому розділі розглянуто загальний порядок виконання тягових розрахунків відповідно до відомих методів. Ці методи засновані на рівняннях Ньютона та теоремі Кеніга про кінетичну енергію. У разі використання відомих методів тягових розрахунків порядок розрахунків має такі основні етапи:

- вивчення та аналіз характеристик ТЗ;
- аналіз та підготовка параметрів шляху та розбиття його на розрахункові ділянки;
- аналіз і представлення діючих сил;
- складання рівняння руху для кожної розрахункової ділянки;
- послідовного розв’язання ланцюга одержаних рівнянь;
- узагальнення, об’єднання результатів та одержання загального розв’язку режиму руху;
- використання загального розв’язку для вирішення конкретних практичних завдань для ТЗ різної маси, що рухаються за вказаним маршрутом.

6.2.1 Аналіз та підготовка параметрів шляху та розбиття його на розрахункові ділянки

Аналіз та підготовка параметрів шляху є необхідним, важливим етапом підготовки до виконання тягових розрахунків, згідно з відомими методами. Він полягає у вивченні всіх особливостей шляху, вздовж якого здійснюється рух ТЗ, його спрощенні та приведенні до вигляду, зручного до інтегрування. Сутність його полягає у тому, що весь шлях руху розбивається на розрахункові ділянки, упродовж яких інтегруються рівняння руху. За основу підготовки параметрів шляху, наприклад залізної дороги, беруть нормальний поперечний профіль шляху та його план, який міститься у технічній документації будівництва чи реконструкції шляху. Зразок профілю залізничного шляху наведено на рисунку 6.1 [81]. Для шосейних доріг беруть аналогічний документ відповідно до [83].

Нормальний профіль залізничного шляху, згідно з чинною документацією [81], копія якого приведена на рисунку 6.1, має горизонтальний масштаб (2 см = 1 км) і вертикальний (масштаб 2 мм = 1 м). На ньому наносять проєктний профіль земляного полотна та план лінії, кілометраж, осі роздільних пунктів і відстані між ними, вхідні і прохідні сигнали, вхідні стрілочні переводи з зазначенням відстані до них від осі зупинних пунктів, шляхові будівлі, переїзди, штучні споруди.

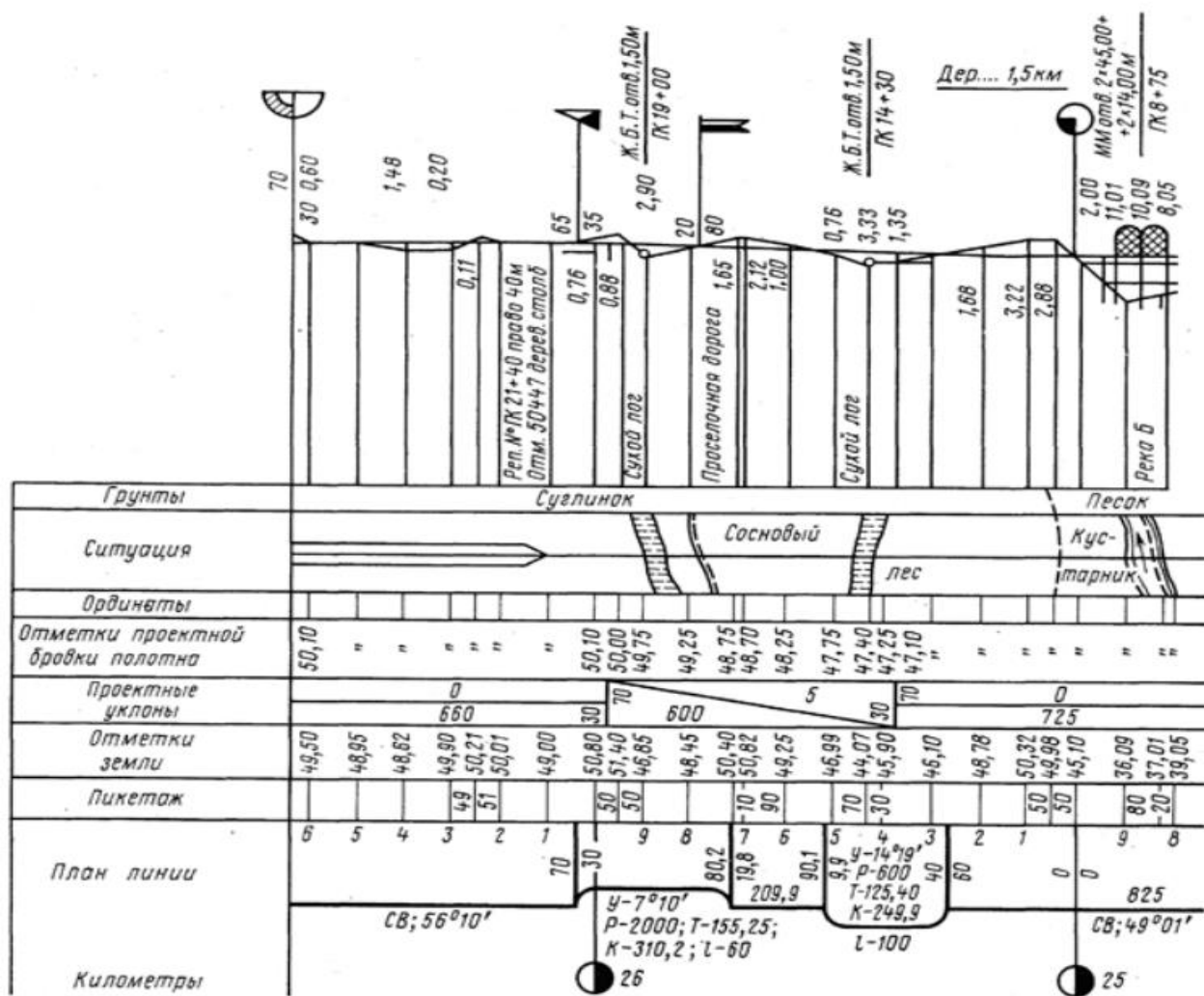


Рисунок 6.1 – Копія нормального поздовжнього профілю залізниці [81]

Як показано на рисунку 6.1, для кожного елемента профілю похилою лінією вказують проєктні ухили. Ухили елементів у проміле показані над лінією, а довжина в метрах – під лінією. Цифри, у вертикальних ліній, що розмежовують елементи профілю, показують відстані до найближчих пікетів. Над проєктними ухилами розташована графа, у якій вписані позначки висоти земляного полотна. Вони відраховані від того самого незмінного рівня, і наносяться з двома десятковими знаками, тобто вказують рівень полотна з точністю в 1 см. Пікети вздовж полотна дороги розміщені через кожні 100 м. Вище зображені дані про ситуацію прилеглої місцевості на 100 м в обидва боки від осі шляху (дороги, ріки, ліс, чагарники, поля тощо, а також населені пункти і схеми шляхів, роздільних пунктів, дані про ґрунти земної поверхні. Над цією лінією розташований власне поздовжній профіль. Отримана ламана лінія представляє проєктний поздовжній профіль земляного полотна. На лінії

профілю, крім того, відзначені осі переїздів, розташування колійних будівель, штучних споруд і роздільних пунктів.

Крім цього, нормальний поздовжній профіль шляху містить і план шляху, у якому вказано розміщення дороги на території. На плані представлені лінійні ділянки шляху та криві. Криві представлені дугами постійного радіусу, на яких вказано кутовий розмір дуги та її радіус.

Крім нормального профілю, у технічну документацію входить скорочений поздовжній профіль. Він має менший масштаб 1 : 5 000 і у ньому деталі профілю дещо спрощені. Якраз із його використанням виконують спрямлення профілю шляху та приведення шляху в плані. Спрямлення шляху передбачає заміну декількох суміжних елементів реального профілю одним елементом із постійним ухилом і довжиною, що дорівнює сумарній довжині об'єднаних елементів.

Додатково, до операції спрямлення профілю, виконують операцію приведення профілю. Приведення профілю – це заміна кривих профілю фіктивними підйомами, рівноцінними по величині роботі сил опору руху. При цьому величину сил опору представляють емпіричними формулами, еквівалентного ухилу шляху i_c , у проміле (i_c , ‰), у які входять довжини кривих та радіуси кривизни дуг шляху. Після приведення план шляху представляється прямою лінією. У роботі [22] наведена методика спрямлення та приведення шляху і розрахункові формули. Наведена також умова перевірки адекватності спрямленого профілю, його кожного j -го елемента.

$$s_j \leq \frac{2\,000}{|\Delta_j|}, \quad (6.1)$$

де s_j – довжина будь-якого елемента реального профілю: $|\Delta_j| = |i'_c - i_j|$ – абсолютна величина різниці між ухилом спрямленого та j -го елемента. Тут дотримано позначень [22] і величинами i'_c та i_j позначено ухил ділянки в проміле.

На основі спрощеного представлення шляху у вигляді прямої лінії записують рівняння руху й виконують тягові розрахунки як для залізничного, так міського електричного транспорту: трамвая, тролейбуса, метрополітену. [18–23, 25–29]. Вказаний метод приведення профілю та виконання розрахунків з його використання є трудомістким. Результати виконаних розрахунків надто спрощені і не дозволяють отримати повної інформації про особливості руху ТЗ. Як показано у цій роботі ці спрощення не є необхідними. Для залізничних колій використання таких спрощень виправдовується тим, що розглянуті операції не потрібно виконувати кожен раз, оскільки профіль і план шляху змінюється

тільки в разі перебудови чи реконструкції шляху. Профіль і план шляху, потрібний для розрахунків, відображені в проєктній документації як залізних, так і автомобільних доріг. [100] На залізниці, згідно з правилами експлуатації, він регулярно перевіряється під час топографо-геодезичних робіт, а також під час виконання робіт із реконструкції, капітального ремонту та інших, що викликають зміну плану та профілю.

У міському електричному транспорті профіль шляху подають аналогічно у вигляді послідовних ділянок із певним ухилом [18, 20, 21]. Ділянки, для яких виконано спрощення та приведення профілю, подаються як розрахункові з постійними ухилом. Для кожної з них складають рівняння руху з урахуванням діючих сил та режиму руху ТЗ. Рівняння послідовно розв'язуються з врахуванням початкових умов, одержаних після розв'язання кожного попереднього рівняння. У результаті одержується загальний розв'язок рівняння руху для усього маршруту.

6.2.2 Аналіз і подання діючих сил тяги

Для виконання тягових розрахунків визначають діючі сили та подають їх у зручному для інтегрування вигляді. У розділі 5 детально розглянуто сили, які діють на ТЗ під час руху, окрім сил тяги двигуна, які розглянемо далі.

Для виконання тягових розрахунків характеристики двигуна подають відповідно до режимів його роботи. У ТЗ використовують електродвигуни різних типів: постійного струму, асинхронні двигуни, вентильні двигуни тощо. В одному ТЗ може бути один або декілька тягових двигунів. Кожен ТЗ має свою систему керування, за якій змінюється схема приєднання двигунів, їхні режими роботи. Для конкретизації розгляду питання врахування характеристик двигуна розглянемо приклад системи керування рухом тролейбуса типу ЗиУ 682Г із двигуном ДК-210А-3 та реостатною системою керування. Система керування тролейбуса забезпечує роботу двигуна у 18 позиціях регулювання. Під час руху тролейбуса позиції перемикаються автоматично, а деякі із них водієм шляхом натискання педалі швидкості. Педаль швидкості має чотири положення. У кожному положенні змінюється схема під'єднання двигуна: перемикаються обмотки двигуна і змінюється величина магнітного потоку. Крім цього, за допомогою контролера керування, у автоматичному режимі, по мірі розгону тролейбуса, перемикаються реостати, послідовно увімкнуті в коло якоря двигуна, та змінюється величина їхнього опору. У такий спосіб у колі якоря двигуна ступенями приєднується додатковий опір. Разом із тим змінюється механічна та електромеханічна характеристики двигуна й коефіцієнт корисної дії. У посібнику [79] наведені характеристики

електричного двигуна типу ДК-210А-3 для всіх позицій регулювання. Спрощено характеристики двигуна в основних режимах роботи, для значень коефіцієнта ослаблення магнітного поля $\alpha = 100 \%$, 53% та 31% , наведені в таблиці 6.1. Механічна та електромеханічні характеристики двигуна приведені до ободу ведучих коліс діаметром $D = 1\,070$ мм, за напруги на вході двигуна $U = 550$. Вони враховують передавальне число трансмісії $\mu = 11,3$.

Таблиця 6.1 – Характеристики електропривода тролейбуса ЗіУ 682Г приведені до ободу ведучих коліс

Двигун ДК-210А-3 при $\mu = 11,3$								
$\alpha = 100 \%, I_{\text{ш}} = 2,7 \text{ А}$			$\alpha = 50 \%, I_{\text{ш}} = 1,7 \text{ А}$			$\alpha = 31 \%, I_{\text{ш}} = 0,5 \text{ А}$		
v , км/год	F , кН	η , %	v , км/год	F , кН	η , %	v , км/год	F , кН	η , %
32,25	2,55	80,75	38,00	1,96	79,00			
29,25	4,5	85,25	34,50	3,72	83,50			
27,00	6,66	88,00	32,25	5,39	87,50			
24,00	11,65	89,00	29,00	9,2	89,70	63,00		
21,50	16,65	88,50	26,75	13,0	89,50	54,00	6,56	88,00
20,00	21,6	87,50	25,20	17,0	88,50	48,00	9,1	88,75
18,60	27,0	86,00	24,00	21,6	87,25	43,25	11,95	88,25
17,50	33,1	84,25	22,75	26,2	85,75	40,00	15,0	87,50
16,75	39,5	82,25	22,00	31,4	84,50	38,00	18,0	86,25

Керування рухом тролейбуса здійснюється за допомогою реостатної системи керування. Система керування перемикає опори в колі живлення двигуна та змінює величину магнітного потоку. Зміна магнітного потоку відбувається в чотирьох положеннях педалі швидкості, яку перемикає водій. Це такі положення: «Маневрове», «Хід 1», «Хід 2» та «Хід 3». У маневровому положенні відбувається хронометричний пуск, тобто автоматичне перемикання послідовно включених опорів, за якого прискорення руху тролейбуса не залежить від профілю шляху й завантаження, а змінюється ступенями $0,3\text{--}0,4 \text{ м/с}^2$ від 0 м/с^2 до $1,4\text{--}1,8 \text{ м/с}^2$. Тривалість цього руху $1\text{--}2$ секунди. Кінцева швидкість близько $1,1\text{--}1,4 \text{ м/с}$. За цей проміжок часу тролейбус проходить приблизно 1 м . Максимальне прискорення тролейбуса на прямолінійній ділянці шляху $1,3 \text{ м/с}^2$ [79].

У положенні «Хід 1» здійснюється автоматичний розгін тролейбуса на 14 реостатних позиціях за 100% магнітного поля двигуна. У положенні «Хід 2» здійснюється 50% ослаблення магнітного поля, а в режимі «Хід 3» значення магнітного потоку двигуна становить 31% . Іншими режимами руху є

режими вибігу та гальмування, які відбуваються за вимкненого з джерела живлення двигуна. Характеристики двигуна для кожного положення педалі керування наведено в таблиці 6.1. Ці характеристики, під час тягових розрахунків, задають у рівняння руху для кожної спрощеної ділянки шляху та приводять рівняння руху до питомих одиниць, надаючи їм загальний вигляд, поданий формулами (1.4) та (1.5).

Як пускові діаграми використані механічна та електромеханічні характеристики двигуна ТЗ, приведені до ободу ведучих коліс [18, 20, 22]. Механічна характеристика становить залежність моменту на валу двигуна від його швидкості, а електромеханічні – залежності моменту сили на валу двигуна від струму та швидкості від величини струму. Ці характеристики зазвичай приводять до ободу ведучих коліс. Їх подають відповідно до режимів керування, які може вибрати водій під час руху.

У режимах вибігу та гальмування рух ТЗ здійснюється за відімкненого від мережі живлення двигуна. У цих режимах двигун відімкнений від мережі живлення, але не від'єднаний від трансмісії та ведучих коліс ТЗ. Двигун працює й виконує певні функції.

В усіх наступних положеннях педалі водія спочатку відбувається хронометричний пуск, тобто автоматичне перемикання та розгін на реостатних позиціях до природної тягової характеристики двигуна. У положенні «Хід 1» здійснюється автоматичний розгін тролейбуса на 14 реостатних позиціях за 100 % магнітного поля двигуна. У положенні «Хід 2» здійснюється 50 % ослаблення магнітного поля, а в режимі «Хід 3» значення магнітного потоку двигуна становить 31 %. Іншими режимами руху є режими вибігу та гальмування. Характеристики двигуна задані в табличному вигляді [79] за вказаних значень магнітного потоку. Крім наведених у таблиці 6.1 характеристик, використовують характеристики для кожної із 18 позицій. Ці характеристики задають лінійними відрізками механічної характеристики, оскільки рух у цих позиціях контролера відбувається протягом коротких проміжків часу за відносно незначної зміни швидкості.

