

**КОНСТРУКЦІЯ ТА ДИНАМІКА
ЕЛЕКТРИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ**

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**КОНСТРУКЦІЯ ТА
ДИНАМІКА ЕЛЕКТРИЧНОГО
РУХОМОГО СКЛАДУ**

Підручник

Частина 2



ХАРКІВ – 2018

**КОНСТРУКЦІЯ ТА ДИНАМІКА
ЕЛЕКТРИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ**

Підручник

Частина 2

Харків – 2018



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ

**КОНСТРУКЦІЯ ТА ДИНАМІКА
ЕЛЕКТРИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ**

Підручник

Частина 2

Харків – 2018

УДК 629.4.015(075)
К 65

*Рекомендовано вченою радою Українського державного
університету залізничного транспорту як підручник
(витяг з протоколу № 8 від 21 грудня 2017 р.)*

Рецензенти:

професори В. І. Носков (НТУ «ХП»),
М. В. Хворост (ХНУМГ ім. О. М. Бекетова),

Авторський колектив:

Панченко С. В., Бабаєв М. М., Блиндюк В. С., Нерубацький В. П.

К65 Конструкція та динаміка електричного рухомого складу:
підручник / С. В. Панченко, М. М. Бабаєв, В. С. Блиндюк та
ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2018. – Ч. 2. – 204 с., рис. 60,
табл. 3.

ISBN 978-617-654-092-2

У підручнику розглянуто основні відомості стосовно конструкції та динаміки електричного рухомого складу, що експлуатується на залізницях України і низки інших країн. Подано загальний опис конструкції електровозів і моторвагонного рухомого складу. Наведено порівняльний аналіз матеріалів, що використовуються для виготовлення вузлів і деталей електрорухомого складу. Ряд підрозділів, крім опису конструктивних особливостей тих або інших вузлів, супроводжується основними принципами розрахунку їх розмірів і параметрів. Наведено основні відомості про види коливань і збурення, що викликають коливання рухомого складу. Подано показники динамічних якостей механічної частини.

Підручник розрахований на широке коло користувачів: студентів, аспірантів, інженерно-технічних працівників, викладачів, наукових працівників, що спеціалізуються в галузі експлуатації та ремонту електричного рухомого складу.

УДК 629.4.015(075)

ISBN 978-617-654-092-2

© Український державний університет
залізничного транспорту, 2018.

Підручник

Панченко Сергій Володимирович,
Бабаєв Михайло Михайлович,
Блиндюк Василь Степанович
та ін.

КОНСТРУКЦІЯ ТА ДИНАМІКА
ЕЛЕКТРИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

Частина 2

Відповідальний за випуск Нерубацький В. П.

Редактор Решетилова В. В.

Підписано до друку 06.09.17 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк. арк. 10,75. Тираж 35. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Український державний університет
залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	7
РОЗДІЛ 1. РОЗТАШУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ.....	9
1.1. Розташування обладнання на електровозах.....	9
1.1.1. Загальні положення.....	9
1.1.2. Електровози ВЛ10, ВЛ10 ^У і ВЛ11 ^М	13
1.1.3. Електровози ВЛ60, ВЛ60 ^К	18
1.1.4. Електровози ВЛ80 ^К і ВЛ80 ^Т	22
1.1.5. Електровози ВЛ82.....	26
1.1.6. Електровози ВЛ85.....	28
1.1.7. Електровози ЧС4 і ЧС4 ^Т	31
1.1.8. Електровози ЧС7.....	36
1.1.9. Електровози ЧС8.....	39
1.1.10. Електровози ЕП1.....	42
1.1.11. Електровози 2ЕС5К.....	45
1.1.12. Електровози 2ЕС10.....	50
1.1.13. Електровози ДЕ1.....	53
Питання для самоконтролю.....	57
1.2. Розташування обладнання на електропоїздах.....	59
1.2.1. Загальні положення.....	59
1.2.2. Вагони електропоїздів ЕР2 ^Р і ЕР2 ^Т	59
1.2.3. Вагони електропоїздів ЕР9 ^Е	62
1.2.4. Вагони електропоїздів ЕР200.....	65
1.2.5. Вагони електропоїздів ЕПЛ2Т.....	68
1.2.6. Вагони електропоїздів ЕПЛ9Т.....	71
1.2.7. Вагони електропоїздів ТGV.....	74
Питання для самоконтролю.....	76
1.3. Системи вентиляції та опалення електричного рухомого складу.....	77
1.3.1. Системи вентиляції на електровозах.....	77
1.3.2. Системи вентиляції та опалення на електропоїздах.....	80
Питання для самоконтролю.....	88

РОЗДІЛ 2. ДИНАМІКА ЕЛЕКТРИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ.....	89
2.1. Загальні поняття про коливання локомотивів і збурення, які викликають коливання.....	89
2.1.1. Основні завдання динаміки локомотивів.....	89
2.1.2. Види коливань локомотивів.....	90
2.1.3. Збурення, що викликають коливання.....	91
2.1.4. Характеристики елементів з'єднань.....	94
Питання для самоконтролю.....	95
2.2. Методика складання рівнянь коливань динамічної моделі екіпажа.....	96
2.2.1. Принцип Даламбера.....	96
2.2.2. Динамічна модель екіпажа.....	100
2.2.3. Складання рівнянь вертикальних коливань моделі з одним ступенем свободи при кінематичному збуренні...	101
2.2.4. Рівняння коливань моделі з одним ступенем свободи при силовому збуренні.....	103
2.2.5. Рівняння коливань моделі плоского двовісного екіпажа.....	104
Питання для самоконтролю.....	108
2.3. Вільні коливання динамічних систем.....	109
2.3.1. Загальні положення.....	109
2.3.2. Вільні коливання в недемпфорованій системі.....	109
2.3.3. Вільні коливання в системі з гідравлічним гасителем.....	111
2.3.4. Матрична форма запису рівнянь коливань в загальному вигляді.....	114
2.3.5. Принцип складання рівнянь коливань в матричній формі на прикладі одновісної моделі з двома ступенями свободи.....	116
Питання для самоконтролю.....	119
2.4. Змушені коливання динамічних систем.....	121
2.4.1. Поняття про збурений рух і методи дослідження змушених коливань.....	121
2.4.2. Частотний метод дослідження змушених коливань.....	122
2.4.3. Частотні характеристики моделі з одним ступенем свободи при кінематичному збуренні.....	124