6.2.3 Інтегрування рівнянь руху та вирішення практичних завдань

Після аналізу діючих сил, та результатів спрощення шляху складають окремі рівняння руху. Кожне рівняння описує рух ТЗ на виділеній ділянці з постійним ухилом, врахуванням результатів спрямлення, а також режимів роботи двигуна. Рівняння приводять до питомих одиниць діючих сил. Одержують ланцюжок диференціальних рівнянь уздовж усього маршруту руху. Після цього виконують інтегрування усього ланцюжка рівнянь. Для кожної

наступної ділянки враховують результатів інтегрування попереднього рівняння як початкові умови. В навчальних посібниках та методах розрахунків зазвичай рекомендують використовувати графоаналітичні методи, оскільки рівняння нелінійні. Наявність комп'ютерів дозволяє використовувати числові методи обчислень. Результат розрахунків оформляють як характеристики руху ТЗ на вибраному маршруті. Для вирішення конкретних поставлених завдань використовують одержаний режим руху та вносячи поправку на конкретну масу ТЗ, які здійснюють рух.

Описаний метод розрахунків є гро містким та наближеним. Точність розрахунків суттєво зменшується при збільшенні швидкостей руху ТЗ.

6.3 Виконання тягових розрахунків відповідно до запропонованого методу з використанням механіки Лагранжа

6.3.1 Основні етапи тягових розрахунків відповідно до запропонованого методу

Розглядаючи запропонований метод тягових розрахунків із використанням рівняння Лагранжа II роду, позначимо його основні етапи та відмінності від відомих методів.

Переходячи до запропонованого методу, змінюється не тільки порядок виконання та його етапи, а цілі та завдання розрахунків, можливості їх виконання. Якщо відомі методи тягових розрахунків розглянуті в джерелах передбачають тільки визначення швидкості руху та витрат електроенергії упродовж шляху і опис зміни цих параметрів під час руху ТЗ, то запропонований метод є універсальний і передбачає вирішення значно широкого кола завдань дослідження руху ТЗ. Крім отримання наведених вище залежностей, він дозволяє додатково аналізувати процеси перетворення енергії, виконувати аналіз руху з врахуванням дорожніх знаків, спеціальних частин тягової мережі, вивчати особливості руху під час зміни напруги живлення. Ураховувати процеси керування рухом ТЗ водієм. Визначати сили, які діють між елементами ТЗ. Додатково вивчати обертальний рух, коливання елементів ТЗ, досліджувати процеси перетворення електричної енергії в механічну та теплову та втрати енергії тощо.

Враховуючи широке коло завдань, які дозволяє вирішити запропонований метод, першим етапом дослідження є визначення та конкретизація завдань розрахунків і розробка математичної моделі, яка у повній мірі відповідає меті та завданням їхнього проведення.

Відповідно до завдань розрахунків на першому етапі розробляють та уточнюють модель транспортного засобу. ТЗ є складною матеріальною, системою, до складу якої входить низка вузлів. Під час визначення завдань розрахунків у моделі потрібно врахувати ті аспекти взаємодії між вузлами ТЗ – матеріальними точками, взаємодія між якими безпосередньо відноситься до проблематики досліджень. На основі попереднього аналізу уточнюють модель, знаходять модель, яка найповніше відповідає поставленим завданням. Після побудови моделі визначають степені свободи руху й, відповідно до них, вибирають узагальнені координати та визначають узагальнені сили.

Наведений перший етап є найголовнішим, творчим етапом досліджень. Подальші етапи – це виконання встановлених дій та алгоритмів, що приводить до потрібного результату, за умови чіткого визначення завдань і адекватності побудованої моделі.

Якщо обмежити завдання розрахунків тільки питаннями, які передбачають відомі методи тягових розрахунків, то достатньо обмежитись самою простою моделлю. Для визначення швидкості руху та витрат електроенергії упродовж шляху і опису зміни цих параметрів під час руху модель ТЗ містить кузов, електродвигун, трансмісію, колеса. При цьому відомі режими роботи двигуна, його електромеханічні характеристики. Додатково задано опис маршруту руху та вимоги до режимів руху вздовж маршруту.

У цій роботі обмежимось відміченим колом завдань. Перш за все розгляд цих завдань є необхідним, початковим етапом подальшого розвитку теорії електричної тяги в наміченому напрямку. Вони у повній мірі включають усі питання, які вирішує чинна ТЕТ, які розглянуті у відомих джерелах [18–23, 25–29, 86–87]. Запропоновані методи розрахунків не тільки охоплюють коло завдань чинної ТЕТ, але вони суттєво спрощують розрахунки, при суттєвому збільшенні їх точності. Вони дозволяють виявити додаткові чинники, що діють на рух ТЗ, наприклад, сили які виникають на ділянках спряження просторових криволінійних ділянок шляху, врахувати зміну ваги під час руху ТЗ, отже і зміну сил опору. Чинна ТЕТ взагалі не признає того факту, що вага ТЗ під час руху змінюється, у ній в основі усіх розрахунків помилково прийнято незмінну вагу ТЗ.

Виконання завдань тягових розрахунків, заснованих на використанні рівнянь Лагранжа II роду, передбачає такі етапами:

- постановка завдань дослідження, вибір концептуальної моделі
- детальний аналіз характеристик ТЗ і підготовка до виконання розрахунків;

- аналіз особливостей руху, методів його опису, узагальнених координат та узагальнених сил;
- розрахунок кінетичної та потенціальної енергії через узагальнені координати;
- знаходження лагранжіану системи;
- запис рівняння Лагранжа II роду;
- знаходження часткових похідних по узагальненим координатам та узагальненим швидкостям;
- одержання рівняння руху;
- підстановка в рівняння руху значень, які визначають об'єкт дослідження;
- інтегрування рівняння руху за заданих початкових умов;
- аналіз отриманих результатів і їхнє тлумачення;
- формулювання відповіді на поставлені завдання.

Якщо потрібно виконати тільки тягові розрахунки, із обмеженнями, що співпадають із відомими методами, може бути розроблений простий алгоритм та відповідне програмне забезпечення. У результаті такого алгоритму можуть бути одержані ті саме залежності, що одержуються згідно з відомими методами, тільки розраховані значно точніше. У цій роботі здійснено більш широкий підхід, а алгоритм виконання спрощених тягових розрахунків наведено під час розгляду конкретного прикладу розрахунків, виконаного для тролейбуса, під час розрахунку його руху по вибраному маршруту зі складним профілем шляху.

6.3.2 Постановка завдань досліджень та розробка концептуальної моделі руху

Перший етап – детальний аналіз проблеми, для вирішення якої виконують розрахунки, постановка завдань досліджень. Цей етап суттєво відрізняється від того, що виконується за відомими методами. Він передбачає створення концептуальної моделі відповідно до завдань та цілей. та вибір концептуальної моделі руху. Концептуальна (змістовна) модель – це абстрактна модель, створена в описовій формі, що визначає структуру системи, що моделюється, властивості її елементів і причинно-наслідкові зв'язки, властиві системі і суттєві для досягнення мети моделювання. Концептуальна модель, це початкова модель з недостатньою деталізацією, яка включає основні об'єкти та зв'язки між ними, та можливі методи вирішення проблеми. Завдання розрахунків можуть співпадати з тими, що є у відомих методах, а можуть їх

доповнювати, або бути зовсім іншими. Наприклад, завданнями розрахунків може бути вивчення обертального руху, вивчення коливань та вібрацій ТЗ, вивчення діючих сил та взаємодій, джерел енергозатрат та їхньої величини тощо.

Як було зазначено, основна відмінність запропонованого методу полягає у тому, що замість моделі руху ТЗ як матеріальної точки, у якій зосереджена уся маса ТЗ, за модель руху приймається матеріальне тіла, яка складається із взаємодіючих між собою матеріальних точок. За такої моделі коло питань, які можуть бути вирішені, не обмежується тяговими розрахунками. Крім завдань побудови графіків зміни швидкості руху вздовж шляху, затрат часу, витрат електроенергії на рух ТЗ, які вивчаються за відомих методів розрахунків, можуть бути вирішено безліч інших питань. Одним із таких питань є, наприклад, питання аналізу зміни сили ваги ТЗ під час руху та вивчення впливу цієї зміни на характер руху, на елементи конструкції ТЗ, на пасажирів, на вантажі, що перевозить ТЗ. Тому під час підготовки до розрахунків потрібно уточнити завдання, визначити елементи, взаємодія яких підлягає вивченню, і вибрати відповідну змістовну модель, яка має описовий характер. Відповідно до цієї моделі створюється математична модель, у якій визначаються узагальнені координати руху, діючі сили та процеси перетворення енергії.

6.3.3 Вивчення та аналіз характеристик транспортних засобів

На цьому етапі виконання тягових розрахунків задають тип транспортного засобу, його масогабаритні дані, тип і кількість електродвигунів, їхню потужність, кінематичну схему ТЗ, передавальне число трансмісії, діаметри ведучих коліс та інші характеристики. Приклад розгляду таких характеристик та аналізу кінематики ТЗ наведено в третій частині цієї роботи.

6.3.4 Аналіз та підготовка параметрів шляху відповідно до запропонованого методу

Основною відмінністю етапу підготовки шляху до тягових розрахунків, відповідно до запропонованого методу, є те, що не виконуються спрощення шляху, його розбивка на розрахункові ділянки, з метою одержання окремих рівнянь впродовж шляху, їхнє послідовне інтегрування та узгодження розв'язків. Навпаки, шлях руху описується з максимально можливою деталізацією, з виявлення усіх його особливостей та додаткового опису наявності дорожніх знаків, спеціальних частин тягової мережі, обмежень, які накладаються на характер руху.

Відповідно до запропонованого методу підготовка шляху проводиться також на основі нормального поздовжнього профілю дороги, але без спрощень. Єдина вимога полягає у тому, що шлях має бути описаний числові способом. Інтегрування рівнянь, які одержуються, проводиться уздовж усього шляху, який подається узагальненою координатою s . Ця координата охоплює весь шлях від початкової до кінцевої точки. Під час інтегрування рівнянь автоматично враховуються всі параметри шляху: ухили, додаткові сили, зумовлені ухилами, враховуються елементи спряження ділянок різних ухилів і сили, які виникають на цих елементах спряження. Враховується керування рухом, яке здійснює водій. Ураховуються також обмеження режимів руху, які накладаються дорожніми знаками.

Особливістю підготовки профілю шляху є те, що його потрібно описати математично. У розділі кінематики частково розглянуто методи математичного опису профілю шляху, а саме за допомогою поліномів або дискретних значень рівня шляху. Показано, що опис профілю неперервною аналітичною формулою не може забезпечити достатньої точності опису шляху. Більш прийнятним є опис шляху дискретними значеннями, заданими з певним кроком.

Іншим методом опису шляху є використання сплайнів. Сплайни відрізняються своїм порядком [105]. Сплайни першого порядку – це апроксимація профілю шляху лінійними відрізками, тобто прямолінійними ділянками, які з'єднують сусідні точки профілю. Основний недолік таких сплайнів у тому, що їхні похідні мають розриви у кожній точці зміни ухилу профілю. Для інтегрування рівняння руху такий сплайн не підходить. Сплайн другого порядку забезпечує неперервність першої похідної. Він також не підходить для виконання тягових розрахунків. Тільки сплайни третього порядку забезпечують неперервність першої та другої похідної, що достатньо для тягових розрахунків. Сплайни більшого n -го порядку допускають диференціювання, яке дає гладку $n - 1$ похідну. Для виконання тягових розрахунків потрібно одержувати другу похідну, яка дозволяє визначити кривизну шляху та враховувати радіуси дуг у профілі та у плані шляху під час тягових розрахунків.

Методом опису профілю є використання сплайнів і сплайнової апроксимації. Останнім часом, під час проектування залізничних і автомобільних доріг, все частіше користуються сплановою апроксимацією. Тягові розрахунки потребують використання сплайнів на менше ніж третього порядку. Сплайни повинні задовольняти умову, щоб перша та друга його похідні були гладкими функціями. Опис профілю шляху сплайнами стає

звичною вправою, тому використання такого опису під час тягових розрахунків є найперспективнішим.

Зупиняючись на використанні сплайнів і сплайнової апроксимації під час тягових розрахунків, потрібно враховувати, що сплайни записуються у вигляді об'єктів пам'яті електронних машин, тобто формула сплайна як така не виводиться, вона є доволі громіздкою та займає певні обсяги пам'яті електронної машини. Використання сплавів передбачає застосування комп'ютерних методів розрахунку. Сплайни потрібно здавати у вигляді комп'ютерного масиву, тобто представити їх без комп'ютерної програми не можна.

Оскільки у цій роботі виклад матеріалу подається без застосування спеціальних математичних програм, то розгляд запропонованих методів обмежено дискретним способом поданням шляху. Прийнято виконання тягових розрахунків на найпростішому комп'ютерному забезпеченні із застосуванням електронної таблиці. Це найпростіший математичний інструмент, що доступний практично усім спеціалістам електричного транспорту. Електронна таблиця не розрахована на роботу зі сплайнами й тому під час роботи з нею потрібно використовувати методи дискретного подання профілю шляху та чисельні методи інтегрування рівняння руху [106].

Представляючи параметри шляху дискретними значеннями, потрібно належно вибрати крок дискретності. Цей вибір повинен якомога детальніше відображати особливості шляху, а з іншого боку повинен бути обмеженим, не допускати збільшення масиву даних, його надлишковості. Це можна забезпечити, використовуючи змінний крок дискретності. На ділянках, де ухил шляху змінюється, потрібно вибрати невеликий крок, а на ділянках з постійним ухилом крок можна збільшувати. У такий спосіб можна задовольнити вимогу обмеженої кількості даних для опису всього шляху. Проте є ще один аспект – під час інтегрування рівняння руху потрібно вибирати менший крок інтегрування для відображення перехідних процесів. Перехідні процеси виникають, коли водій транспортного засобу змінює швидкість руху шляхом перемикавання режиму роботи двигуна. Щоб врахувати зміну швидкості ТЗ у цих режимах, крок інтегрування має бути мінімальним. Передбачити під час підготовки профілю, у яких місцях водій змінює швидкість не завжди можливо. Тому виникає необхідність забезпечити мінімальний крок упродовж цього шляху. Отже, ми маємо дві суперечливі вимоги: це вимога детального опису всіх особливостей шляху та додаткових ділянок, на яких змінюється швидкість руху, і вимога обмеження об'єму даних, яким описується шлях. Вирішити цю суперечливу вимогу можна повторним інтегруванням рівняння руху, тобто в

розрахунковій таблиці вставляти дискретні значення шляху в місцях, у яких згідно з попереднім розрахунком відбувається зміна режиму руху.

Порівнюючи запропонований метод тягових розрахунків із відомим, потрібно відмітити його перевагу, яка полягає в тому, що шлях руху не підлягає спрощенню. Це забезпечує більшу точність розрахунків, відповідність їх фактичним умовам руху ТЗ. Рух ТЗ здійснюється по складних територіях і тому для його повного вивчення потрібно враховувати не тільки ухили шляху, але його деталі, елементи спряження ділянок різних ухилів. Вище показано, зміна ухилу шляху та рух по дугі спряження, призводить до зміни ваги ТЗ. Це викликає додаткові сили опору руху, а також додаткові сили, які діють на пасажирів та на елементи конструкції ТЗ. Дія цих сил відображається у результатах тягових розрахунків. Згідно до відомих методів розрахунків такі додаткові сили не враховують. Чинна теорія електричної тяги хибно вважає, що вага ТЗ під час його руху не змінюється.

Для виконання розрахунків передусім задано узагальнені координати. Шлях має узагальнену координату віддаль s від початкової точки та значенням рівня профілю $z(s)$ відносно рівня початку руху (59). Як параметри профілю шляху прийнято пікети, відмітки рівня висоти шляху z над рівнем початкової точки. Ці пікети проставляються в проекті будівництва дороги [73] або розраховані на ділянках, де вони відсутні. На відміну від чинної ТЕТ [18, 20, 37] операції підготовки профілю шляху: його спрямлення та приведення не проводили, оскільки для розрахунків це не потрібно. Профіль шляху задали узагальненою координатою $z = z(s)$. Його можна подати графіком чи таблицею, але у цій роботі використані дискретні значення зі змінним кроком уздовж шляху $z_i = z(s_i)$. Значення рівня профілю z_i наведені в колонці « z » розрахункової таблиці (див. далі). Схему профілю показано на рисунку 6.2.

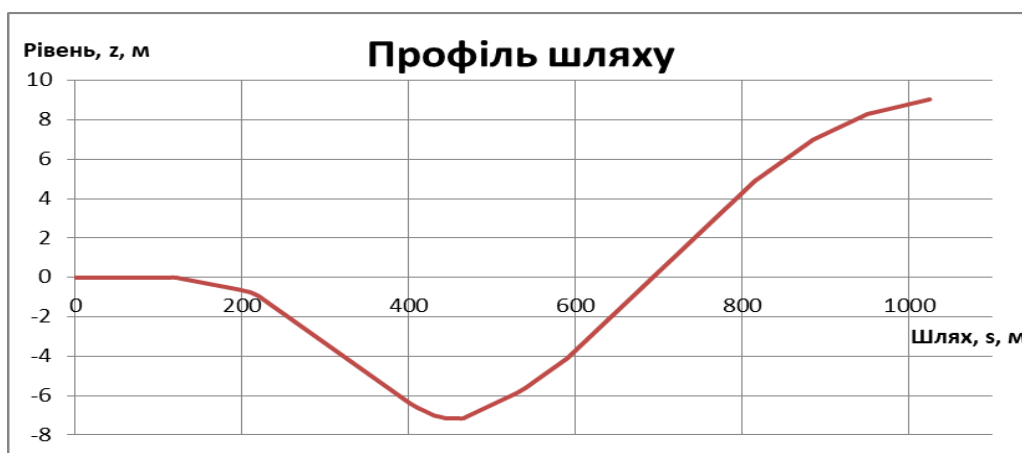


Рисунок 6.2 – Профіль шляху руху тролейбуса

Розглянута ділянка шляху має складний профіль із горизонтальною ділянкою, ділянками з ухилом до 30 ‰ і підйомом до 40 ‰, а також ділянками спряження різних ухилів. Якщо виконувати тягові розрахунки відповідно до методики, описаної в підручниках [18, 36, 37], то на вказаному шляху потрібно виділити принаймні три окремі ділянки з різним ухилом, спрямити їх, скласти рівняння руху для кожної ділянки. Після розв'язання рівнянь їх потрібно зістикувати, щоб отримати кінцеві результати. Запропонований альтернативний метод цього не потребує, він дозволяє інтегрувати одне рівняння руху протягом усього шляху.

Рух ТЗ по шляху визначили двома степенями свободи, узагальненими координатами: віддаль від початкової до поточної точки $q_1 = s$, та висота полотна дороги (можна центра мас ТЗ) $q_2 = z(s)$ відносно рівня точки відліку. З урахуванням прийнятих узагальнених координат стан руху ТЗ описується функцією:

$$S = S(t, s, \dot{s}, z, \dot{z}) . \quad (6.2)$$

Згідно до (6.2) параметрами які описують рух ТЗ є час, віддаль від початку руху, швидкість, величина рівня шляху в кожній його точці та швидкість зміни рівня.

6.3.5 Опис сил тяги

Як зазначено, відомі тягові розрахунки орієнтовані на використання графоаналітичних методів інтегрування рівнянь руху. Запропоновані методи передбачають аналітичне інтегрування рівнянь зазвичай з використанням обчислювальної комп'ютерної техніки.

Для розрахунку тяги електричного транспорту, з використанням рівнянь Лагранжа II роду, можна використати два способи опису діючих сил. Перший спосіб, який потрібно вважати основним, полягає у математичному моделюванні процесів перетворення електричної енергії двигуном ТЗ у механічну та використання результатів моделювання у рівнянні руху. Цей метод передбачає математичну модель двигуна, яка на вході має електричні параметри енергії, а на виході відповідні величини швидкості та моменти силу на валу. Модель включає систему керування та враховує дії водія з керування рухом ТЗ. Приклад такої моделі наведено у джерелі [107]. Модель двигуна створюється в певному програмному середовищі, наприклад пакеті «MatLab», та описує усі процеси перетворення електричної енергії в механічну. Це є повноцінна електронна модель транспортного засобу.

Інший, простіший спосіб, який використовується в чинних методах тягових розрахунків ТЕТ, полягає в представленні діючих сил тяги електромеханічними та механічними характеристиками двигуна, під час його роботи в різних режимах керування. Електромеханічна характеристика – це залежність швидкості обертання валу двигуна від величини струму та напруги на ньому. Її зазвичай подають як залежність швидкості від струму за постійної напруги, що дорівнює напрузі живлення. Механічна характеристика – це залежність моменту на валу двигуна від швидкості його обертання. Крім того, додатково подається характеристика коефіцієнта корисної дії двигуна, залежність його від струму від величини струму. Такі характеристики, наведені у таблиці 6.1, дозволяють повністю описати процес руху ТЗ і слугують для тягових розрахунків.

У цій монографії розрахунки виконано для випадку, коли тягові характеристики двигуна представлені його механічною та електромеханічними характеристиками. Механічна характеристика – це залежність моменту сили на валу двигуна від швидкості обертання, а електромеханічні – це залежності моменту на валу двигуна від величини струму та напруги, а також залежність коефіцієнту корисної дії від величини струму.

Перед виконанням тягових розрахунків відповідно до рівнянь Лагранжа II роду необхідно переконатись, чи відповідають розглянуті сили вибраним узагальненим координатам і можуть виступати як узагальнені. У нашому випадку узагальнені координати задані формулою (6.2). У разі розгляду переміщення ТЗ уздовж шляху сили опору та гальмівні сили є узагальненими силами.

У теорії електричного приводу [73] узагальнену силу тяги електродвигуна використовують як момент сили на валу, за умови, що узагальненою координатою вибрано кут повороту валу двигуна, а узагальненою швидкістю – кутову швидкість обертання. Тут узагальненою координатою є переміщення ТЗ по шляху – s , тому їй відповідає сила тяги, приведена до ободу ведучих коліс.

Відповідно до обраного способу представлення узагальнених сил тяги механічні характеристики двигуна приведені до ободу ведучих коліс. У тролейбусі діаметр ведучих коліс 1 070 мм і передавальне число трансмісії $\mu = 11,3$. Подані в таблиці 6.1 механічні та електромеханічні характеристики відповідають параметрам тролейбуса.

6.3.6 Підготовка до тягових розрахунків. Подання сил тяги математичними формулами

Для виконання тягових розрахунків в аналітичний спосіб характеристики двигуна потрібно подати у вигляді формул. Користуючись даними таблиці 6.1, побудовано графіки залежностей і виконано їхню математичну апроксимацію. Графіки механічних характеристик двигуна наведено на рисунку 6.3.

На рисунку 6.3 подані графіки механічних характеристик двигуна ДК-210А-3. Характеристики двигуна визначенні при напрузі 550 В і значеннях магнітного поля: 1 – $\alpha = 100\%$; 2 – $\alpha = 50\%$; 3 – $\alpha = 31\%$. Характеристики приведені до ободу колеса тролейбуса ЗіУ-682Г. Значення коефіцієнта передачі трансмісія $\mu = 11,3$, діаметр ведучих коліс $D = 1\,070$ мм. Математичні залежності сили тяги від швидкості, за різних значень коефіцієнта ослаблення магнітного поля α , описують формули:

$$F_1(v) = 690\,721 \exp(-0,621\,2v), \quad \text{для } \alpha = 100\%; \quad (6.3)$$

$$F_2(v) = 1\,258\,694 \exp(-0,610\,7v), \quad \text{для } \alpha = 50\%; \quad (6.4)$$

$$F_3(v) = 180\,735 \exp(-0,222\,8v), \quad \text{для } \alpha = 31\%. \quad (6.5)$$

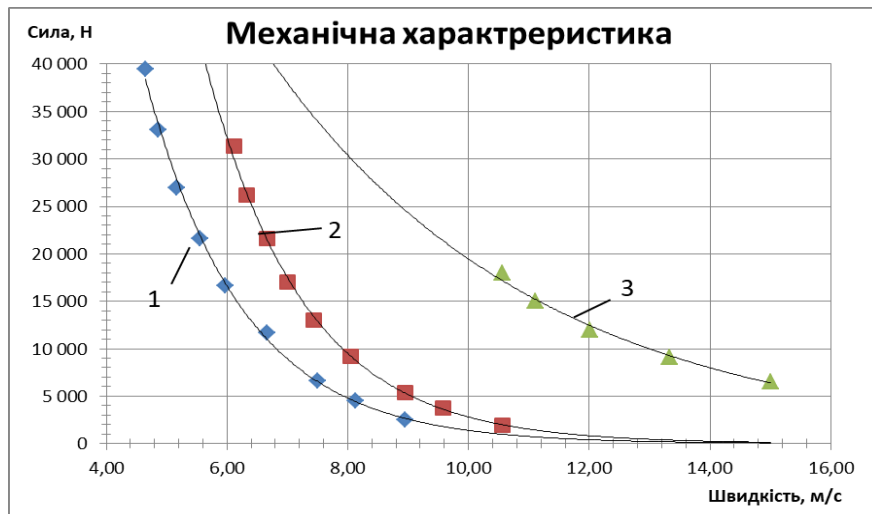


Рисунок 6.3 – Механічні характеристики двигуна ДК-210А-3, приведені до ободу ведучих коліс, $U = 550$ В ($1 - \alpha = 100\%$; $2 - \alpha = 50\%$; $3 - \alpha = 31\%$)

На рисунку 6.4 наведені електромеханічні характеристики двигуна, побудовані за цих самих умов.

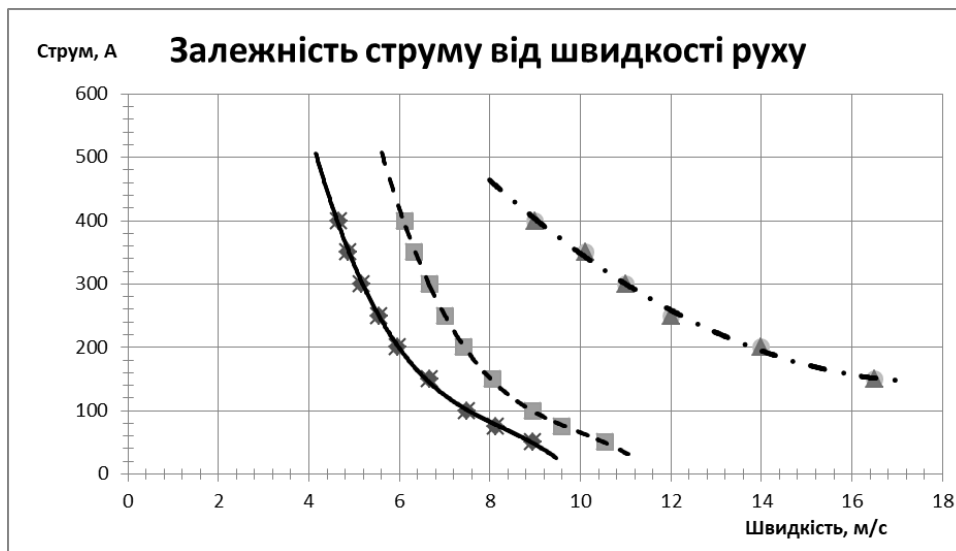


Рисунок 6.4 – Електромеханічні характеристики двигуна ДК-210А-3 приведені до ободу ведучих коліс, $U = 550$ В ($1 - \alpha = 100$ %; $2 - \alpha = 50$ %; $3 - \alpha = 31$ %)

Одержані аналітичні залежності величини струму від швидкості ТЗ:

$$I_1(v) = -3,810 v^3 + 114,1v^2 - 1166 v + 4\,134; \quad \text{для } \alpha = 100 \text{ %; } (6.6)$$

$$I_2(v) = 3,221 v^2 - 115,7v + 1\,183,1; \quad \text{для } \alpha = 50 \text{ %; } (6.7)$$

$$I_3(v) = -4,256 v^3 + 105,4 v^2 - 904,3 v + 2\,748; \quad \text{для } \alpha = 31 \text{ %} . (6.8)$$

На наступному рисунку 6.5 наведені залежності коефіцієнта корисної дії від струму двигуна.

Аналітичні вирази залежності коефіцієнта корисної дії від величини струму за відносних значень магнітного потоку: $\alpha = 100$ %, $\alpha = 50$ %, $\alpha = 31$ %:

$$\eta_1(v) = 10^{-06} i^3 - 9 \cdot 10^{-04} i^2 + 0,2302 i + 72,30; \quad \text{для } \alpha = 100 \text{ %; } (6.9)$$

$$\eta_2(v) = 10^{-06} i^3 - 1,2 \cdot 10^{-03} i^2 + 0,2909 i + 67,0; \quad \text{для } \alpha = 50 \text{ %; } (6.10)$$

$$\eta_3(v) = 5 \cdot 10^{-07} i^3 - 0,0006 i^2 + 0,1941 i + 68,05; \quad \text{для } \alpha = 31 \text{ %} . (6.11)$$

Одержані формули апроксимації дозволяють виконати тягові розрахунки відповідно до відомих методів, в аналітичний спосіб.

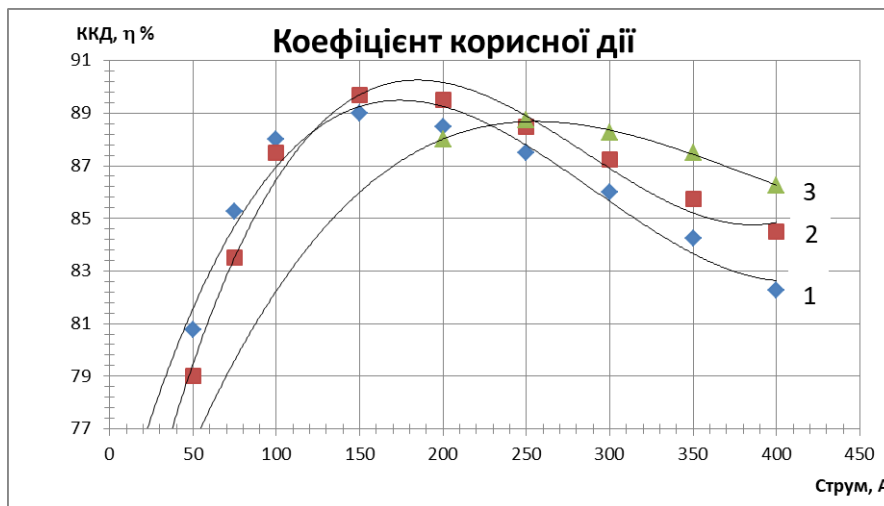


Рисунок 6.5 – Залежність коефіцієнта корисної дії двигуна від величини струму за значень магнітного потоку (1 – $\alpha = 100\%$; 2 – $\alpha = 50\%$; 3 – $\alpha = 31\%$)

У цій монографії використані тільки позиції роботи двигуна, які відповідають фіксованим положенням педалі керування водія, та не враховуються проміжні позиції, які автоматично перемикаються контролером керування тролейбуса. Це дозволило продемонструвати особливості запропонованого методу більш чітко, у простий спосіб, не вдаючись до громіздких математичних викладок. Проте, в наслідок пропуску проміжних позицій, одержані діаграми зміни швидкості та струму ТЗ мають дещо неприродний характер із різкими змінами як швидкості, так і струму.

6.3.7 Розрахунок лагранжіана

Наступним етапом одержання рівняння руху є запис лагранжіану системи. По ходу роботи розглянуто декілька варіантів моделі руху і відповідних математичних виразів лагранжіана: (4.15), (5.9), (5.10) та (5.93), а такою є модель поїзда із просторово розподіленими вагонами, упродовж залізничного полотна – рисунок 5.1. У лагранжіані (4.15) врахована кінетична енергія обертального руху: двигуна, трансмісії, ведучих та ведених коліс та додаткового обладнання, яке живиться від сторонніх джерел енергії. Кінетична енергія цього обладнання не входить в лагранжіан. У результаті лагранжіан представлено формулою (5.9) або спрощено (5.10).

Формула (5.93) додатково враховує до обертального руху ТЗ в цілому викликаний ухилами профілю, поворотами у плані та перевищенням зовнішньої рейки. Обертальний рух на цих ділянках спричиняє появу додаткових сил. Ці сили потрібно враховувати у його правій частині рівняння Лагранжа, а зміна кінетичної енергії відображається у самому лагранжіані. Залежно від будови

рейкового шляху ці додаткові сили можуть бути імпульсними і проявлятись в разі відсутності ділянок спряження радіусів, або їх невірній формі. Поява таких сил негативно впливає на елементи конструкції ТЗ та на залізну колію. Щоб усунути ці сили, конструкцію шляху потрібно належно облаштувати. На ділянках спряження різних ухилів та поворотах ділянок різних радіусів повинні бути влаштовані перехідні ділянки, як показано на рисунку 5.11. Форма таких ділянок повинна бути гладкою, тобто такою, щоб їхні другі похідні були неперервними.

Рух ТЗ по криволінійних ділянках шляху призводить до зміни його ваги. Зміна ваги ТЗ призводить до відповідної зміни сили тертя. Вага ТЗ на поворотах малого радіуса, за великої швидкості руху, може змінюватись у 1,5–2 рази. Аналіз цих сил наведено у підрозділі 5.10. Під час виконання тягових розрахунків зміну сили тертя варто враховувати. Вони входять у праву частину рівняння Лагранжа II роду як узагальнені сили. Варто зазначити, що відомі методи розрахунків не дозволяють враховувати ці сили, оскільки вони використовують науково неправильне визначення поняття «вага» і вважають її незмінною під час руху ТЗ.

Лагранжіан (5.95) враховує обертальний рух усього ТЗ як величину зміни кінетичної енергії. Відповідно до завдання цієї роботи та плану шляху, який не має поворотів, складові лагранжіану відповідно до кутів ϑ , та ϕ , дорівнюють нулю. Відмінним від нуля є тільки складова кінетичної енергії обертального руху відносно кута повороту ψ , тобто кута галопування. Розрахуємо кінетичну енергію обертального руху.