2.4.4. Частотні характеристики динамічної системи при силовому збуренні.....	127
2.4.5. Перетворення частотних характеристик системи з одним ступенем свободи при кінематичному збуренні....	128
2.4.6. Амплітудні частотні і фазові частотні характеристики системи з одним ступенем свободи.....	130
2.4.7. Модель з одним ступенем свободи.....	133
2.4.8. Одновісна модель з двома ступенями свободи.....	134
Питання для самоконтролю.....	138
2.5. Коливання при випадкових збуреннях.....	140
2.5.1. Характеристики стаціонарних випадкових процесів.....	140
2.5.2. Статистичні характеристики випадкового збурення.....	143
2.5.3. Розрахунок показників динамічних якостей екіпажної частини.....	149
Питання для самоконтролю.....	152
2.6. Бічні коливання локомотивів.....	153
2.6.1. Загальні положення.....	153
2.6.2. Кочення колісної пари без ковзання.....	154
2.6.3. Кочення колісної пари з ковзанням.....	158
2.6.4. Диференціальні рівняння руху колісної пари, пов'язаної пружно з візком.....	159
2.6.5. Визначення критичної швидкості за стійкістю.....	162
Питання для самоконтролю.....	164
2.7. Рух колісної пари з урахуванням деформації бандажа і рейки. Сили крипу.....	166
2.7.1. Пружне проковзування.....	166
2.7.2. Сили крипу.....	168
2.7.3. Диференціальні рівняння руху колісної пари без контакту гребеня з рейкою.....	174
Питання для самоконтролю.....	177
2.8. Показники динамічних якостей механічної частини локомотивів.....	178
2.8.1. Поняття про якість механічної частини локомотивів.....	178
2.8.2. Показники, що оцінюють віброзахисні властивості механічної частини.....	181

2.8.3. Показники безпеки руху.....	184
2.8.4. Показники плавності ходу.....	192
Питання для самоконтролю.....	197
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	198

ПЕРЕДМОВА

На залізницях більшості країн світу для вантажних і пасажирських перевезень на основних і найбільш завантажених напрямках застосовується електричний рухомий склад. В країнах Європи розвинений високошвидкісний пасажирський рух, який успішно конкурує з авіатранспортом. Розробниками електрорухомого складу постійно ведуться роботи, спрямовані на його вдосконалення, підвищення динамічних якостей, надійності і довговічності. В Україні основні залізничні напрями і практично всі великі приміські вузли електрифіковані.

У даному підручнику розглядається конструкція основних частин і вузлів електровозів і моторвагонного рухомого складу постійного і змінного струму, що експлуатується на залізницях України, а також деяких серій вагонів метрополітенів. Крім того, наводяться матеріали про новий перспективний рухомий склад. Для більш поглибленого вивчення матеріалу у деяких підрозділах, крім опису конструктивних особливостей тих чи інших вузлів, наведено приклади розрахунків за вибором їх основних розмірів і параметрів.

При вивченні дисципліни «Конструкція та динаміка ЕРС» студентами, що отримують перший (бакалаврський) рівень вищої освіти, крім конструкції електричного рухомого складу (ЕРС) вивчаються також ритмічні явища, що виникають в електрорухомому складі та рейковій колії під час руху рухомого складу, а також при взаємодії ЕРС з навколишнім середовищем. Вивчення цих явищ необхідно для правильного вибору схеми і параметрів обладнання ЕРС, зокрема віброзахисних пристроїв (ресорне підвішування, горизонтальні, поздовжні і поперечні зв'язки колісних пар з рамою візка та візка з кузовом, підвішування тягового двигуна, тягового редуктора і т. д.), а також для зниження динамічних сил, що діють на несучі елементи механічної частини і залізничну колію, на обладнання ЕРС і людей, які в ньому перебувають. У зв'язку зі зміною в експлуатації параметрів певних елементів механічної частини ЕРС через старіння і знос важливе значення має забезпечення необхідного рівня віброзахисту ЕРС. Це необхідно для зменшення обсягів ремонту ЕРС і гарантування безпеки його

руху. Вивчивши дисципліну «Конструкція та динаміка ЕРС», студенти повинні **знати**:

- призначення, будову та принципи роботи окремих вузлів та механічної частини електрорухомого складу в цілому;

- причини виникнення динамічних явищ в механічній частині ЕРС, способи їх опису;

- способи опису динамічних явищ і методи складання диференціальних рівнянь коливань, принципи побудови динамічних моделей;

- методи вибору схем і параметрів механічної частини на основі оцінки її показників динамічних якостей;

вміти:

- добре володіти методами опису статичної і динамічної механічних систем, а також способами розв'язання диференціальних рівнянь, діями над матрицями, використовувати відомості про конструкції механічної частини ЕРС;

- визначати показники динамічних якостей механічної частини ЕРС;

- проводити аналіз частотних і динамічних властивостей, оцінку стійкості руху;

- виконувати, в тому числі із застосуванням ПК, розрахунки з динаміки та міцності механічної частини;

- оптимізувати конструкції екіпажної частини за динамічними критеріями;

- розробляти проекти модернізації окремих вузлів згідно з чинними вимогами і заходи для забезпечення їх працездатності.

Даний підручник служить цим цілям і доповнює наявну технічну літературу з деяких питань взаємодії електричного рухомого складу і верхньої будови колії. Підручник призначено в першу чергу для студентів технічних вузів, які навчаються за спеціальностями 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма «Електричний транспорт») і 273 «Залізничний транспорт» (освітня програма «Електровози та електропоїзди»), що вивчають дисципліну «Конструкція та динаміка ЕРС», може використовуватися при виконанні курсових проектів і кваліфікаційних робіт, а також для підвищення кваліфікації слухачів ФПК, ІППК та інженерно-технічних працівників залізничного транспорту і промисловості.

РОЗДІЛ 1

РОЗТАШУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

1.1. РОЗТАШУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ НА ЕЛЕКТРОВОЗАХ

1.1.1. Загальні положення

Розташування електричного обладнання на електровозах повинне забезпечувати виконання таких умов:

- безпека і зручність обслуговування;
- відповідність навантаження на осі і колеса прийнятим в розрахунку значенням (сума моментів щодо подовжньої і поперечної осей кузова повинна бути рівна нулю);
- захист апаратури від попадання вологи, сніги і пилу та можливість її підігріву (у разі потреби) і охолодження;
- зручність монтажу і демонтажу устаткування;
- мінімальна витрата проводів, кабелів, повітроводів, трубопроводів і опорних конструкцій для установаження обладнання;
- найбільш повне і раціональне використання площі і об'єму кузова електровоза для установаження обладнання;
- компоновання по можливості максимальної кількості обладнання в блоки (агрегати, панелі) із закінченим технологічним циклом для скорочення складальних робіт і полегшення демонтажу обладнання;
- необхідні ізоляційні відстані (повітряні проміжки від струмоведучих частин обладнання і дугогасильних камер апаратів до заземлених предметів, а також відстані між дугогасильними камерами окремих апаратів).