Відповідно до вибраного маршруту обертальний рух здійснюється на переході до спуску $s = 200$ м, на увігнутій ділянці $s = 450$ м та на переході від підйому до горизонтальної ділянки $s = 900$ м (див. рис. 6.2).

Розраховується кінетична енергія за формулою (5.84), складник відносно кута – ψ . Найбільше значення кінетична енергія обертального руху має на ділянці з координатою $s = 450$ м. Радіус кривизни профілю на цій ділянці становить приблизно $R_\psi = 2\,000$ м. Максимальна швидкість, яку може розвинути тролейбус, $V_\psi = 50$ км/год (16,7 м/с). Кутову швидкість обертального руху тролейбуса ω_ψ розраховуємо згідно з формулою:

$$\omega_\psi = 2\pi \frac{V_\psi}{2\pi R_\psi} = \frac{V_\psi}{R_\psi} \quad (6.12)$$

де $2\pi R_\psi$ – довжина кола, по якому рухається тролейбус, $\frac{2\pi R_\psi}{V_\psi}$ – час руху, період обертання тролейбуса, $\frac{V_\psi}{2\pi R_\psi}$ – частота обертання, кількість обертів за секунду.

Момент інерції J_ψ тролейбуса визначимо, прийнявши його форму у вигляді паралелепіпеда з рівномірно розподіленою масою. Висота паралелепіпеда $H = 2,5$ м, довжина $L = 20$ м. Момент інерції згідно з формулою:

$$J_\psi = m \frac{H^2 + L^2}{12}. \quad (6.13)$$

Відповідно до формули (5.84) знаходимо:

$$U_\psi = \frac{1}{2} m \frac{H^2 + L^2}{12} \left(\frac{V_\psi}{R_\psi} \right)^2. \quad (6.14)$$

Виконаємо розрахунки кінетичної енергії обертального руху відповідно до умов руху тролейбуса по вибраному маршруту:

$$U_\psi = \frac{1}{2} \cdot 16950 \cdot \frac{2,5^2 + 20}{12} \cdot \left(\frac{13,9}{2000} \right)^2 = 13,86 \text{ Дж (Н} \cdot \text{м)}.$$

Результат розрахунку показав, що під час обертального руху по заданій трасі зі швидкістю 50 км/год максимальне значення кінетичної енергії складає 13,86 Джоуля, що суттєво менше, ніж енергія поступального руху, а також енергії обертального руху частин ТЗ, які обертаються. Тому, в першому наближенні, внеском цієї енергії у лагранжіан можна нехтувати.

Відносно розглянутої моделі електропоїзда із вагонами, розміщеними уздовж шляху, розглянутої на рисунку 6.1, відмітимо, що це більш складна модель, яка потребує самостійного вивчення. Для першої демонстрації запропонованого методу тягових розрахунків її розгляд не є доцільним. Ця модель наведена для того, щоб продемонструвати можливості аналізу руху ТЗ, які надає запропонований метод розрахунків.

Враховуючи наведені вище міркування, лагранжіан для розглянутого прикладу розрахунку кривих руху тролейбуса по заданому маршруту подано у вигляді:

$$L = T - U = \frac{1}{2} m \dot{s}^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} J_k \left(\frac{\mu_k \dot{s}}{2\pi R_k} \right)^2 - mgz(s). \quad (6.15)$$

Це фактично є формула (5.10), у якій використана ефективна маса ТЗ.

6.4 Приклад виконання тягових розрахунків

Для демонстрації можливостей, які відкриває запропонований альтернативний метод, у монографії виконано тяговий розрахунок руху тролейбуса типу ЗіУ-9Б по маршруті складного профілю. Характеристики тролейбуса такі. У тролейбусі встановлено тяговий електричний двигун постійного струму типу ДК-210А-3 [79]. Маса спорядженого тролейбуса 10 050 кг, кількість пасажирів 92. Середня маса пасажирів 75 кг. Трансмісія тролейбуса містить карданний вал з двох частин, які допускають поздовжнє переміщення; дві шестерні редуктора головної передачі, диференціал, задній міст з двома півосями і планетарним редукторів. Передавальне число трансмісії тролейбуса $\mu = 11,3$, діаметр ведучих коліс $D = 1\,070$ мм. Рух здійснюється по ділянці складного профілю довжиною 1 000 м. Розрахована ефективна маса частин тролейбуса, що обертаються урахуванням додаткового обладнання становить $m_e = 1\,190$ кг. Приведена маса навантаженого тролейбуса $m_\Sigma = 18\,140$ кг.

6.4.1 Визначення сили тертя

Наступним кроком є визначення узагальнених сил, а саме сил опору. Це сили тертя та сили опору навколишнього повітря.

Сила тертя пропорційна вазі тролейбуса. У цій роботі залежність ваги від прискорення руху на кривих профілю та залежність сили тертя від ваги розглянуто окремо. Отже, вирішуючи поставлене завдання, силу тяги представлено, як добуток коефіцієнта тертя на вагу ТЗ (5.34). У формулі (5.34) коефіцієнт тертя K_T однаковий для режимів руху тролейбуса під струмом. У режимі вибігу, коли двигун відімкнутий від мережі, величина K_T більша. Справа у тому, що механічна характеристика двигуна (6.3–6.5), одержана із врахуванням сили тертя у двигуні та трансмісії, а сила (5.34) враховує тільки тертя між колесами ТЗ та шляхом. У конструкції тролейбуса двигун постійно під'єднаний до ведучих коліс і ніколи не від'єднується. Тому під час вибігу елементи трансмісії та якоря двигуна продовжують обертатись і, крім сили тертя (5.34), потрібно врахувати силу тертя двигуна та трансмісії.

6.4.2 Визначення сили опору повітря

Крім сил тертя, на тролейбус діють сили взаємодії з навколишнім повітрям. Ці сили мають два складники: сила в'язкого опору, зумовлена тертям шарів повітря, що примикають до поверхні ТЗ (явищем перенесення), та аеродинамічна сила лобового опору.

Перший складник пропорційний відносній швидкості руху ТЗ і повітряного середовища. Він виникає в результаті передачі енергії шарів повітря, що захоплюються транспортним засобом та рухаються разом із ним до більш віддалених шарів, які не беруть участі в русі ТЗ. Ця сила визначається згідно до формули (6.16):

$$W_B = K_B \dot{s}, \quad (6.16)$$

де K_B – коефіцієнт в'язкого опору повітря.

$$K_B = \frac{\eta}{\Delta Z} S, \quad (6.17)$$

де η – в'язкість повітря, Па·с; S – площа поверхні, що стикається з повітрям; ΔZ – віддаль між шарами повітря, які прилягають до транспортного засобу, та шарами, які є відносно нерухомими.

Другий складник – сила аеродинамічного опору, яка зумовлена вихровими потоками, вона пропорційна квадрату швидкості. Виникає вона, коли порушується ламінарний потік повітря й за рухомим тілом виникають вихрові потоки та розрідження повітря. Під час руху ТЗ зі швидкостями понад 80 км/год цей складник опору відіграє переважну роль. Формула розрахунку аеродинамічного опору така (6.18):

$$W_A = K_A \dot{s}^2 = C_x \frac{\rho \dot{s}^2}{2} \sigma, \quad (6.18)$$

де C_x – коефіцієнт лобового опору, ρ – густина повітря; σ – площа січення поперечного перетину.

Коефіцієнт лобового опору C_x залежить від форми тіла, яке рухається. Найменше значення спостерігається, коли форма має вигляд краплі.

Отже, сумарні сили опору в режимах руху тролейбуса дорівнюють:

$$W_O = K_T G + \frac{\eta}{\Delta Z} S \cdot \dot{s} + C_x \frac{\rho \dot{s}^2}{2} \sigma. \quad (6.19)$$

У ТЕТ прийнято силу, розраховану згідно з (6.19), вважати основною силою опору. У режимі вибігу додаються сили тертя якоря двигуна і трансмісії.

6.4.3 Гальмівні сили

У тролейбусі застосовують електричне та механічне гальмування. До того ж електричне гальмування може бути рекуперативним, за якого механічна енергія перетворюється в електричну й накопичується у зовнішніх або

внутрішніх акумуляційних елементах. Процеси рекуперативного та реостатного гальмування, а також робота механічних гальм із пневматичним приводом, як це реалізовано у тролейбусі, є питаннями, які потребують окремого дослідження. Вони виходять за коло питань цієї роботи. Для досягнення цілей цієї роботи розгляд процесів перетворення енергії та її рекуперації не потрібен, достатньо обмежимося тим, що гальмівні сили надають ТЗ від'ємне прискорення. У практиці експлуатації електричного транспорту, а саме трамваїв та тролейбусів у країнах східної Європи, системи рекуперації практично не використовуються.

Під час аналізу руху ТЗ виникають сили, які зумовлені характеристиками шляху руху та діють на ухилах профілю шляху. Згідно з чинною ТЕТ, їх враховують окремо, як сили додаткового опору [18, 22, 37]. Відповідно до величини цих сил, яка залежить від величини ухилу, шлях розбивають на розрахункові ділянки, складають рівняння руху для кожної виділеної ділянки із постійним середнім ухилом, інтегрують одержані рівняння, а потім узгоджують розв'язки всіх рівнянь та одержують залежність швидкості руху впродовж усього шляху.

У разі розрахунку електричної тяги засобів ТЗ, які рухаються по залізниці, враховують додаткові сили опору на поворотах дороги. Для цього до дійсних ухилів шляху додають еквівалентний позитивний ухил, еквівалентний по затратам енергії руху на поворотах, та враховують сили, зумовлені цим ухилом.

Запропоновані альтернативні методи спрощують розрахунки, оскільки вони не потребують поділу шляху на розрахункові ділянки та розв'язання руху для кожної окремої ділянки. Вони потребують тільки детального опису шляху, без будь-яких спрямлень та приведень, та приводять одне рівняння руху впродовж усього шляху. Це забезпечується особливостями методу: врахуванням дії гравітаційного поля Землі та використанням узагальненої координати, яка описує кривизну шляху. У цій частині роботи враховано тільки вплив гравітаційного поля, а розгляд додаткової узагальненої координати – кривизна шляху в плані є предметом подальшої розробки. У цій роботі не враховані повороти шляху в плані та це не обмежує розрахунки порівняно з чинними методами, адже, згідно з відомими методами, шлях руху завжди приводиться до прямолінійного у плані шляхом введення еквівалентних ухилів. Тому в цій роботі розрахунки виконані для прямолінійної ділянки зі змінним профілем.

6.5 Одержання рівняння руху тролейбуса на основі рівняння Лагранжа II роду

Рівняння руху відповідно до методу Лагранжа отримують за таким алгоритмом:

1. Розраховують лагранжіан системи.
2. Підставляють лагранжіан у ліву частину рівняння Лагранжа II роду, а у правій частині записують узагальнені сили.
3. Розраховують часткові похідні лівої частини рівняння за узагальненими координатами та узагальненими швидкостями. У такий спосіб одержують систему рівнянь руху, що дорівнює кількості узагальнених координат.
4. Розв'язують систему рівняння руху будь-яким відомим способом та одержують залежність швидкості руху від часу руху упродовж усього маршруту.

Відмінність тягових розрахунків від загально прийнятого алгоритму використання методу Лагранжа полягає у тому, що в рівняннях руху здійснено перехід від незалежної змінної *час* до незалежної змінної *шлях*.

Розраховуючи лагранжіан за формулою (4.15), враховують складники лагранжіану, якими є кінетична та потенційна енергія.

Кінетична енергія дорівнює сумі енергії поступального руху – T_T та енергії обертального руху частин ТЗ, що обертаються – T_E :

$$T = T_T + T_E = \frac{1}{2} m \dot{s}^2 + \frac{1}{2} \dot{s}^2 \sum_{k=1}^n J_k \left(\frac{\mu_k}{2\pi R} \right)^2, \quad (6.20)$$

де J_k , μ_k – момент інерції та передавальне число k -ї частини, що обертається, $\dot{s}$ – швидкість руху ТЗ; R – радіус ведучих коліс. Вираз, що входить під знак суми, це ефективна маса частин, що обертаються:

$$m_e = \sum_{k=1}^n J_k \left(\frac{\mu_k}{2\pi R} \right)^2. \quad (6.21)$$

Потенціальна енергія ТЗ визначається згідно з формулою:

$$U = mgz(s). \quad (6.22)$$

Враховуючи (6.21) та (6.22), лагранжіан системи:

$$L = \frac{1}{2}(m + m_e)\dot{s}^2 - mgz(s). \quad (6.23)$$

Щоб отримати рівняння руху відповідно до (3.15), потрібно задати узагальнені сили Q_i . У попередніх підрозділах визначено діючі сили, але потрібно переконатись, чи можна їх вважати ці сили узагальненими відносно прийнятих узагальнених координат. Відповідно до умови (5.4) вони повинні дорівнювати частковим похідним віртуальної роботи по узагальненим координатам. Сила тяги й опору цій умові відповідають, вони завжди направлені в напрямку руху ТЗ і їхній добуток на переміщення дорівнює роботі, виконаної під час переміщення вздовж узагальненої координати шлях – s .

Рівняння Лагранжа II роду (3.15) з урахуванням (6.23) має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{s}} \left(\frac{1}{2}(m + m_e)\dot{s}^2 - mgz(s) \right) \right) - \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{1}{2}(m + m_e)\dot{s}^2 - mgz(s) \right) \\ = F_k(\dot{s}) - W_k(\dot{s}, s) - B_k(\dot{s}, s). \end{aligned} \quad (6.24)$$

Тут $F_k(\dot{s})$, $W_k(\dot{s}, s)$, $B_k(\dot{s}, s)$ – сили тяги, опору та гальмування; k – індекс, який відповідає їхньому режиму руху.

Сила тяги $F_k(\dot{s})$ у (6.24) є функцією швидкості руху, сила опору $W_k(\dot{s}, s)$ залежить від швидкості руху та шляху; гальмівна сила $B_k(\dot{s}, s)$ також залежить від швидкості та шляху. Шлях й швидкість є функцією часу.

Розрахувавши в рівнянні (6.24) часткові похідні за координатою s та узагальненою швидкістю $\dot{s}$, одержуємо рівняння руху ТЗ. Його загальний вигляд:

$$(m + m_e)\ddot{s} - mg \frac{\partial z}{\partial s} = F_k(\dot{s}) - W_k(\dot{s}, s) - B_k(\dot{s}, s). \quad (6.25)$$

Формула (6.25) представляє загальний вигляд рівняння руху, одержане згідно до методу Лагранжа. Це рівняння еквівалентне рівнянню руху (1.2) з тією різницею, що замість коефіцієнта інерції $(1+\gamma)$ у ньому використовується інертна маса частин, що обертаються m_e , згідно рекомендацій розглянутих у розділі 3.3 (див. формулу (3.12)).

Крім цього в рівнянні (6.25) є додатковий доданок, у який входить похідна рівня шляху z по віддалі s . Цей доданок є складовою, яка визначає силу гравітації прикладну до ТЗ на ухилах шляху. Наявність його в рівнянні руху дозволяє виконувати інтегрування рівняння упродовж усього маршруту руху,

без розбивки на ділянки з різними значеннями ухилів, тобто без виконання операцій приведення та спрямлення шляху.

Також, важливою відмінністю рівняння (6.25) від (1.2) та (3.12) є те, що величини, які входять у рівняння, є узагальненими координатами, узагальненими швидкостями та узагальненими силами.

У рівнянні крапками позначені похідні за часом.

6.6 Інтегрування рівняння руху

Рівняння руху (6.25) – нелінійне рівняння другого порядку, у яке входять змінні: час руху, шлях, швидкість, та ухил ділянки. Якщо інтегрувати рівняння у вигляді (6.25), то виникають проблеми, спричинені тим, що на різних ділянках ухил шляху $\frac{\partial z}{\partial s}$ змінюється. Тому доцільніше перейти від незалежної змінної час t , до змінної шлях s . Це відображає той факт, що під час експлуатації електротранспорту визначальним фактором є шлях руху, а час руху суттєво залежить від характеристик шляху. Тому виконаємо перехід до нової змінної, скориставшись співвідношенням:

$$\ddot{s} \equiv \frac{d\dot{s}}{dt} \equiv \frac{d}{dt} \left(\frac{ds}{dt} \right) \equiv \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{ds} \frac{ds}{dt} = v \frac{dv}{ds}. \quad (6.26)$$

Тут ввели прийняте в ТЕТ позначення швидкості $v = \dot{s}$. Підставивши (6.26) у (6.25), з врахуванням явного вигляду сил тяги $F_k(v)$ (6.3), за 100 % магнітного поля двигуна (положення «Хід 1»):

$$\frac{dv}{ds} = \frac{1}{v(m + m_e)} (690721 \exp(-0,621 2v) - W_k(v, s) - B_k(v, s)) \quad (6.27)$$

З врахуванням сили опору в режимі під струмом одержимо

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{s}}{ds} = \frac{1}{\dot{s}(m + m_e)} (690 721 \exp(-0,621 2\dot{s}) - 12mg - 0,051 84mg\dot{s}^2 \\ - mg \frac{dz(s)}{dt}). \end{aligned} \quad (6.28)$$

Сила опору W_k у рівнянні (6.27) визначена згідно зі значеннями питомого опору w_k , рекомендованими у посібниках [18, 20, 37], вона визначається згідно з формулою (6.31). Під час руху під струмом, у режимах «Рух 1», «Рух 2», «Рух 3», питомий опір w_k дорівнює:

$$w_1 = w_2 = w_3 = 12 - 0,004 v^2, \quad (6.29)$$

та під час руху без струму (у режимі вибігу та гальмування):

$$w_1 = w_2 = w_3 = 16 - 0.004 v^2. \quad (6.30)$$

Тут питомі величини подані в одиницях Н/кН, значення швидкості в км/год.