Ці відстані по повітрю при нормальній вологості і відсутності іонізації для напруги 110, 500, 1500, 3000 і 4000 В повинні бути не менш відповідно 10, 15, 20, 30 і 40 мм. При розрахунковій напрузі 25000 В для обладнання, що знаходиться в кузові, приймають відстань по повітрю між струмоведучими частинами різної полярності або між струмоведучими частинами і корпусом

електровоза або вагона не менше 210 мм, а для обладнання, встановленого на даху, – не менше 270 мм.

Крім того, виконуючи ці вимоги, прагнуть до найменшої вартості монтажних робіт і експлуатації. Перевіряють виконання перерахованих вимог на дослідному зразку локомотива.

Розташування апаратури і обладнання багато в чому залежить від розміщення кабін машиніста. На магістральних електровозах кабін машиніста (пости керування) знаходяться по кінцях локомотива. В середині локомотива кабін машиніста розташовують порівняно рідко, в основному на маневрових і промислових електровозах, електровозах деяких зарубіжних залізниць. В цьому випадку ускладнене обслуговування допоміжних машин і апаратів; крім того, при швидкостях вище 120 км/год збільшується опір руху.

Якщо кабін машиніста розміщені по кінцях локомотива, обладнання і апаратуру розміщують в кузові між ними, на даху і під кузовом, а якщо в середині, – то по кінцях в так званих капотах, на посту керування, на даху і під кузовом.

Планування кузова електровоза з кабінами машиніста, розміщеними по кінцях, визначається не тільки вказаними умовами, але розташуванням і числом входних дверей, а також розташуванням проходів, по яких переходять з одного поста в інший (рис. 1.1).

У кузові все основне обладнання встановлюють або симетрично щодо поперечної осі електровоза, або несиметрично. При цьому виділяють високовольтну камеру і машинні приміщення, а на електровозі змінного струму ще і трансформаторне приміщення.

Розташування обладнання у високовольтній камері при збереженні загального компоновання основних блоків багато в чому залежить від схеми силових кіл електровоза. У камері розташована вся високовольтна комутаційна і захисна апаратура, відкриті струмоведучі частини. Іноді таку апаратуру частково розміщують ще в окремих шафах, оснащених блокуваннями безпеки (на електровозах ЧС4 та ін.).

Високовольтну камеру монтують поза електровозом, а потім встановлюють в кузов краном. В цьому випадку все обладнання і апарати, безпосередньо сполучені між собою, в цеху компонують

в окремі блоки і встановлюють на каркасі високовольтної камери. При такому агрегатному способі вартість монтажу камери в $2\div 2,5$ рази менше, ніж виконання відповідних робіт в кузові при установленні апаратури в незнімну високовольтну камеру.

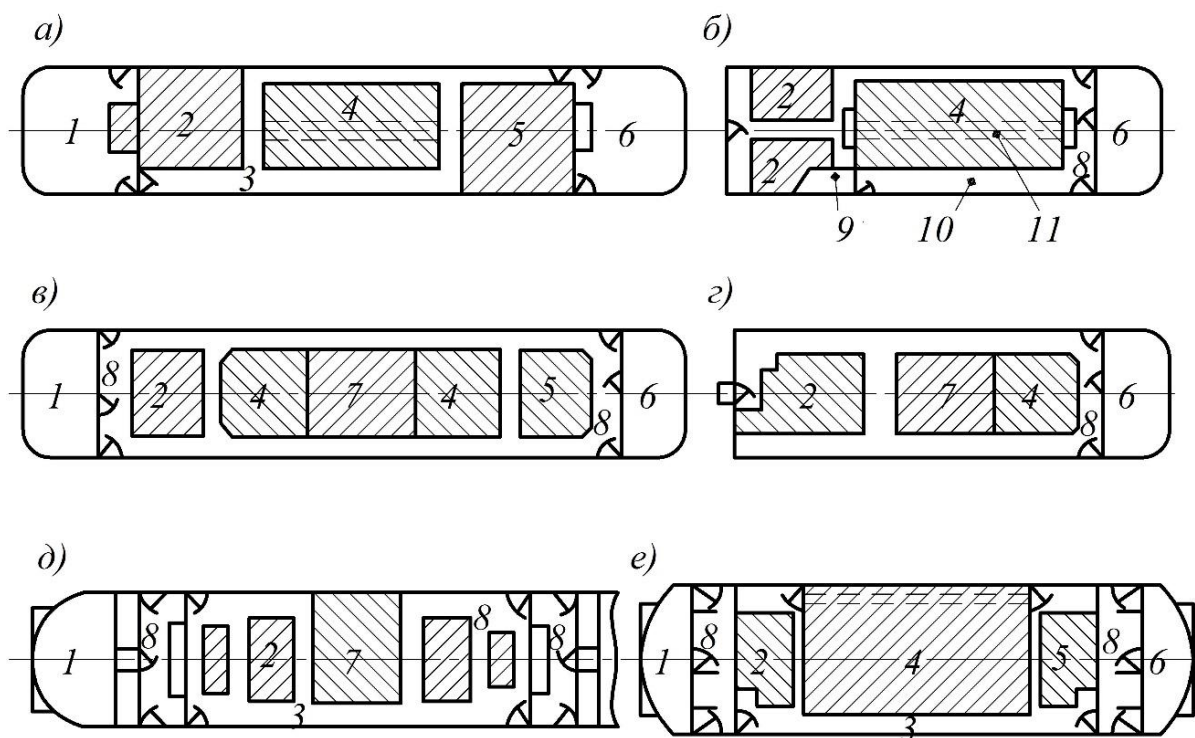


Рис. 1.1. Схеми розташування обладнання в кузовах електровозів ВЛ23 з двостороннім проходом (а), в секціях ВЛ10 і ВЛ10^у (б), на електровозі ВЛ60^к з симетричним проходом щодо поперечної осі (в), ВЛ80^с (з), ЧС4 і ЧС4^г (д) і ЧС2^г (е):
 1 і 6 – кабіни машиніста (пости керування); 2 і 5 – машинні приміщення; 3 – проходи, 4 – високовольтна камера;
 7 – трансформаторне приміщення; 8 – поперечний прохід;
 9 – форкамера; 10 – тупиковий прохід;
 11 – глухий прохід у високовольтній камері

На електровозах змінного струму між машинними приміщеннями і високовольтними камерами (зазвичай в середній частині кузова) розташовано трансформаторне приміщення, підлога якого знаходиться нижче за підлогу кузова. У машинних приміщеннях електровоза обладнання розташовують найчастіше за блоковим принципом. У них встановлюють допоміжні машини, обладнання радіостанції, локомотивної сигналізації,

основне пневматичне обладнання. Допоміжні машини розміщують так, щоб можна було перевірити стан колекторів і щіток як при пуску, так і під час роботи, перевірити роботу компресорів, вентиляторів і їх підшипників. Іноді на електровозах змінного струму (ЧС4 та ін.) в машинних приміщеннях розміщують випрямні установки з апаратурою захисту, згладжувальні реактори, шафи з реверсорами, вимикачами тягових двигунів, контакторами ослаблення збудження, реле перевантаження і іншою високовольтною апаратурою.

Освітлення приміщень і високовольтних камер електровозів природне (через вікна в бічних стінках кузова) і штучне (плафони і лампочки).

На дахах електровозів монтують струмоприймачі, дахові роз'єднувачі, реактори для заглушення перешкод радіоприйому, розрядники, тифони, свистки, шини, що сполучають обладнання, розміщене на даху, головні резервуари, антени радіостанції, а на електровозах змінного струму – ще і головні вимикачі з роз'єднувачами, прохідні ізолятори. На дахах моторних вагонів електропоїздів встановлюють струмоприймачі, дроселі і конденсатори захисту від радіоперешкод, розрядники, головні запобіжники, опорні ізолятори з кабелями, необхідними для паралельного з'єднання струмоприймачів.

У кабінах машиніста зосереджені всі органи керування, встановлені контрольно-вимірювальні прилади. Для зручності виконання складальних і електромонтажних робіт частина їх скомпонована на загальному каркасі в єдиний блок – пульт машиніста.

При розташуванні апаратури в кабінах машиніста основну увагу приділяють забезпеченню для локомотивної бригади зручності користування апаратами керування і спостереження за вимірювальними приладами, сигналізацією, контактною мережею, залізничним полотном. Крім того, прагнуть забезпечити вільне пересування машиніста і його помічника по кабіні. Велика увага приділяється інтер'єру кабіни. Для швидкісних електровозів важливе значення має герметизація кабіни.

Крісло машиніста виконують регульованим за висотою і в горизонтальній площині, що дозволяє машиністові управляти поїздом як сидячи, так і стоячи. Кут огляду по вертикалі, визначуваний положенням крісла машиніста і висотою нижнього обріза вікна, повинен бути таким, щоб спостереження за залізничним полотном при високих швидкостях руху не стомлювало локомотивну бригаду. Бічні вікна виконують такими, що відкриваються, що дає можливість локомотивній бригаді стежити за складом під час руху і маневрів. Для обігріву кабіни машиніста використовуються електричні печі, калорифери (на електровозах ЧС4 та ін.) або спеціальна система для кондиціонування повітря (на електровозах ЧС4^Т та ін.).

Розглянемо розташування обладнання на деяких серійних електровозах.

1.1.2. Електровози ВЛ10, ВЛ10^У і ВЛ11^М

Обладнання на електровозах ВЛ10 (останніх випусків) і ВЛ10^У розташоване майже однаково. Проте розташування його в секціях розрізняється. Першою секцією прийнято вважати ту, в якій встановлений швидкодіючий вимикач.

На електровозах ВЛ10, ВЛ10^У і ВЛ11^М, щоб знизити рівні шуму і вібрацій в кабіні, допоміжні машини віднесені в протилежний від неї кінець секції і встановлені в машинному приміщенні. Між ним і кабіною машиніста розташована високовольтна камера. Кабіна і камера розділені поперечним проходом, як і на електровозах ВЛ80^Т і ВЛ80^С; передбачені вхідні двері на електровоз, двері в кабіну і двоє дверей в камеру.

У високовольтній камері розміщена вся апаратура силових кіл і кіл керування. Від крізного робочого проходу ця апаратура захищається розсувною сітчастою огорожею, від машинного приміщення – глухою стінкою, від поперечного проходу – стінкою з двома дверима в тупиковий і глухий проходи камери. Двері і розсувна сітчаста огорожа мають механічні і пневматичні блокування, розташовані на стінці з боку поперечного проходу над вхідними дверима в глухий прохід.

Обладнання, необхідне для роботи електровоза, розташоване в кабінах, високовольтних камерах, машинних приміщеннях, на даху, торцевих стінках і під кузовом електровоза (рис. 1.2).