Відповідно до заданої маси тролейбуса, і одиниць вимірювання згідно з системою СІ, отримано такі формули розрахунку сил основного опору:

$$W_1(v) = W_2(\dot{v}) = W_3(\dot{v}) = 12mg + 0,05184mg \cdot v^2. \quad (6.31)$$

$$W_4 = 16mg + 0,05184mg \cdot v^2. \quad (6.32)$$

Числове інтегрування рівняння (6.28) виконано методом Рунге – Кутта четвертого порядку [106]. Водночас враховано, що рівняння приведене до незалежної змінної шлях, має особливу точку $v = 0$. Тому за початкову умову, задано відмінне від нуля значення швидкості.

Інтегрування виконано за допомогою електронної таблиці Excel, як найдоступнішого інструментального засобу, який може використовувати кожен кваліфікований спеціаліст електричного транспорту. Метод інтегрування описаний в низці робіт автора [20, 78, 106].

Метод інтегрування диференціальних рівнянь Рунге – Кутта четвертого порядку належить до однокрокових методів, який забезпечує точність $O^4(h)$. Він є одним з популярних методів і часто використовується для числового інтегрування диференціальних рівнянь. Згідно з цим методом для інтегрування диференціального рівняння $y = f(x)$ з початковою умовою $y_0 = f(x_0)$, у межах (a, b) область інтегрування розбивається на ділянки з певним кроком h . За значенням функції y на попередній ділянці $x_0, x_1, x_2, \dots$ визначають значення на наступній ділянці згідно з формулою:

$$v_{i+1} = f(v_i, s_i) + \Delta v. \quad (6.33)$$

Величину приросту Δv визначають згідно з формулою :

$$\Delta v = \frac{1}{6} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4). \quad (6.34)$$

Коефіцієнти K_1, K_2, K_3, K_4 визначають згідно до формул:

$$\begin{cases} K_1 = h \cdot f(s, v) \\ K_2 = h \cdot f\left(s + \frac{h}{2}, v + \frac{K_1}{2}\right) \\ K_3 = h \cdot f\left(s + \frac{h}{2}, v + \frac{K_2}{2}\right) \\ K_4 = h \cdot f(s + h, v + K_3) \end{cases} \quad (6.35)$$

Диференційні рівняння руху згідно з формулою (6.28) у монографії проінтегровані за допомогою електронної таблиці Excel. Опис процедури інтегрування та одержана програма описані далі.

У колонку шлях s – записуємо значення шляху, визначені згідно з вибраним кроком інтегрування. Виконуючи розрахунки, крок інтегрування вибирали так, що на ділянках, де профіль шляху не змінюється, крок більший, а на ділянках різкої зміни профілю він менший. У такий спосіб розбивали шлях на ділянки зі змінним кроком вздовж усієї ділянки шляху, де вивчаємо рух ТЗ. У наших розрахунках крок h_i (віддалі між значеннями шляху) вибирали в межах $h_{i+1} - h_i = (0,5 - 20 \text{ м})$.

У наступну колонку ввели значення профілю шляху, як координата z , згідно з прийнятою моделлю руху. Значення z відповідають величинам висоти, проставленим у пікетах, або розрахованих у проміжках між ними, відповідно до значення ухилу шляху відповідно нормального поздовжнього профілю, аналогічного рисунку 6.1.

У наступну колонку вводили значення маси ТЗ, якщо потрібно враховувати її зміну на шляху руху. Тут вводиться зміна маси відповідно завантаженню чи розвантаженню ТЗ. Зміна маси викликана прискореннями на просторових кривих шляху врахована окремо.

Наступна колонка виділена для значень швидкості ТЗ, яке для розрахунків подається у м/с. В таблиці для зручності є ще одна колонка, в якій швидкість подається у км/год.

Для виконання розрахунку у першому рядку таблиці приведені початкове значення швидкості, яке відмінне від нуля. Нульове значення швидкості під час виконання розрахунків використовувати не можна. Це зумовлене наявністю особливої точки рівняння. В рівнянні руху значення швидкості знаходиться у знаменнику і її нульове значення не допустиме. В усіх наступних рядках цієї колонки розміщена формула розрахунку швидкості (6.33).

У таблицю формули розрахунку вводять так, щоб вказати координати клітинок, у яких будуть знаходитись результати розрахунків коефіцієнтів K_1 ,

K_2, K_3, K_4 . Для K_1 відповідно до (6.32) записують формулу розрахунку швидкості зі значеннями шляху s та профілю z цього самого рядка та значенням швидкості v із попереднього рядку. Крок інтегрування упродовж шляху змінний і дорівнює:

$$h = (s_{i+1} - s_i), \quad (6.36)$$

тобто координата шляху з цього ряду мінус із попереднього рядку.

Формула для обчислення K_2 вводиться аналогічно, тільки замість швидкості записують значення швидкості у попередньому рядку плюс значення $K_1/2$. Величина похідної рівня профілю по шляху записується відношення $(z_{i+1} - z_i)/(s_{i+1} - s_i)$. Аналогічно відповідно до формули (6.32) записують вирази для коефіцієнтів K_3, K_4 .

У наступні рядки таблиці вводять формули для розрахунку швидкості в км/год, струму відповідно до формул (6.6)–(6.8), та коефіцієнта корисної дії (6.9)–(6.11).

У разі потреби додатково додається колонка розрахунку витрат струму в А·год, та витрат електроенергії у Вт·год чи кВт·год.

Щоб врахувати зміну режиму роботи при перемиканні педалі швидкості з положення «Рух 1» у «Рух 2», у формулу (6.32) замість виразу сили за 100 % магнітного поля (6.3) записують значення сили тяги за 50 % магнітного поля (6.4). Аналогічно записують формули розрахунку в інших положеннях педалі швидкості та в режимі вибігу. У режимі вибігу, як зазначено вище, сила тяги відсутня, але сила опору тертя зростає завдяки передачі обертового моменту від коліс ТЗ до двигуна.

У режимі гальмування вводять відповідні значення гальмівних сил.

Виконували інтегрування так: у колонках таблиці задали шляху s_i , значення рівня профілю z_i та обмеження швидкості. Крок інтегрування вибирали різним уздовж шляху, вводячи значення s_i , на віддалі: $s_{i+1} - s_i = 0,5$ до 20 м (6.36) залежно від режиму руху. У першому рядку задали початкове значення швидкості, відмінне від нуля $v > 0$. У наступному рядку в п'яти колонках рівняння руху та формули розрахунку коефіцієнтів згідно з вибраним методом інтегрування, наприклад Рунге – Кутта четвертого порядку. У наступних клітинах формули розрахунку струму залежно від швидкості (6.6)–(6.8), коефіцієнту корисної дії (6.9)–(6.11), часу руху, витрат електроенергії. Приклад розрахунків наведено в [108]. Інтегрування виконали шляхом копіювання відповідних розрахункових формул у наступні рядки таблиці. Після досягнення значень швидкості, які відповідають переходу в інший режим руху, у рядках таблиці змінювали розрахункові формули (6.3)–(6.5) і продовжували

інтегрування. У такий спосіб виконали інтегрування рівняння руху вздовж усього шляху. У разі потреби корекції режиму руху у таблицю додавали потрібну кількість рядків або зміщували клітини із формулами відносно значень шляху s_i .

Результат інтегрування рівняння руху тролейбуса (6.28) по заданій ділянці шляху в різних режимах регулювання наведений на рисунку 6.6, графіки зміни струму відповідно в різних режимах подано на рисунку 6.7. Характеристики двигуна відповідають даним, наведеним у довіднику [109].

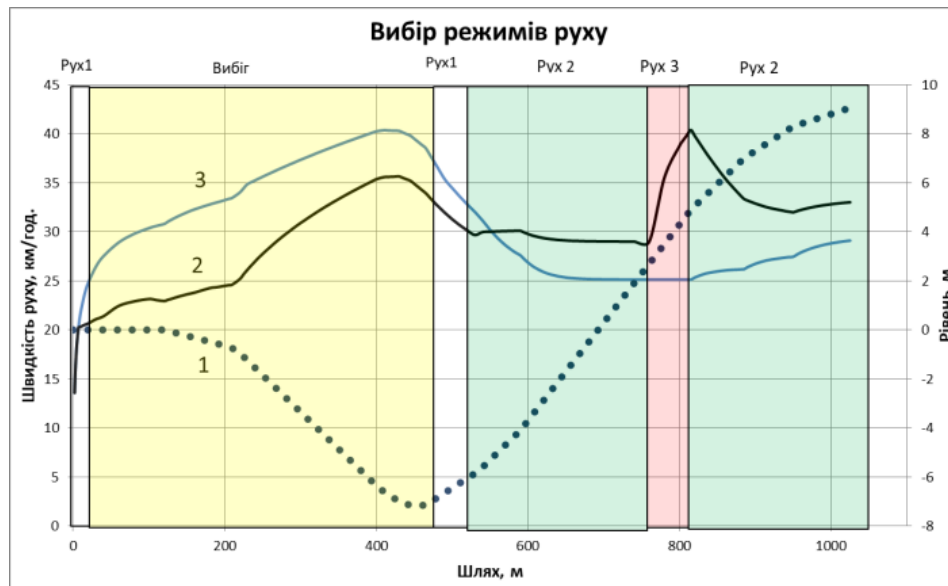


Рисунок 6.6 – Моделювання процесу керування водієм режимом руху тролейбуса

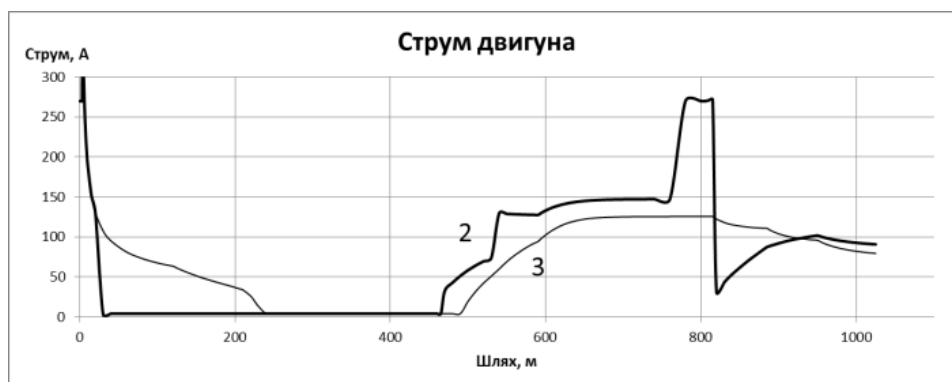


Рисунок 6.7 – Зміна струму двигуна в процесі регулювання руху водієм

На рисунку 6.6 наведено: 1 – схема профілю шляху з його ухилами та підйомами, 2 – графік зміни швидкості руху в режимі «Рух 1», 3 – графік зміни

швидкості руху при регулюванні водієм шляхом перемикання педалі швидкості. На рисунку 6.7 наведені графіки зміни струму двигуна під час проїзду різних ділянок шляху, у відповідних положеннях педалі швидкості.

Відповідно до графіка 3 (див. рис. 6.6) рух розпочинається з маневрового положення педалі швидкості, за якої тролейбус набирає швидкості до 1,5 м/с. Далі водій переводить педаль у положення «Рух 1», що відповідає руху в реостатних позиціях за 100 % магнітного поля двигуна. Характеристики двигуна подано в довіднику [108]. Відповідно до профілю маршруту тролейбус розганяється та рухається по горизонтальній ділянці, і в кінці ділянки швидкість становить 28 км/год. Далі розпочинається спуск по ділянці з ухилом до 30 ‰ проміле. Тролейбус прискорюється, водій відпускає педаль швидкості, тролейбус розганяється в режимі вибігу. У кінці ділянки швидкість досягає 40 км/год. За подальшого руху водій знову встановлює педаль швидкості в положення «Рух 1», швидкість тролейбуса дещо сповільнюється й він долає зтяжний підйом протяжністю понад 400 м з ухилом 40 ‰ проміле зі швидкістю 25 км/год.

Графік 2 (див. рис. 6.6) відповідає руху тролейбуса при активній зміні режиму руху водієм. Аналогічно попередньому, рух розпочинається на маневрових позиціях з переведенням педалі у положення «Рух 1». Водій, вже на початку горизонтальної ділянки, переходить на режим вибігу, з тим, щоб на спуску тролейбус не прискорився більше допустимої величини. Хоча допустима швидкість руху в містах України 50 км/год, у Харкові система керування рухом на основі супутникової навігації реєструє як перевищення швидкість більшу за 40 км/год. Після проїзду спуску водій перемикає педаль у положення «Хід 1» і продовжує рух на підйом. Протягом підйому він перемикає педаль швидкості в наступне положення «Хід 2», а потім для збільшення швидкості в положення «Хід 3» і знову переходить до положення «Хід 2». (див. рис. 6.6, 2).

На рисунку 6.7 наведено графіки зміни струму вздовж шляху за розглянутих режимів руху. За результатами моделювання розраховані витрати електроенергії. Для режиму, поданого графіком 3, вони становлять 1,598 кВт·год, а для регульованого режиму 2 – 1,434 кВт·год, тобто в результаті регульованого режиму руху економія електроенергії становить 11,2 %. Час руху в обох випадках однаковий, дорівнює 2,1 хв. У регульованому режимі швидкість тролейбуса вздовж маршруту стабільніша, ніж у нерегульованому.

Оскільки в монографії піднімалось питання про вагу ТЗ, то додатково побудували графік зміни ваги тролейбуса під час руху на кривих спряження

профілю шляху. Зміна ваги зумовлена прискоренням, викликаного рухом по кривій спряження профілю, це прискорення дорівнює:

$$a = \frac{v^2}{R_p}. \quad (6.37)$$

Кривизну дуги R_p , заданої дискретними значеннями $z(s_i)$, знаходимо за формулою:

$$K = \frac{\frac{z(s_{i+1}) - 2z(s_i) + z(s_{i-1}))}{(s_{i+1} - s_i)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{z(s_{i+1}) - z(s_i)}{(s_{i+1} - s_i)}\right)^2}}. \quad (6.38)$$

Враховуючи величину прискорення на кривих ділянках профілю шляху, згідно з рівнянням (6.38) знаходимо, що додаткова сила ваги тролейбусу під час їзди по маршруту змінюється, як показано на графіку на рисунку 6.8.

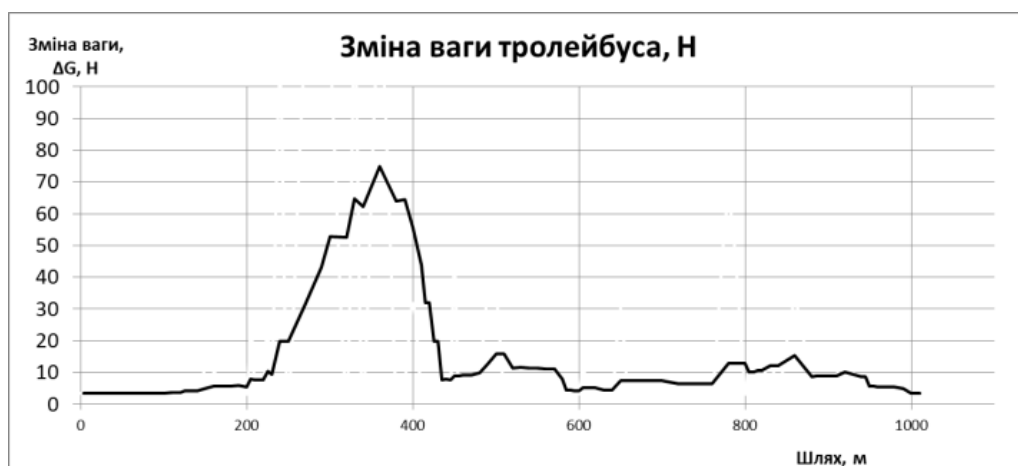


Рисунок 6.8 – Зміна сили ваги тролейбусу під час їзди вздовж маршруту

Зміна ваги у нашому випадку не перевищує 100 Н, що є незначною величиною. Як видно з графіка (рис. 6.6, 2) швидкість тролейбусу не перевищує 10 м/с, а радіус дуги спряження профілю приблизно 10 км. Для швидкісних видів транспорту на ділянках меншої кривизни зміна ваги суттєвою більша. У деяких випадках вага може вдвічі переважати вагу в стані прямолінійного руху, і навіть дорівнювати нулю під час долаття пагорбів невеликого радіуса. Приклади повної втрати ваги видно, якщо спостерігати автомобільні гонки.

На рисунку 6.6, 2 наведено графік руху за іншого режиму руху, а саме активного регулювання швидкості водієм шляхом зміни положень педалі

керування швидкістю. У цьому режимі руху витрати електроенергії зменшені на 0,164 кВт·год, тобто на 11 %.

Рух тролейбуса починається в маневровій позиції з переходом у перше положення «Рух 1» педалі швидкості. Після проїзду 30 м шляху та розгоні до швидкості 27 км/год водій переходить до режиму вибігу, враховуючи що подальший шлях має ухил до 30 % на протязі більше ніж 200 м. У кінці ухилу він набуває швидкості 36 км/год. Рух у режимі вибігу продовжується до віддалі 500 м, після якої тролейбус вже рухається на підйом. Його швидкість дещо зменшилась і він переходить до режиму «Рух 1». Далі рух на підйом здійснюється в положенні «Рух 2» із переходом на «Рух 3». На моделі ми можемо простежити за зміною швидкості впродовж шляху та вибрати оптимальний режим руху й режим, який задовольняє усім вимогам дорожнього руху. Тролейбус повинен набути швидкості, яка відповідає швидкості у цьому режимі. Подальший рух відбувається або за цього положенні педалі, або поступовим переходом до наступних «рух 2» та «рух 3».

Особливостям регулювання руху при реостатній системі керування є вимога, щоб перехід до наступної позиції контролера відбувався за відповідної швидкості. Це зумовлено тим, щоб не допускати великих стрибків струму при перемиканні режиму роботи двигуна, оскільки величина струму та швидкість руху взаємопов'язані.

Пуск		0	0	0,1						270
маневр	0	0,5	0	0,5						270
позиція	0	1	0	1						270
	0	1,5	0	1,5						270
	0	2	0	3,771	9,920179	0,7779	7,775	0,2259	13,576	270
	0	2,5	0	4,1627	0,93936	0,76012	0,79129	0,6585	14,986	270
	0	3	0	4,4525	0,660807	0,5708	0,58226	0,5108	16,029	270
Рух 1	0	3,5	0	4,6832	0,511405	0,45708	0,46256	0,4175	16,86	270
100%	0	4	0	4,875	0,417709	0,38127	0,38431	0,3532	17,55	270
	0	4,5	0	5,0393	0,353256	0,32707	0,32894	0,3061	18,142	270
	0	5	0	5,183	0,306111	0,28636	0,28759	0,27	18,659	270
	0	5,5	0	5,3107	0,270079	0,25464	0,25549	0,2416	19,118	270
	0	6	0	5,4255	0,241617	0,2292	0,22982	0,2185	19,532	268
	0	7	0	5,6255	0,21855	0,19861	0,20035	0,1833	20,252	244
	0	8	0	5,7955	0,183408	0,16918	0,17025	0,1578	20,864	225
	0	9	0	5,9432	0,157871	0,1472	0,1479	0,1384	21,396	210
	0	10	0	6,0738	0,138455	0,13015	0,13064	0,1232	21,866	197
	0	15	0	6,5627	0,123185	0,09307	0,09974	0,0779	23,626	156
	0	20	0	6,8964	0,078623	0,06517	0,06732	0,0568	24,827	133
	0	30	0	7,3451	0,056971	0,04258	0,04591	0,0353	26,442	108
	0	40	0	7,2246	-0,023434	-0,0237	-0,0237	0,046	26,009	0
	0	60	0	7,0433	-0,023709	-0,02428	-0,0243	0,0665	25,356	0
	0	80	0	6,8983	-0,024145	-0,02477	-0,02479	0,0797	24,834	0
Вибіг	0	100	0	6,7874	-0,024514	-0,02518	-0,0252	0,092	24,435	0
	0	110	0	6,7127	-0,024808	-0,02515	-0,02516	0,0806	24,166	0
	0	120	0	6,6463	-0,025013	-0,02537	-0,02537	0,0866	23,927	0
	-8	125	-0,04	6,6611	-0,014177	-0,01422	-0,01422	0,0888	23,98	0
	-8	130	-0,08	6,6751	-0,01416	-0,0142	-0,0142	0,0877	24,03	0
	-8	140	-0,16	6,7101	-0,014143	-0,01423	-0,01423	0,0921	24,157	0
	-8	150	-0,24	6,741	-0,014103	-0,01419	-0,01419	0,0894	24,268	0
	-8	160	-0,32	6,7683	-0,014067	-0,01415	-0,01415	0,087	24,366	0
	-8	180	-0,48	6,8519	-0,014036	-0,0142	-0,0142	0,0959	24,667	0
	-8	190	-0,56	6,8671	-0,013944	-0,01402	-0,01402	0,0791	24,722	0
	-9	200	-0,65	6,8927	-0,012594	-0,01265	-0,01265	0,0786	24,814	0
	-10	205	-0,7	6,9074	-0,011243	-0,01126	-0,01126	0,0738	24,867	0
	-10	210	-0,75	6,9213	-0,011233	-0,01125	-0,01125	0,0729	24,917	0
	-20	220	-0,95	7,0727	0,002007	0,00199	0,00199	0,0809	25,462	0
	-30	225	-1,1	7,2027	0,014769	0,01466	0,01466	0,0826	25,93	0
	-30	230	-1,25	7,3259	0,01438	0,01427	0,01427	0,0763	26,373	0
	-30	240	-1,55	7,5548	0,014022	0,01382	0,01383	0,068	27,197	0
	-30	250	-1,85	7,7645	0,013383	0,0132	0,0132	0,0596	27,952	0
	-30	270	-2,45	8,1389	0,012825	0,0125	0,0125	0,0495	29,3	0
	-30	290	-3,05	8,4694	0,011888	0,0116	0,01161	0,0408	30,49	0
	-30	300	-3,35	8,6223	0,011116	0,01099	0,01099	0,0367	31,04	0
	-30	320	-3,95	8,9066	0,010775	0,01054	0,01055	0,0323	32,064	0
	-30	330	-4,25	9,0402	0,010166	0,01006	0,01006	0,0297	32,545	0
	-30	340	-4,55	9,1686	0,00989	0,00979	0,00979	0,028	33,007	1
	-30	360	-5,15	9,4111	0,00963	0,00944	0,00944	0,0254	33,88	2
	-30	380	-5,75	9,6377	0,009155	0,00898	0,00898	0,0229	34,696	3
	-30	390	-6,05	9,746	0,008727	0,00865	0,00865	0,0217	35,086	4
	-30	400	-6,35	9,8511	0,008528	0,00845	0,00845	0,0207	35,464	5
	-25	410	-6,6	9,9078	0,00369	0,00367	0,00367	0,0156	35,668	6
	-20	415	-6,7	9,9127	-0,001006	-0,001	-0,001	0,0109	35,686	7
	-20	420	-6,8	9,9175	-0,00101	-0,00101	-0,00101	0,0109	35,703	8
	-20	425	-6,9	9,9223	-0,001015	-0,00101	-0,00101	0,0108	35,72	9
	-20	430	-7	9,9271	-0,001019	-0,00102	-0,00102	0,0108	35,737	10
Вибіг	-10	435	-7,05	9,8859	-0,010247	-0,01025	-0,01025	0,0018	35,589	11
	-10	440	-7,1	9,8449	-0,010251	-0,01025	-0,01025	0,0021	35,442	12
	-10	445	-7,15	9,8041	-0,010254	-0,01026	-0,01026	0,0024	35,295	13

Рисунок 6.9 – Результати інтегрування рівняння руху

100%	20	470	-7,05	9,3955	-0,02446	-0,02414	-0,02414	-0,024	33,824	41
	20	480	-6,85	9,1647	-0,023803	-0,02307	-0,0231	-0,022	32,993	45
	20	490	-6,65	9,0891	-0,008239	-0,00752	-0,00758	-0,007	32,721	47
	20	500	-6,45	9,0262	-0,006899	-0,00626	-0,00632	-0,006	32,494	48
	20	510	-6,25	8,9743	-0,005717	-0,00516	-0,00521	-0,005	32,307	50
	20	520	-6,05	8,9318	-0,004695	-0,00422	-0,00427	-0,004	32,155	51
	20	530	-5,85	8,8973	-0,003826	-0,00342	-0,00347	-0,003	32,03	51
	25	540	-5,6	8,823	-0,008244	-0,00737	-0,00746	-0,007	31,763	53
	30	550	-5,3	8,7169	-0,011838	-0,01053	-0,01068	-0,009	31,381	56
	30	560	-5	8,633	-0,009445	-0,00831	-0,00845	-0,007	31,079	58
Рyx 2	30	570	-4,7	8,5678	-0,007396	-0,00645	-0,00657	-0,006	30,844	60
50%	30	580	-4,4	8,5179	-0,005702	-0,00493	-0,00504	-0,004	30,664	62
	30	585	-4,25	8,4976	-0,00434	-0,00404	-0,00406	-0,004	30,591	62
	30	590	-4,1	8,48	-0,003772	-0,0035	-0,00352	-0,003	30,528	63
	40	595	-3,9	8,4144	-0,014069	-0,01309	-0,01316	-0,012	30,292	65
	40	600	-3,7	8,3576	-0,012215	-0,01132	-0,01138	-0,011	30,087	66
	40	605	-3,5	8,3088	-0,010526	-0,00971	-0,00978	-0,009	29,912	68
	40	610	-3,3	8,2672	-0,009009	-0,00829	-0,00834	-0,008	29,762	69
	40	620	-2,9	8,2021	-0,007663	-0,00638	-0,0066	-0,005	29,528	72
	40	630	-2,5	8,1561	-0,005461	-0,0045	-0,00467	-0,004	29,362	73
	40	640	-2,1	8,1241	-0,003829	-0,00313	-0,00326	-0,003	29,247	74
	40	650	-1,7	8,1019	-0,002653	-0,00216	-0,00225	-0,002	29,167	75
	40	660	-1,3	8,0868	-0,001823	-0,00148	-0,00154	-0,001	29,112	76
	40	680	-0,5	8,0695	-0,001246	-0,00077	-0,00095	-5E-04	29,05	76
	40	700	0,3	8,0615	-0,000578	-0,00035	-0,00044	-2E-04	29,021	77
	40	720	1,1	8,0578	-0,000266	-0,00016	-0,0002	-1E-04	29,008	77
	40	740	1,9	8,0561	-0,000122	-7,4E-05	-9,3E-05	-5E-05	29,002	77
	40	760	2,7	8,0554	-5,58E-05	-3,4E-05	-4,2E-05	-2E-05	28,999	77
Рyx 3	40	780	3,5	9,8674	0,142594	0,07237	0,1021	0,0521	35,523	32
31%	40	800	4,3	10,77	0,059112	0,04218	0,04666	0,0339	38,771	21
	40	805	4,5	10,934	0,034639	0,03269	0,0328	0,031	39,361	20
	40	810	4,7	10,731	-0,040749	-0,04052	-0,04052	-0,04	38,632	22
	40	815	4,9	10,531	-0,040252	-0,03995	-0,03995	-0,04	37,913	24
	30	820	5,05	10,379	-0,030911	-0,03055	-0,03055	-0,03	37,363	25
	30	830	5,35	10,086	-0,030167	-0,02931	-0,02934	-0,028	36,308	29
	30	840	5,65	9,8124	-0,028379	-0,02731	-0,02736	-0,026	35,325	33
	30	860	6,25	9,3403	-0,026192	-0,02351	-0,02382	-0,021	33,625	42
	30	880	6,85	8,9816	-0,020856	-0,01769	-0,01821	-0,015	32,334	49
	30	885	7	8,91	-0,015038	-0,01432	-0,01435	-0,014	32,076	51
	20	890	7,1	8,894	-0,003367	-0,00319	-0,0032	-0,003	32,018	52
	20	900	7,3	8,8668	-0,003027	-0,0027	-0,00274	-0,002	31,92	52
Рyx 2	20	910	7,5	8,8449	-0,002436	-0,00217	-0,0022	-0,002	31,842	53
50%	20	920	7,7	8,8274	-0,001952	-0,00173	-0,00176	-0,002	31,779	53
	20	940	8,1	8,8024	-0,001559	-0,0012	-0,00128	-1E-03	31,689	54
	20	945	8,2	8,7978	-0,000986	-0,00093	-0,00093	-9E-04	31,672	54
	20	950	8,3	8,7936	-0,000878	-0,00083	-0,00083	-8E-04	31,657	54
	10	955	8,35	8,839	0,009631	0,00905	0,00908	0,0085	31,82	53
	10	960	8,4	8,8793	0,008541	0,00804	0,00807	0,0076	31,965	52
	10	970	8,5	8,9474	0,007604	0,00675	0,00684	0,0061	32,211	50
	10	980	8,6	9,0022	0,006087	0,00543	0,0055	0,0049	32,408	49
	10	990	8,7	9,0467	0,004923	0,00442	0,00447	0,004	32,568	48
	10	1000	8,8	9,0831	0,004014	0,00361	0,00365	0,0033	32,699	47
	10	1010	8,9	9,113	0,003294	0,00297	0,00301	0,0027	32,807	46
	10	1020	9	9,1378	0,002717	0,00246	0,00248	0,0022	32,896	46
	10	1025	9,05	9,1485	0,00225	0,00215	0,00215	0,002	32,935	46

Продовження рисунка 6.9

6.7 Аналіз одержаних результатів

У роботі розглянуто питання використання одиниць вимірювання й показано, що у чинній теорії електричної тяги одночасно використовуються одиниці двох різних систем вимірювання – СІ та МКГСС. Це призводить до змішування понять маси та ваги, використання позасистемних одиниць, великої кількості коефіцієнтів, що не відповідає загальнонауковим принципам. Таке становище виникло під час переходу до міжнародної системи одиниць. Воно пов'язане із намаганням зберегти раніше прийняті й закріплені у великій кількості документів та навчальних посібниках числові дані та методи розрахунку. Вже назріла необхідність остаточно відмовитись від системи МКГСС та повністю перейти до СІ, переробивши діючу нормативну документацію та навчальну літературу.

Показано, що використання розрахунків у питомих одиницях є джерелом похибок у результатах розрахунків. Виконаний аналіз показав, що відмова від таких розрахунків і перехід до індивідуальних розрахунків не тільки веде до збільшення точності розрахунків, але усуває проблеми із застосування несистемних одиниць вимірювання, змішування понять і використання «ваги» замість маси ТЗ.

Методи чинної ТЕТ передбачають виняткове використання математичної моделі ТЗ як матеріальної точки та рівнянь Ньютона для аналізу руху. Це дозволяє виконати низку завдань теорії та експлуатації електричного транспорту, проте вимагає великого обсягу обчислень, але передбачає низку спрощень, які зменшують точність розрахунків. Із використанням такої моделі ТЗ та рівнянь Ньютона у монографіях [86, 87] цитується понад 50 наукових робіт. Попри заяву авторів, що альтернативи використаним методам немає, запропонований у цій монографії метод є альтернативним. Він дозволяє одержати аналогічні результати та багато інших результатів суттєво простіше і з більшою точністю.

У цій роботі використана модель ТЗ як матеріального тіла та рівняння Лагранжа. Це дозволяє суттєво розширити коло завдань, які підлягають теоретичному аналізу й істотно зменшує об'єм розрахункових робіт. Такий підхід є альтернативою відомим методам виконання тягових розрахунків і дозволяє виконати аналіз не тільки механіки руху, але й розглядати енергетичні процеси взаємного перетворення електричної енергії в механічну, механічної в теплову. Одержані рівняння руху, з використанням узагальнених координат та сил, суттєво простіші та мають ширше використання, ніж рівняння Ньютона.

Перевагою запропонованого методу є те, що розрахунки не потребують розбиття шляху на розрахункові ділянки, спрямленням та приведенням шляху, що багаторазово збільшує обсяги обчислень та зменшує точність одержаних результатів. За розглянутого альтернативного методу розрахунків питання спрощення профілю не виникають, шлях подається у тому вигляді, як закладено в проєктній документації. Автоматично враховуються додаткові сили опору, зумовлені ухилами профілю шляху, перехідними ділянками між різними ухилами.

Розглянутий метод тягових розрахунків веде до рівнянь руху, які підлягають інтегруванню загалом, не потребують окремих додаткових операцій декомпозиції, припасування результатів окремих розрахунків тощо.

Інтегрування рівняння руху виконується уздовж усього шляху з урахуванням конкретних дій водія щодо керування рухом ТЗ. Це дозволяє вже на етапах розрахунку руху оптимізувати режими руху. У наведеному прикладі завдяки вибору керованого режиму руху одержана економія електроенергії.

Розглянутий метод розрахунків передбачає можливість доповнення методів розрахунків математичною моделлю двигуна, наприклад приведеною в роботах [107, 110], і спільного розгляду методів керування роботою двигуна, процесів перетворення електричної енергії та динаміки руху ТЗ. Це відкриває перспективи вирішення проблем оптимізації режимів руху, вирішення проблем енергоефективності. Це відкриває широкі можливості удосконалення систем автоведення залізничних поїздів, які вже використовуються.