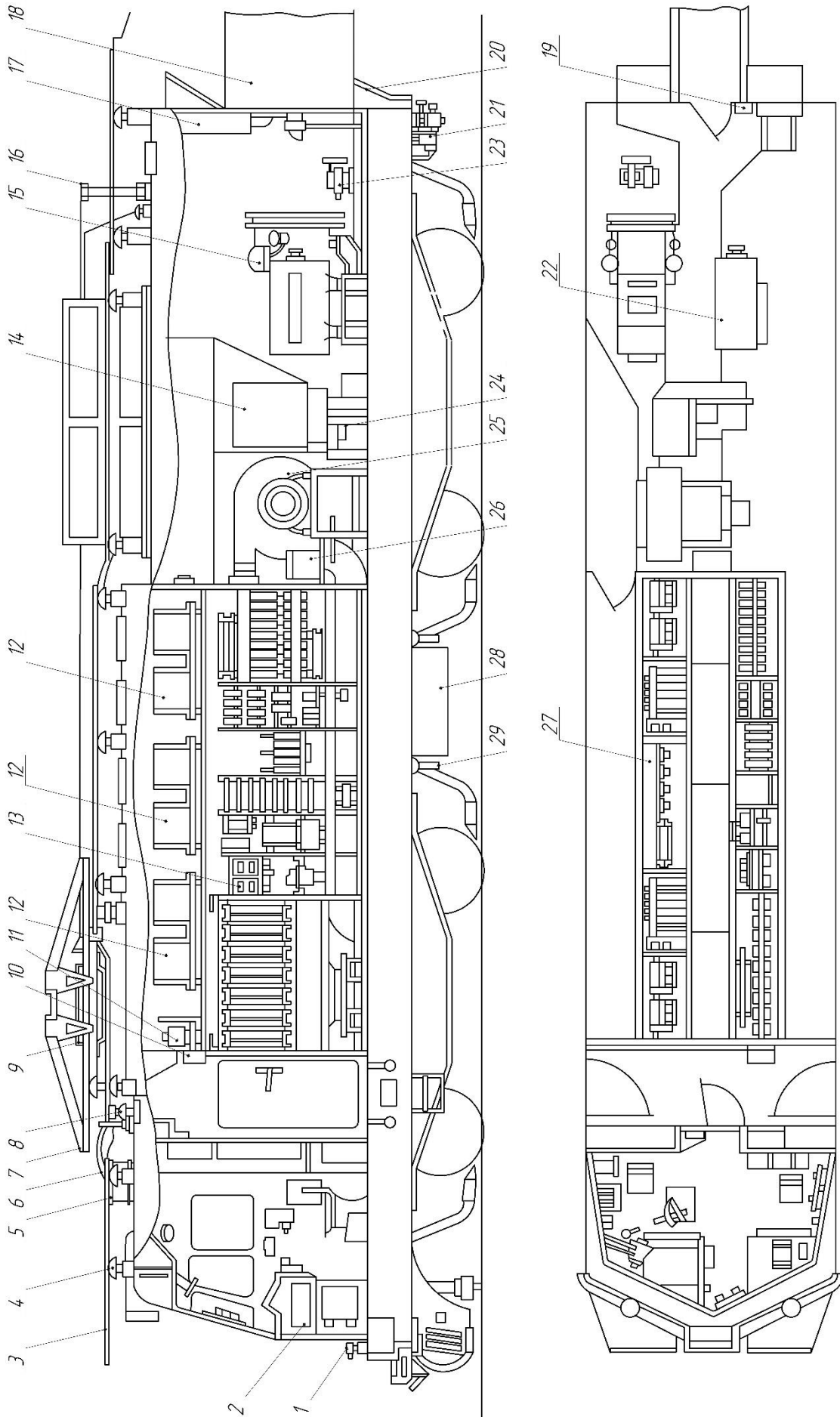


Рис. 1.2. Розташування обладнання на електровозі ВЛ11М

Планування кузова і розміщення обладнання в ньому визначені умовами забезпечення вільного доступу для огляду, ремонту, монтажу та демонтажу, забезпечення заходів безпеки і виробничої санітарії обслуговуючого персоналу, а також правильного розважування електровоза з рівномірним розподілом його маси як по сторонах, так і по осях. Все високовольтне обладнання та частина апаратури кіл управління встановлені в повністю огорожених високовольтних камерах (ВВК), розташованих в середній частині кожного з кузовів, а допоміжні машини та інше обладнання – в машинних відділеннях (у боці, протилежному кабіні). Таке планування сприяє зниженню рівня шуму і вібрації в кабіні машиніста від допоміжних машин.

У кабінах обох кузовів обладнання розташоване однаково. З боку машиніста в кабіні електровоза розташований пульт управління, в який вмонтовані: кнопковий вимикач, резистор для електричних ламп, пульти управління і тумблери ввімкнення поїзного диспетчерського радіозв'язку, регулятор тиску АК-11Б живильної магістралі, кнопковий пост увімкнення і перевірки електричних кіл локомотивної сигналізації, блок перемикачів і кінцевий вимикач для відпуску гальм локомотива.

У верхній частині пульта на панелі вимірювальних приладів встановлені сигнальні лампи підсвічування приладів у нічний час, прилади контролю напруги в контактному проводі, струму якоря і збудження тягових електродвигунів, манометри контролю тиску в головних і зрівняльних резервуарах, в гальмівній магістралі і гальмівних циліндрах.

З боку помічника машиніста в кабіні є: манометр контролю тиску повітря в колі управління, вольтметр контролю напруги в колі акумуляторної батареї, лічильник імпульсів, сигнальна лампа, кнопковий пост подачі піску, свисток, тумблери ввімкнення червоного і білого світла буферних ліхтарів, обігріву вікон і освітлення ходових частин, кнопковий вимикач, а також розетка РЗ-8Б (50 В) постійного струму.

На лобовій стінці кабіни розташовані протисонячні щитки, вентилятори обдування лобового вікна і кабіни, склоочисники; на стояку між лобовими вікнами – п'ятизначний світлофор локомотивної сигналізації. З боку машиніста на стояках між лобовими і бічними вікнами знаходиться швидкостемір. На

каркасі швидкостеміра закріплена коробка, на якій розміщена сигнальна лампа. Над лобовими вікнами в середній частині передньої стінки для огороження лобового прожектора передбачена спеціальна коробка, на кришці якої є таблички з позначенням секції. На коробці також знизу встановлено пристрій пильності машиніста. У стелю кабіни вмонтовані два плафони освітлення і два світильники з світлофільтрами зеленого кольору. На задній стінці кабіни встановлено: вимикач АК-63-111 для ввімкнення кола управління, гучномовці для радіостанцій, аптечка і рукоятка колонки ручного гальма, відкидне сидіння для третьої особи.

Вздовж бічної стінки кабіни з боку машиніста знаходяться: рукоятки пильності локомотивної сигналізації, електропневматичний клапан локомотивної сигналізації (ЕПК), пневматичний клапан пісочниці, педаль пневматичного клапана, кнопковий пост подачі свистка, сигналу і піску, кран машиніста і кран допоміжного гальма, пристрої імпульсної подачі піску, попільничка. Попільничка є також на бічній стінці з боку помічника машиніста.

Контролер розташований перед пультом машиніста і віддалений від бічної стінки кабіни на відстань, що дозволяє в цьому просторі перебувати машиністу електровоза.

Опалення кабіни електричне, для цього в кабіні передбачено вісім електропечей, які можна ввімкнути групами з чотирьох або восьми печей одночасно. Для обдування лобових вікон в зимових умовах на лобовій стінці кабіни під пультом розташовані мотор-вентилятори з електродвигуном.

У високовольтній камері (ВВК) розміщена вся апаратура силових кіл і частина апаратів-кіл управління.

Двері і розсувна огорожа зблоковані механічними і пневматичними блокуваннями, що виключають доступ у ВВК при піднятому струмоприймачі. Двері ВВК обладнані також короткозамикачами, що виключають можливість попадання під високу напругу при відмові механічного та пневматичного блокувань або мимовільному підйомі струмоприймача, або падінні (в разі обриву) дроту контактної мережі на струмопровідні частини і апарати, встановлені на даху електровоза.

У високовольтній камері апаратура розташована у два поверхи. На першому поверсі по обидва боки середнього проходу знаходяться блоки апаратів № 1 27. На другому по всій довжині і ширині ВВК розміщені блоки пускових резисторів 12, індуктивних шунтів 11 і резисторів ослаблення збудження.

У машинному приміщенні кузова розміщені мотор-вентилятор з генератором управління на валу, перетворювач 22, агрегат мотор-компресора 15, малогабаритний компресор для підйому струмоприймача 23, дешифратор 26 локомотивної сигналізації, вогнегасники ОУ-5, пневматичне обладнання.