До недоліків роботи варто зарахувати спрощений аналіз руху. Замість аналізу 18 позицій регулювання враховано тільки 4. Це дозволило в найбільш простий спосіб продемонструвати всі особливості запропонованого методу. Проте також призвело до того, що режими руху, відображені на графіках, мають різкі зміни. Точність результатів занижена.

Впровадження запропонованих рекомендацій потребує переробки технічної документації, інструкцій, методичних рекомендацій та навчальних посібників. Це великий обсяг роботи, проте його необхідно виконати, щоб привести теорію електричної тяги до більш високого наукового рівня та до вимог чинного стандарту міжнародних одиниць вимірювання.

ВИСНОВКИ

1. «Теорія електричної тяги» це прикладна наукова дисципліна. Вона об'єднує досягнення, одержані за півтора століття розвитку електричного транспорту, його конструювання, виробництва та експлуатації. У розвиток наукової дисципліни значний внесок зробили такі вчені, як: Е. П. Берч, Е. Е. Зеефельнер, А. В. Вульф, Д. Р. Пауэлл, Г. Кемпер, В. Е. Розенфельд, И. П. Ісаев, Г. К. Гетьман, С. И. Кутиловський, Л. С. Байриєва, В. А. Анісімов, В. А. Дзензерський, М. Б. Курган, О. Б. Мокін, В. Д. Борисенко, С. А. Устенко, В. А. Поляков, К. К. Ким, М. В. Тарнишевський та ін.

2. Теорія електричної тяги це дисципліна, яка пройшла перевірку практикою, підтримана науковцями, викладається в навчальних закладах, використовується під час експлуатації різних типів електричного транспорту.

3. Ця наукова дисципліна, яка охоплює цілий ряд наукових та технічних напрямків від механіки і електротехніки до електродинаміки, електроніки, кріогенної техніки, систем керування та штучного інтелекту.

4. Методи тягових розрахунків, розроблені в рамках теорії електричної тяги, слугували та служать основою розробки та проектування транспортних засобів, проектування тягових мереж електроживлення, є основою та підґрунтям експлуатації ТЗ.

5. ТЕТ є основою розробки нових видів транспорту на повітряній та магнітній подушці, які працюють на нових фізичних принципах забезпечення руху ТЗ. Наземні транспортні засоби створені на основі нових фізичних принципів є конкурентами авіації, вони розвивають швидкості до 800 км/год.

6. Методи розрахунку електричної тяги є основою розробки систем автоведення ТЗ, розробки інтелектуальних систем, які забезпечують керування рухом звичайних та високо швидкісних видів транспорту. Ці систем працюють швидше та надійніше від самих досвідчених водіїв та забезпечують безпеку руху.

7. Розвиток електричного транспорту зі збільшенням швидкостей руху, упровадженням інформаційних технологій та систем керування, викликає необхідність подальшого розвитку теорії електричної тяги, збільшення точності розрахунків, спрощення їх, розширення кола завдань, які вирішує теорія.

8. У ТЕТ використовують застарілі поняття механіки руху, намітився відрив теорії від рівня розвитку інших наук. Впровадження нових інформаційних технологій – електроніки, комп'ютерів, комп'ютерних мереж, супутникових засобів навігації, розвиток і поява нових видів транспорту, збільшення швидкостей руху – вимагає розвитку теорії, використання більш

точніших і досконаліших методів розрахунку, розгляду ширшого кола питань роботи вузлів, особливостей експлуатації ТЗ.

9. Як прикладна наукова дисципліна ТЕТ використовує поняття, які склалися протягом століття. Правомірність використання деяких понять та позасистемних одиниць вимірювання пояснюється тим, що вони дозволяють отримати результати, які задовольняли практику та є звичними для спеціалістів. На сьогоднішній день деякі з цих понять є застарілі, а одиниці вимірювання фізичних величин не підтримуються іншими науковими дисциплінами.

10. У теорії та практиці експлуатації електричного транспорту одночасно використовується дві несумісні між собою системи одиниць вимірювання: міжнародна системи СІ та технічна система МКГСС, що недопустимо. Замість поняття маси як міри кількості речовини використовується застаріле, науково неправильне поняття «вага», визначене за аналогією до технічної системи одиниць МКГСС. Розрахунки виконуються в питомих одиницях, віднесених до «ваги». Це призводить до некоректних математичних операцій, оскільки не всі величини, що входять у рівняння руху, можна привести до питомих величин. У результаті рівняння ускладняється, з'являються одиниці вимірювання, які не узгоджені ні з однією метрологічною системою, велика кількість коефіцієнтів узгодження одиниць вимірювання та похибки в результатах розрахунків.

11. Розвиваючи теорію електричної тяги як науковий напрямок потрібно відмовитись від застарілого підходу та оперувати загально прийнятими фізичними уявленнями й узаконеною системою одиниць вимірювання, а саме міжнародною системою одиниць СІ.

12. У цій монографії запропоновано виконувати тягові розрахунки із врахуванням індивідуальних параметрів транспортного засобу та шляху руху. Це одночасно зі збільшенням точності розрахунків забезпечує повний перехід до міжнародної системи одиниць СІ та дотримання науково визначених понять маси та ваги.

13. Рекомендовано у навчальному процесі та у сфері експлуатації електричного транспорту застосовувати модель руху ТЗ як матеріального тіла замість моделі матеріальної точки.

14. Як математичний апарат теорії електричної тяги та тягових розрахунків потрібно використовувати математичний апарат рівнянь Лагранжа II роду. Це дозволяє виконати детальний аналіз динаміки руху та розширює коло питань, які підлягають теоретичному вивченню.

15. Використання альтернативного методу Лагранжа спрощує виконання тягових розрахунків, оскільки не потребує поділу шляху на розрахункові ділянки, виконання операцій спрямлення та приведення, розв'язання рівнянь

руху для кожної окремої ділянки. Запропоновані методи потребують тільки детального опису шляху, без будь-яких спрямлень та приведень, та розв'язку одного рівняння руху упродовж усього шляху.

16. У монографії уточнено розрахунок ефективної маси частин ТЗ що обертаються та показано, що під час її розрахунку необхідно враховувати кінетичну енергію обертального руху тільки того обладнання, яке одержує енергію від двигуна чи трансмісії транспортного засобу та обмінюється нею з ТЗ.

17. Виконано аналіз впливу складного профілю та плану шляху на режим руху транспортних засобів, виявлені та враховані сили, які діють на транспортні засоби та конструкцію залізничної колії на просторових криволінійних ділянках.

18. Проведені тягові розрахунки із врахуванням зміни ваги транспортного засобу під час руху.

19. Враховано обертальний рух транспортного засобу, викликаний рухом по просторових криволінійних ділянках шляху.

20. Показано, що завдяки використанню запропонованого методу, вже на етапі виконання тягових розрахунків, враховуються дії водія по керуванню рухом транспортного засобу та забезпечується можливість вибору режиму руху з урахуванням дорожніх знаків, спеціальних частин тягової мережі, вимог графіка руху та економної витрати електроенергії.

21. У цій монографії розглянуто коло завдань тягових розрахунків, які включають визначення швидкості руху та витрат електроенергії упродовж шляху і опис зміни цих параметрів під час руху ТЗ. Розгляд цих завдань є необхідним, початковим етапом подальшого розвитку теорії електричної тяги в наміченому напрямку. Вони охоплюють питання, які вирішує чинна ТЕТ, розглянуті у відомих джерелах [18–23, 25–29, 86–87]. Запропоновані методи розрахунків спрощують розрахунки, при суттєвому збільшенні їх точності. Вони дозволяють виявити додаткові чинники, що діють на рух ТЗ, як наприклад, сили, які виникають на ділянках спряження просторових криволінійних ділянок шляху, врахувати зміну ваги ТЗ під час його руху, в той час як чинна ТЕТ, вважає вагу ТЗ постійною.

22. Дослідження і продовження роботи у розглянутому напрямку є необхідним, важливим етапом подальшого розвитку наукової дисципліни «Теорія електричної тяги».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дротянко Л. Г. Феномен фундаментального і прикладного знання : (Постнекласичне дослідження) [Електрон. ресурс] / Л. Г. Дротянко. –Електрон. текст. дані. – Київ : Вид-во Європ. ун-ту фінансів, інформ. систем менеджм. і бізнесу, 2000. – 423 с. – Режим доступу: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/10134>, вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрана.
2. Марцин В. С. Основи наукових досліджень : навч. посіб. / В. С. Марцин, Н. Г. Міценко, О. А. Даниленко. – Львів : Ромус-Поліграф, 2002. – 128 с.
3. Перший трансатлантичний кабель [Електрон. ресурс] – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: <http://hi-news.pp.ua/tehnika-tehnologyi/10516-pershiy-transatlantichniy-kabel.html>, вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрана.
4. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Теория поля / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 7-е изд., испр. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 512 с.
5. Rainer Weiss. Gravitational waves finally captured [Electronic resource] / Rainer Weiss, C Barry. Barish, S. Kip – Electronic text data. – // Thorne The Nobel Prize in Physics 2017.– Regime of access: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/press-40.pdf> , free (date of the application: 16.09.2022). – Header from the screen.
6. Великі перспективи слабого сигналу. Нобелівська премія з фізики 2017 р. // Вісник Національної академії наук України. – 2017. – № 12. – С. 63 – 72.
7. Шевлюгин М. В. Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитене, реализуемые с использованием накопителей электроэнергии : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. / М. В. Шевлюгин. – М. : МГУПС (МИИТ), 2013. – 345 с.
8. Про особливості запровадження переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 29 квітня 2015 року № 266 [Електрон. ресурс] : наказ МОН від 06.11.2015 № 1151– Електрон. текст. дані. – Режим доступу: <https://imzo.gov.ua/2015/11/06/nakaz-mon-vid-6-11-2015-1151-pro-osoblivosti-zaprovadzhennya-pereliku-galuzey-znan-i-spetsialnostey-za-yakimi-zdiysnyuyetsya-pidgotovka-zdobuvachiv-vishhoji-osviti-zatverdzenogo-postanovoju/>, вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрана.

9. Хакен Г. Синергетика (Synergetics) / Г. Хакен. – М. : Мир, 1980. – 405 с.
10. Енциклопедія кібернетики : у 2 т. / за ред. В. М. Глушкова. – Київ : Гол. ред. Української радянської енциклопедії, 1973. – 570 с.
- 11 Bertalanffy L. von. General System Theory. Foundation, Development, Applications. / L. Bertalanffy. – New York : George Braziller, 1968. – 289 p.
- 12 Сорока К. О. Основи теорії систем і системного аналізу : навч. посіб. / К. О. Сорока. – Харків : ХНАМГ, 2004. – 291 с.
13. Геоінформаційний підхід до дослідження урбаністичних географічних систем (на прикладі м. Харків та області) / S. V. Kostrikov, L. M. Niemets, K. Y. Sehida та ін. // Вісник ХНУ ім. В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», (49), 2018. – С. 107–124.
14. Доля К. В. Геоінформаційні системи на транспорті : навч. посіб. / К. В. Доля, О. Є. Доля ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 230 с.
15. Вяткін К. І. Геоінформаційні технології для транспортної галузі міського будівництва / К. І. Вяткін, С. Г. Нестеренко, К. А. Мамонов ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. – Харків : ХНУМГ, 2017. – Вип. 6. – С. 56.
16. Таненбаум Э. Компьютерные сети / Э. Таненбаум. – 4-е изд. – СПб. : Питер, 2009. – 992 с.
17. Soroka K. Development of CAN network with improved parameters for adaptive car front lighting system / K. Soroka, V. Kharchenko, V. Pliuhin // European Journal of Enterprise Technologies (EEJET). Vol. 4, 2020 – № 9 (106) – p. 24–33.
18. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. Т. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М. : Транспорт, 1983. – 328 с.
19. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. И. Сидоров, М. И. Озеров. – М. : Транспорт, 1995. – 297 с.
20. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги : монография : [в 2-х т.] / В. К. Гетьман. – Днепропетровск : Изд-во Маковецкий, 2011. – Т. 1 – 456 с.
21. Основи електричної тяги : навч. посіб. / В. Х. Далека, П. М. Пушков, В. П. Андрійченко, Ю. В. Мінеєва ; Харків. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків : ХНАМГ, 2012. – 312 с.
22. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги : монография : [в 2-х т.] / Г. К. Гетьман. – Днепропетровск : Изд-во Маковецкий, 2011. – Т. 2. – 364 с.
23. Кутыловский М. П. Электрическая тяга / М. П. Кутыловский. – М. : Стройиздат, 1970. – 263 с.

24. Сорока К. О. Теорія автоматичного керування і комп'ютерне моделювання (неперервні лінійні системи) : навч. посіб. : [в 2-х ч.] / К. О. Сорока. – Харків : ФОП Тімченко, 2010. – Ч. 2 : Аналіз системи автоматичного керування засобами комп'ютерного моделювання. – 218 с.
25. Деев В. В. Тяга поездов : учеб. пособ. / В. В. Деев, Г. А. Ильин, Г. С. Афонин. – М. : Транспорт, 1987. – 264 с.
26. Байрыева Л. С. Электрическая тяга. Городской электрический транспорт : учебник для техникумов / Л. С. Байрыева, В. В. Шевченко. – М. : Транспорт, 1986. – 206 с.
27. Основы электрической тяги, системы и режимы тяговых сетей постоянного тока : учеб. пособ. / В. И. Омеляненко, Н. Н. Калужный, Г. В. Омеляненко, Б. Г. Любарский. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2002. – 164 с.
28. Теория электрической тяги : учебник для вузов ж-д. транспорта / С. И. Осипов, С. С. Осипов, В. П. Феоктистов; под ред. С. И. Осипова. – М. : Маршрут, 2006. – 436 с.
29. Анисимов В. А. Тяговые расчеты [Электрон. ресурс] : монография / В. А. Анисимов, В. В. Анисимов. – Электрон. текст. данные. – Хабаровск, 2013. – Режим доступа: <https://sites.google.com/site/tagapoezd/monografia>, свободный (дата обращения: 16.09.2022). – Заголовок с экрана.
30. Значение вес и взвешивание [Электрон. ресурс] : в Энциклопедии Брокгауза и Ефрона – Электрон. текст. данные. – Режим доступа: <https://slovar.cc/enc/brokhauz-efron/1591539.html>, свободный (дата обращения: 16.09.2022). – Заголовок с экрана.
31. Вульф А. В. Электрическая тяга / А. В. Вульф. – 2-е изд., доп. и перераб. – Ленинград : «КУБУЧ», 1926. – 352 с.
32. Приходько В. І. Адміністративно-правова профілактика транспортних пригод в Україні : автореф. дис. ... канд. юрид. наук : 12.00.07 / В. І. Приходько; – Київ : Держ. НДІ МВС України, 2020. – 19 с.
33. Дамиров А. За трамваем – будущее!!! [Электрон. ресурс] / Андрей Дамиров // LiveJournal : блог-платформа. – Электрон. данные. – Обновляется постоянно. – Режим доступа: <https://radimir-87.livejournal.com/5474.html>, свободный (дата обращения: 16.09.2022). – Заголовок с экрана.
34. Bordeaux Light Rail Route Will Operate Without Overhead Lines [Electronic resource] : press release // American Public Transportation Association. – Electronic text data. – Regime of access: <https://web.archive.org/web/20081201155854/http://www.apta.com/services/intnatl/intfocus/bordeaux.cfm>, free (application date: 29.12.2017). – Archived 01.12.2008. – Title from the screen.

35. Swanson J. Light Rail Without Wires A Dream Come True? / J. Swanson // Transportation Research Circular E-C058 : 9th National Light Rail Transit Conference, P. 729–744.
36. Зварич І. А. Особливості розвитку наземного пасажирського транспорту в містах України / І. А. Зварич, С. В. Дубова // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. зб. Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ : КНУБА, 2013. – Вип. 49. – С. 207–212.
37. Сорока К.О. Система автоматизованого вибору швидкісного режиму руху засобів електротранспорту з метою зменшення витрат електроенергії / К. О. Сорока, Т. П. Павленко, Д. О. Личов // Наука і прогрес транспорту. Вісник ДПУ ім. Лазаряна. : наук.-техн. зб. – Дніпро, 2017. – № 3 (69). – С. 77–91.
38. Зеефельнер Е. Е. Электрическая тяга: теория и применение электрической тяги на железных дорогах : пер с англ. / Е. Е. Зеефельнер. – М. : Изд. НКПС, 1926. – 751 с.
39. Burch E. P. Electric traction for railway trains : A book for students, electrical and mechanical engineers, superintendents of motive power and others interested in the development of electric traction for railway train service / Edward P. Burch. – London : McGraw-Hill Book Company, 1911. – 608 p.
40. Далека В. Х. Електропостачання електричного транспорту : навч. посіб. / В. Х. Далека, В. К. Нем, В. І. Скуріхін ; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харьков : ХНАМГ, 2012. – 168 с.
41. Стреліна О. М. Оцінка ефективності впровадження проекту будівництва метрополітену у м. Донецьку [Електрон. ресурс] / О. М. Стреліна, О. С. Безгіна ; Донецький нац. ун-т // Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку. Вісник нац. ун-т «Львівська політехніка». – Електрон. текст. дані. – Львів, 2013. – № 776. – С. 382–389. – Режим доступу: <https://vlp.com.ua/taxonomy/term/3313?page=1>, вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрана.
42. Сорока К. О. Пакет программ обработки результатов сплошного талонного обследования пассажиропотоков на метрополитене. / К. О Сорока // Тезисы докладов XXIX наук.-техн. конф. преп., асп. и сотр. – Харьков : ХДАМГ, 1998.
44. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи : підручник / М. С. Сегеда. – 2-ге вид. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. – 488 с.
45. Електротранспорт України : енциклопедичний путівник / С. Тархов, К. Козлов, А. Оландер та ін. – Київ : Сидоренко В. Б., 2010. – 912 с. – ISBN 978-966-2321-11-1.