На правій (по ходу електровоза) боковій стінці кузова над мотор-компресором розміщені клапан електроблокувальний, пневматичний вимикач управління ПВУ-2, агрегати клапанів навантажувальних циліндрів і зриву рекуперації, клапан електропневматичний. На лівій (по ходу електровоза) боковій стінці біля перетворювача встановлені: агрегат кола управління, клапан пісочниці; на торцевій стінці ВВК – пневматичні вимикачі управління ПВУ-7; на торцевій стінці над дверима – агрегат клапанів струмоприймача; в поперечному проході над дверима в кабінку машиніста – агрегат клапанів сигналів і навантажувального циліндра.

В кінці кузова поряд з дверима перехідного містка передбачений блокувальний люк для виходу на дах.

У машинному відділенні наскрізний, тупиковий і поперечний проходи в нічний час освітлюються плафонами, а ВВК – електричними лампами.

На даху електровоза кожної секції знаходиться струмоприймач 7. Безпосередньо в струмоприймач вмонтований дросель 9, який служить для заглушення перешкод радіоприйому, що виникають при порушеннях контакту між полозом струмоприймача і контактним проводом. Там же розташовані роз'єднувач високовольтний 10, конденсатори, головний ввід 8, влітовий розрядник 5, лобовий прожектор і антена радіостанції 16.

Монтаж кіл високовольтної апаратури здійснюється мідними шинами, гнучкими шунтами і встановленими на опорних ізоляторах сталевими шинами – косинцями. Під кузовом електровоза розташована акумуляторна батарея 28 у двох

ящиках, які можуть висуватися на роликах при відкритих до горизонтального положення кришках. Ящик зовні забезпечений трубками для відведення газів, що виділяються під час зарядження акумуляторів.

На лобовій і торцевій частинах кузова є коробки для розеток міжсекційних з'єднань 20. Під кузовом симетрично в центрі розташовані головні резервуари 29, в кінці кузова – розподільник повітря 21. Крім того, під кузовом встановлені плафони для освітлення ходової частини електровоза, розетки для подачі напруги на тягові електродвигуни електровоза від спеціальної мережі депо при пересуванні електровоза з низькою швидкістю, труби пневматичного монтажу та освітлення.

Також на рис. 1.2 зображені такі елементи: 1 – реву́н ТС-22; 2 – апарати в кабіні; 3 – струмоведучий косинець; 4 – опорний ізолятор; 6 – шина; 13 – блок апаратів № 2; 14 – панель управління; 17 – санвузол; 18 – перехідна площадка; 19 – ящик ЗП; 20 – коробка розеток міжсекційного з'єднання; 24 – панель заземлення; 25 – центробіжний вентилятор.

1.1.3. Електровози ВЛ60, ВЛ60^К

Все електричне та пневматичне обладнання розташоване в кузові електровоза, кабінах, на даху і під кузовом (рис. 1.3). У кабіні машиніста встановлений пульт управління електровозом 2, на якому змонтовані контролер, кнопкові вимикачі та рукоятка пильності локомотивної сигналізації.

На панелі пульта 1 встановлені електричні вимірювальні прилади: мережний вольтметр (зі шкалою 0÷30000 В) для контролю напруги в контактному проводі, вольтметр (0÷3000 В) для контролю напруги тягових двигунів і два амперметри (0÷750 А) для контролю струму тягових двигунів (першого і четвертого в кабіні № 1, третього і шостого в кабіні № 2). Нижче вимірювальних приладів закріплені на панелі манометри для контролю за тиском повітря в головних резервуарах, гальмовій магістралі, гальмових циліндрах і ЗР. У правому верхньому куті панелі встановлений показчик позицій ЕКГ, в лівій частині панелі – сигнальні лампи.

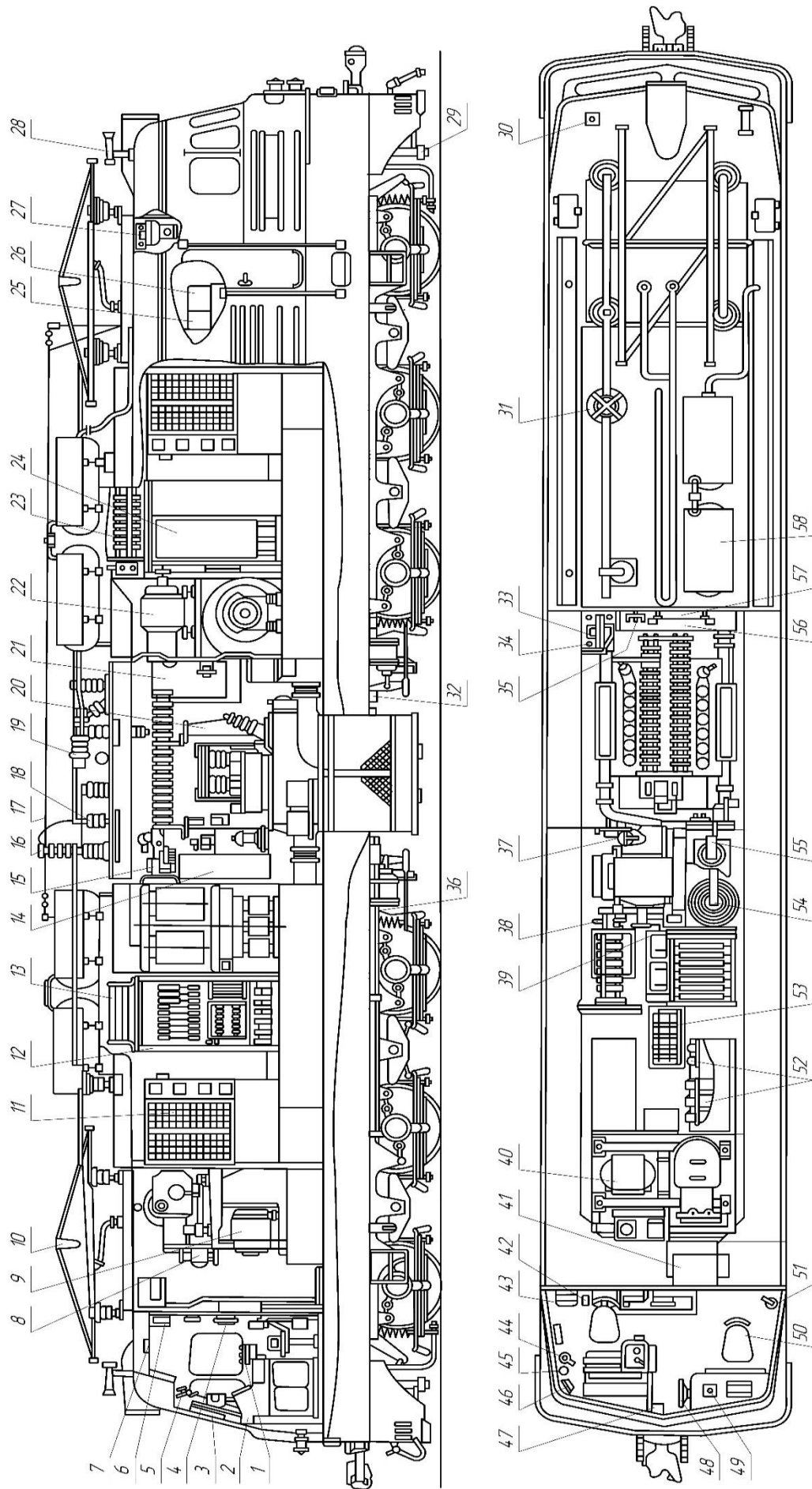


Рис. 1.3. Розташування обладнання на електровозі ВЛ60К

Усередині пульта розміщений баластовий резистор для регулювання яскравості горіння сигнальних ламп. На пульті помічника машиніста 49 знаходиться панель з вольтметром 0÷150 В, що контролює напругу акумуляторної батареї і генератора управління, і манометром, що показує тиск повітря в колі управління апаратами; нижче панелі на пульті кріпиться кнопковий вимикач.

Під пультом розташована колонка ручного гальма 48. Крім того, в кабіні встановлені: електропневматичний клапан локомотивної сигналізації 43, п'ятизначний світлофор 3, швидкостемір 46, крани управління пневматичними гальмами, апаратура радіостанції – гучномовець 6 і пульт управління 4.

У першій кабіні на боковій стінці пульта машиніста розміщений регулятор тиску повітря 47 в живильній магістралі. У другій кабіні електровоза встановлено дешифратор з перемикачем напрямку і фільтр локомотивної сигналізації.

Кабіна опалюється п'ятьма електropечами 42. Щоб уникнути замерзання лобових вікон у зимовий період, останні обдуваються двома вентиляторами 5, встановленими на коробці прожектора. Вище лобових вікон закріплені тіньові щитки. За кожною кабіною розташоване машинне приміщення, в якому знаходяться: мотор-компресор 8, два вентилятори 9, агрегат мотор-компресора для піднімання струмоприймача (тільки на першому кінці), радіостанція 26 і перетворювач до радіостанції (тільки на другому кінці). Пакетні вимикачі освітлення машинних приміщень і коридорів установлені в кабінах машиніста. Між вентиляторами закріплений кнопковий вимикач паралельної роботи.

Між машинним і трансформаторним приміщеннями 20 розміщені високовольтні камери. У них встановлена вся основна апаратура: випрямні установки 11, генераторний захист 52, панелі апаратів № 1 і 2 24, блоки силових агрегатів 12, резистори ослаблення збудження 13, роз'єднувачі вентилів 18, лічильник електроенергії 38, роз'єднувач РШК-В 39, під підлогою в кожній високовольтній камері знаходяться конденсатори КМ-0,5 53, увімкнені в колі допоміжних машин.

З кожного боку від трансформаторного приміщення встановлюють по одному згладжувальному реактору 54, мотор-

вентилятор 9, розщеплювач фаз 22 з генератором управління на його валу і реле оборотів. Під кожним згладжувальним реактором розташовані блоки індуктивних шунтів 55.

У середній частині кузова знаходиться трансформаторне приміщення з обладнанням, блок трансформатора 20 з радіаторами охолодження циркулюючого масла, перехідний реактор, головний контролер ЕКГ 15, розрядники захисту від перенапруг 16, блок диференціальних реле, захист вторинних кіл від перенапруг (блоки конденсаторів і панелей з резисторами), захист силових контакторних елементів ЕКГ від підгоряння контактів (конденсатори типу КМ-0,5 або КС-0,5-19 і запобіжники). Поруч з розширювальним баком трансформатора на стінці камери реактора, що згладжує, встановлена панель № 3 14.

З протилежного боку в трансформаторному приміщенні знаходиться акумуляторна батарея 56 і розподільний щит 21. Вище акумуляторної батареї встановлені контактор і резистор, що ввімкнені в коло підзарядки акумуляторної батареї. Частина трансформатора – масляний бак з радіаторами – розташована нижче рівня підлоги кузова. Від механічних ушкоджень радіатори захищені сітчастими огорожами.

Поруч з трансформаторним приміщенням в проході вище вікна встановлені штанги 36 для зняття ємнісних зарядів у колах електровоза, заземлення первинної обмотки трансформатора при роботі в трансформаторному приміщенні і високовольтних камерах. Високовольтні камери і трансформаторне приміщення з боку бічних проходів кузова огорожені сітчастими розсувними шторами, які блокуються електричними і пневматичними блокуваннями. У коридорах електровоза встановлені плафони для освітлення 7.

На даху змонтовані струмоприймачі 10, головний вимикач з прохідним ізолятором, розрядник, головні резервуари 58, змійовики компресорів, свистки, тифони 28, роз'єднувачі струмоприймачів 18 з ручним приводом, перешкодозаглушувальні дроселі 31, антена радіостанції 17, прохідний ізолятор для введення антени.

Під кузовом електровоза розташовані розетки для живлення допоміжних машин і тягових двигунів від мережі депо 32,

розетка для підзарядки акумуляторної батареї, світильники для освітлення ходових частин, розетки для підключення переносних ламп 34, приймальні котушки локомотивної сигналізації 29, штанги для заземлення ділянки контактної мережі над електровозом при роботі на даху після зняття напруги в контактному проводі.

Всі блоки апаратів і машин на електровозі виконані знімними, за винятком кожуха вентиляторів, які приварені до каркасів ВВК і машинних приміщень. Виймають блоки через дахові отвори, що закриваються знімними кришками. Щоб вийняти вентилятори, попередньо необхідно зняти мотор-компресори та розщеплювачі фаз. Для проведення демонтажу блоку трансформатора слід попередньо зняти сітчасті огорожі під кузовом, від'єднати патрубки від повітропроводів, зняти розподільчий щит і виконати інші необхідні відключення.

Також на рис. 1.3 зображені такі елементи: 19 – повітряний вимикач; 23 – роз'єднувач вентилів; 25 – блок живлення радіостанції; 27 – розподільник повітря; 30 – свисток; 33 – перемикач режимів роботи; 35 – контактор ККД-131; 37 – панель з перемикачем і запобіжником; 39 – роз'єднувач РШК; 40 – блок мотор-компресора; 41 – санвузол; 44 – кран машиніста; 45 – кран допоміжного гальма; 50 – сидіння; 51 – вогнегасник; 57 – резистор КФ.

1.1.4. Електровози ВЛ80^К і ВЛ80^Т

На електровозах використано однотипне обладнання, розташоване в основному однаково, майже симетрично щодо поперечної осі електровоза.