45. Корниенко В. В. Высокоскоростной электрический транспорт. Мировой опыт / В. В. Корниенко, В. И. Омельченко. – Харьков : НТТУ «ХПИ», 2007. – 159 с.

47. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией : монография / В. А. Дзензерский, В. И. Омеляненко, С. В. Васильев и др. – Киев : Наук. думка, 2001. – 479 с.

48. Patent No. DE643316C DE. B 60 L 13/10. Schwebebahn mit Räderlosen Fahrzeugen, die an eisernen Fahrschienen mittels magnetischer Felder entlang schwebend geführt werden [Electronic resource] / HERMANN KEMPER DIPL ING (De). – Application filed 1934-08-11 ; Publication 1937-04-05. – Electronic text data. – Regime of access: <https://patents.google.com/patent/DE643316C/de>, free (application date: 16.09.2022). – Title from the screen.

49. Шмидт В. В. Введение в физику сверхпроводников. / В. В. Шмидт. – М. : МЦНМО, 2000. – 402 с.

50. Patent No. US3470828A USA. B 60 V 3/04. Electromagnetic inductivesuspension and stabilization system for a ground vehicle [Electronic resource] / James R. Powell Jr, Gordon T. Danby (United States). – Application filed 1967-11-21 ; Publication 1969-10-07. – Electronic text data. – Regime of access: <https://patents.google.com/patent/US3470828A/en>, free (application date: 16.09.2022). – Title from the screen.

51. Приголомшлива надпровідність [Електрон. ресурс] : повідомл. НАН України (за ст. журн. «Nature») // Центр практ. інформатики НАН України : сайт. – Київ, 2017. – Оновлюється постійно. – Електрон. дані. – Режим доступу: <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=7095>, вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрана.

52. Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride [Electronic resource] / E. Snider, Na. Dasenbrock-Gammon, R. McBride [etc.] // Nature. – Electronic text data. – 2020. – Vol. 586. – P. 373–377. – Regime of access: <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2801-z>, free (application date: 16.09.2022). – Title from the screen.

53. Patent No. US5809897A, USA. E 01 B 25/305. Electromagneticinduction ground vehicle levitation guideway [Electronic resource] / J. R. Powell, G. T. Danby, J. Morena (United States). – Application filed 1997-05-12 ; Publication 1998-09-22. – Electronic text data. – Regime of access: <https://patents.google.com/patent/US5809897>, free (application date: 16.09.2022). – Title from the screen.

54. Советский маглев: будущее, которое не случилось [Электрон. ресурс]. – Електрон. текст. дані. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/vk/blog/410545/>, свободный (дата обращения: 16.09.2022). – Заголовок с экрана.

55. В Китае представили прототип поезда на магнитной подушке, который разгоняется до 620 км/ч [Электрон. ресурс] / Юго-западный университет Цзяотун. – Электрон. текст. данные. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/news/t/538036/>, свободный (дата обращения: 16.09.2022). – Заголовок с экрана.

56. Скрипин В. Поезда на магнитной подушке – транспорт, способный изменить мир [Электрон. ресурс] / В. Скрипин. – Электрон. текст. данные. – Режим доступа: <https://itc.ua/articles/poezda-na-magnitnoy-podushke-transport-sposobnyi-izmenit-mir/>, свободный (дата обращения: 16.09.2022). – Название с экрана.

57. Киселев И. П. Краткий обзор истории высокоскоростных поездов в Японии. / И. П. Киселев // ЖДМ, 2005. – № 7. – Ч. 1 : Поезда Синкансен.

58. Сивухин Д. В. Общий курс физики / Д. В. Сивухин. – М. : Физматлит, 2005. – 560 с.

59. Губська В. В. Теоретична механіка. Кінематика твердого тіла та динаміка точки : конспект лекцій / В. В. Губська. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, ЕЛАКРІ, 2018. – 105 с.

60. Лобас Л. Г. Теоретична механіка : підручник для студентів вищих технічних навчальних закладів / Л. Г. Лобас, Людм. Г. Лобас. – Київ : ДЕПУТ, 2008. – 406 с.

61. Єжов С. М. Класична механіка / С. М. Єжов, М. В. Макарець, О. В. Романенко. – Київ : ВПЦ «Київський університет», 2008. – 480 с.

62. Герасименко Н. О. 3 історії української метрології: міри площі / Н. О. Герасименко. – Київ : НАНУ, Український історичний журнал, 2016. – № 4. – С. 123–132.

63. Метрологія, стандартизація та управління якістю / Л. П. Клименко та ін. – Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. – 243 с.

64. Власов А. Д. Единицы физических величин в науке и технике : справочник / А. Д. Власов, Б. П. Мури. – М. : Энергоатомиздат, 1990 – 176 с.

65. Міжнародна система одиниць (СІ). Глава 3 [Електрон. ресурс]. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: http://cde.kpi.kharkov.ua/cdes/Yak/2_LP/3/Glava3.htm, вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрана.

66. Міжнародна система одиниць (СІ). Глава 2 : Стислі відомості про попередні системи одиниць і деякі позасистемні одиниці. – [Електрон. ресурс]. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: http://cde.kpi.kharkov.ua/cdes/Yak/2_LP/2/Glava2.htm, вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрану.

67. ГОСТ 9867-61. Международная система единиц [Электрон. ресурс] – Электрон. текст. данные. – М. : Тип. «Московский печатник», 1961. – 5 с. Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294747/4294747252.pdf>, свободный (дата обращения: 16.09.2022). – Заголовок с экрана.

68. ДСТУ 3651.0-97. Основні одиниці фізичних величин міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення. – Київ : Держстандарт України, 1998.

69. Сорока К. О. Конспект лекцій з курсу «Моделювання електромеханічних систем» (для студентів 4 курсів денної і заочної форм навчання напряму підготовки 0922 (6.050702) – «Електромеханіка») – [Електрон. ресурс] / К. О. Сорока; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНАМГ, 2010. – 189 с. – Режим доступу: http://eprints.kname.edu.ua/18519/1/СЮ_печ_вар_2010_Конспект_лекцій_МЕС_2_010-A1_2010-.pdf, вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрана.

70. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Электрон. ресурс]. / Утверждено МПС СССР от 15 августа 1980 г. – Электрон. текст. данные. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200079084>, свободный (дата обращения: 16.09.2022). – Заголовок с экрана.

71. Прохорченко А. В. Вага чи маса поїзда – питання до Ньютона?! [Електрон. ресурс] / А. В. Прохорченко // Вісник УДУЗТ. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу <https://pr0hogiy.livejournal.com/2446.html>, вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрана.

72. Камке Д. Физические основы единиц измерения : пер. с нем. Д. Камке, К. Кремер. – Москва : Мир, 1980. – 208 с.

73. Ключев В. И. Теория электропривода : учебник для вузов. В. И. Ключев. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.

74. Перевезенцев Е. А. Составы ведут «Автомашинисты» Е. А. Перевезенцев, А. И. Шемановский. – М. : Локомотив. – № 6, 2005. – С. 15–17.

75. Пястик М. Системы автоматического ведения поезда / М. Пястик, Е. Толстов, И. Случак // Железнодорожный транспорт. №4, 2000. – С. 60–69.

76. Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте : учебник для вузов ж.-д. трансп. / А. А. Устинский, Б. М. Степенский, Н. А. Цыбуля и др. – М.: Транспорт, 1985. – 439 с.

77. Пат. 110877 Україна, МПК В 60 W 50/00; В 60 W 50/0825. Система автоматизованого вибору швидкісного режиму руху наземного електричного транспортного засобу / К. О. Сорока, Д. О. Личов ; Харків. нац. ун-т міськ.

госп-ва ім. О. М. Бекетова. – № u201603772 ; заявл. 08.04.16 ; опубл. 25.10.16, Бюл. № 20.

78. Сорока К. О. Змістовна модель та рівняння руху електричного транспорту [Електрон. ресурс] / К. О. Сорока, Д. О. Личов // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – № 3. – С. 97–106. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2015_3_10, вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрана.

79. Вишняк Г. В. Троллейбус пассажирский ЗиУ-682Б / Г. В. Вишняк. – М. : Транспорт, 1977. – 208 с.

80. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ будівництво [Електрон. ресурс]. – Чинний від 21.09.2015. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=62131, вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрану.

81. ДБН В.2.3–19:2018. Споруди транспорту. Залізничні колії 1520 мм. Норми проектування [Електрон. ресурс]. – Чинний від 29.03.2019. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-126>, вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрана.

82. ДБН В.2.3–18:2007. Державні будівельні норми. Споруди транспорту. Трамвайні та тролейбусні лінії. Загальні вимоги до проектування. – Чинний: наказ № 401 від 28 грудня 2007 р. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2008. – 58 с.

83. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України (ЦП-0269) / Е. І. Даниленко, А. М. Орловський, М. Б. Курган та ін. – Київ : ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2012. – 456 с.

84. НПАОП 0.00-1.02-08. Правила будови і безпечної експлуатації ліфтів (3211) [Електронний ресурс] – Чинний від 1 вересня 2008 року. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: https://dnaop.com/html/3211/doc-НПАОП_0.00-1.02-0, вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрана.

85. Конспект лекцій з дисципліни «Теоретична механіка. Динаміка» (для студентів 1 і 2 курсів денної і заочної форм навчання освітнього рівня «бакалавр» спеціальностей 192 – Будівництво та цивільна інженерія, 141 – Електроенергетика, електротехніка та електротехнології, 263 – Цивільна безпека, 185 – Нафтогазова інженерія та технології та слухачів другої вищої освіти) / В. П. Шпачук, В. О. Пушня, О. І. Рубаненко, А. О. Гарбуз ; Харків. нац. ун-т міськ. гос-ва ім. О. М. Бекетова ; за заг. ред. В. П. Шпачука. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. – 222 с.

86. Мокін О. Б. Моделювання та оптимізація руху багатомасових електричних транспортних засобів поверхнями зі складним рельєфом : монографія / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін. – Вінниця : ВНЕУ, 2013. – 192 с.

87. Мокін Б. І. Ідентифікація параметрів моделей та оптимізація режимів системи електропривода трамвая з тяговими двигунами постійного струму : монографія / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця : ВНЕУ, 2008. – 92 с.

88. Теоретична механіка : підручник для студ. вищих навч. техн. закл. III–IV рівня / І. В. Кузьо, Я. А. Зінко, Т. М. Ванькович та ін. ; за заг. ред. І. В. Кузьо. – Харків : Фоліо, 2017. – 780 с.

89. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики [Электрон. ресурс] : учеб. для вузов. – 10-е изд., перераб. и доп. / С. М. Тарг. – Электрон. текст. данные. – М.: Высш. шк., 1986. – 416 с. – Режим доступа: <https://isopromat.ru/teormeh/literatura/targ-s-m-kratkij-kurs-teoreticeskoj-mehaniki>, свободный (дата обращения: 16.09.2022). – Заголовок с экрана.

90. Кацман М. Д. Методологічні засади організації управління екологічною безпекою під час ліквідування наслідків аварійних ситуацій на залізничному транспорті [Електрон. ресурс] : дис. д-ра техн. наук : 21.06.01 – екологічна безпека / М. Д. Кацман. – Київ : НАУ, 2018 – 420 с. – Режим доступу: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/36806>, вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрана.

91. Федорченко А. М. Теоретична механіка / А. М. Федорченко. – Київ : Вища школа, 1975. – 516 с.

92. Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії. ЦП/0236 / М. Б. Курган, А. М. Орловський, О. М. Патласов и др. – Чинний від 14.12.2010. №778-Ц – Київ : Укрзалізниця, 2010. – 52 с.

93. Дослідження параметрів залізничної колії у плані за різними методами зйомки [Електрон. ресурс] / М. Б. Курган, Д. М. Курган, С. Ю. Байдак, Н. П. Хмелевська // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2018. – № 2. – С. 77–86. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2018_2_9, вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрана.

94. Бабенко А. І. Встановленні допустимої швидкості на складних ділянках плану залізниці з урахуванням комфортабельності їзди [Електрон. ресурс] / А. І. Бабенко, М. Б., Курган, М. М. Черняков. – Укрзалізниця, ДНУЗТ, 2013. – 7 с. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: <http://facta.junis.ni.ac.rs/>

[macar/macar2000/macar2000-02.pdf](#), вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрана.

95. Основи трибології : підручник / А. М. Антипенко, О. М. Белас, В. А. Войтов та ін. ; за ред. В. А. Войтова. – Харків : ХНТУСГ, 2008. – 342 с.

96. Rumyantsev V. V. Forms of hamilton's principle for nonholonomic systems [Electronic resource] / V. V. Rumyantsev. – Moscow: Academician, Computing Center of RAS, 2000. – P. 1035–1048. – Regime of access: <http://facta.junis.ni.ac.rs/macar/macar2000/macar2000-02.pdf>, free (application date: 16.09.2022). – Title from the screen.

97. Ландау Л. Д. Теоретическая физика : в 10 т. : 4-е изд., испр. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Москва : Наука, 1988. – Т. 1: Механика. – 216 с.

98. Куницький О. Чи зможуть потяги в Україні розганятись до 350 км на годину [Електрон. ресурс]. / О. Куницький. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: <https://www.dw.com/uk/chy-zmozhut-potiah-y-v-ukraini-rozghaniatys-do-350-km-na-hodynu/a-56373921>, вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрана.

99. Дослідження впливу параметрів улаштування колії на інтенсивність бічного зношення головки рейки в кривих ділянках [Електрон. ресурс] / В. В. Рибкін, М. П. Настечик, М. А. Арбузов [та ін.] // Зб. наук. пр. Донецьк. ін-ту залізн. трансп. – Електрон. текст. дані. – Донецьк, 2013. – Вип. 34. – С. 155–162. – Режим доступу: <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2706/1/Rybkin4.pdf>, вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрану.

100. Швець А. О. Визначення стійкості вантажних вагонів з урахуванням параметрів залізничної колії. / А. О. Швець // Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ, 2020, № 2 (86) – С. 103–118.

101. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних) [Електрон. ресурс] / Держ. Укр. наук.-дослід. ін-т вагонобудування (УкрНДІВ). – Електрон. текст. дані. – Чинний від 01.07.2015. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=73763, вільний (дата звернення: 16.09.2022). – Назва з екрана.

102. Ершков О. П. Сопряжения кривых и особенности движения подвижного состава по ним / под ред. О. П. Ершкова. – М. : Транспорт, 1973. – 96 с.

103. Курган М. Б. Методика визначення допустимих швидкостей руху поїздів на складних ділянках плану залізниці / М. Б. Курган // Дніпро : Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ, 2014. – № 2 (50) – С. 83–94.

104. ДБН В.2.3-7:2010. Споруди транспорту метрополітени. – Чинні від 2011-10-01 / Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 192 с.
105. Сплайн-функції та їх застосування / Б. П. Довгий, А. В. Ловейкін, Є. С. Вакал та ін. – Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2016. – 117 с.
106. Богач І. В. Чисельні методи розв'язання диференціальних рівнянь засобами MathCAD : навч. посіб. / І. В. Богач, О. Ю. Краковецький, Л. В. Крилик. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 106 с.
107. Розробка моделей електродвигунів тягового електроприводу транспортних засобів з урахуванням вихрових струмів / М. В. Хворост, К. О. Сорока., М. І. Шпіка та ін. // Електрифікація транспорту. – Дніпропетровськ, 2014. – №8. – С. 99–104.
108. Сорока К. О. Розрахунок кривих руху та економія електроенергії на електротранспорті / К. О. Сорока, В. К. Нем ; Харків. нац. акад. міськ. госп-ва // Світлотехніка та електроенергетика. – 2005. – № 5. – С. 112–124.
109. Электротехнический справочник : в 4 т. : Т. 4. Использование электрической энергии / Под общ. ред. В. Г. Герасимова – Москва : Издательский дом МЭИ, 2004. – 696 с.
110. Личов Д. О. Система автоматизованого керування режимами руху транспортних засобів міського електротранспорту : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.09 – електротранспорт / Личов Дмитро Олександрович ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків, 2021. – 22 с.

Наукове видання

СОРОКА Костянтин Олексійович

**ТЯГОВІ РОЗРАХУНКИ НА ОСНОВІ ПРОЦЕСІВ
ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ**

МОНОГРАФІЯ

Відповідальний за випуск *І. В. Білецький*

Редактор *О. В. Михаленко*

Комп'ютерне верстання *К. О. Сорока*

Підп. до друку 31.08.2021. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 14,4.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: office@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017