Електричне та пневматичне обладнання розташовують в кабінах, кузовах, під кузовами і на дахах обох секцій електровоза (рис. 1.4).

У кожній кабіні машиніста встановлено пульт керування 1, в якому змонтовані: контролер машиніста; кнопкові вимикачі, рукоятка пильності локомотивної сигналізації, а на панелі, що відкривається, – вольтметр для контролю напруги в контактному проводі; вольтметр для контролю напруги тягового двигуна і три

амперметри для контролю струму тягових двигунів 1-ї і 2-ї секцій і струму збудження; манометри для контролю тиску повітря в головних резервуарах, гальмовій магістралі, гальмових циліндрах і зрівняльному резервуарі; показчик позицій ЕКГ. У середині пульта розміщений баластний резистор для регулювання яскравості сигнальних ламп.

На пульті помічника машиніста встановлена панель з вольтметром і манометром, що показують відповідно напругу і тиск повітря в колі керування апаратами. У першій кабіні на бічній стінці пульта машиніста розташований регулятор тиску повітря в живильній магістралі, в другій – дешифратор і фільтр локомотивної сигналізації.

Обігрів кабін машиніста виконується електричними печами (дві у помічника машиніста і три у машиніста). Регулюють температуру в кабіні ввімкненням п'яти, трьох або двох печей. Під коробкою прожектора укріплені два мотор-вентилятори 12 для обдування робочих місць машиніста і помічника. Між їх кріслами під підлогою кабіни встановлений електрокалорифер обігріву лобових вікон.

Підлога, стіни і стеля кабіни машиніста мають тепло- і звукоізоляцію з полімерних матеріалів, які покриті зовні сосною фанерою завтовшки 6 мм, а усередині (під кабіною) сосновими дошками завтовшки 30 мм. Обшивка кабіни декорується паперово-шаруватим пластиком завтовшки 1,8÷2 мм (підлогу кабіни застилають лінолеумом). Вище за лобові вікна закріплені тіньові щитки.

У високовольтній камері кузова з боку кабіни розташовані панелі № 1 24 і № 3 25, блок силових агрегатів 2, розщеплювач фаз 3, мотор-вентилятор 12 для обдування двох тягових двигунів. У форкамері цього вентилятора встановлені індуктивні шунти. Поруч з мотор-вентилятором розміщена випрямна установка 5, складена на кремнієвих вентилях. Під випрямною установкою всередині каркаса поміщений згладжувальний реактор.

У центральній частині секції електровоза встановлено блок тягового трансформатора 7 з радіаторами охолодження. Трансформатор розташований так, що нижня частина бака разом з радіаторами знаходиться нижче рівня підлоги кузова. Від механічних пошкоджень радіатори захищені знімними сітчастими огорожами.

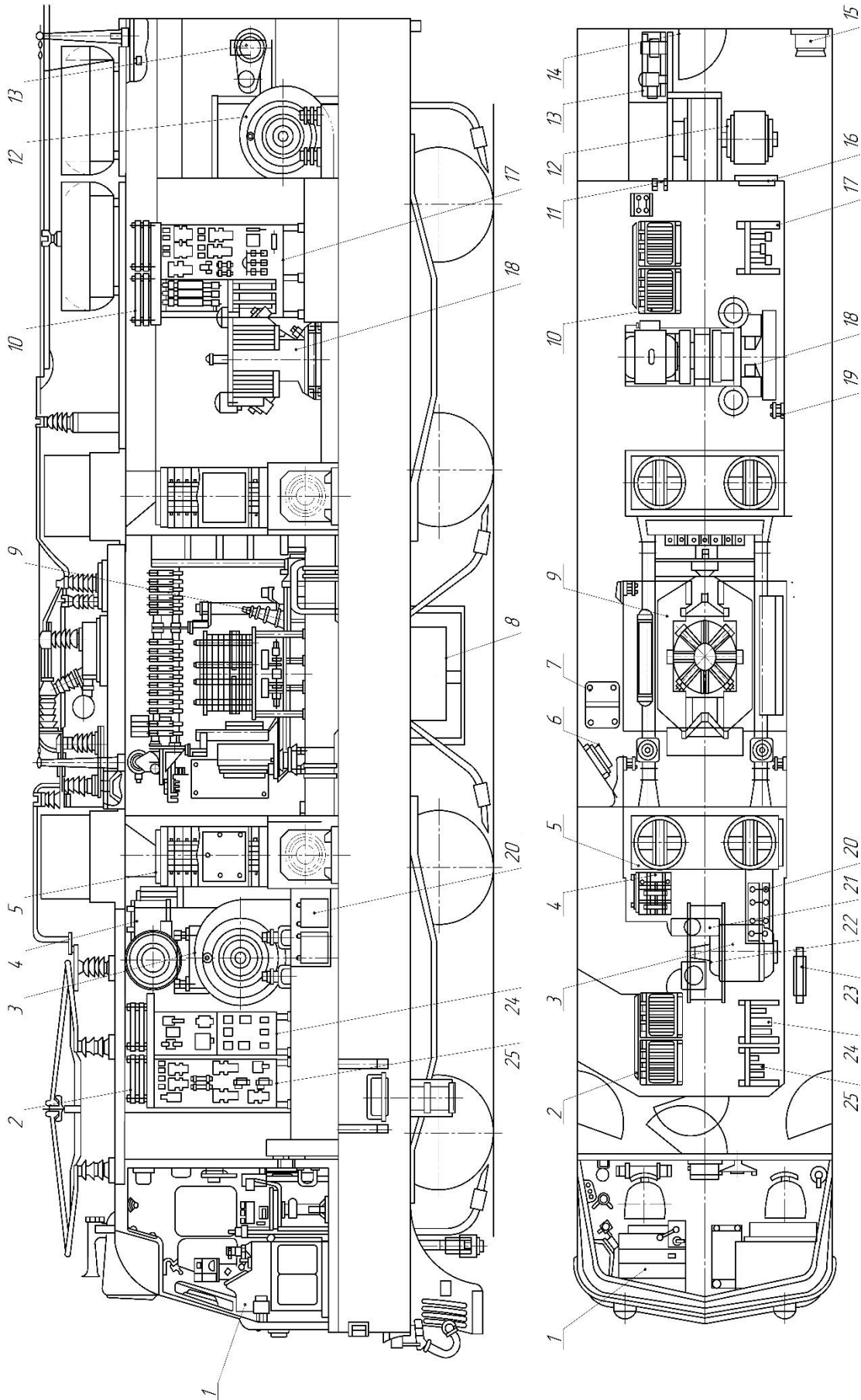


Рис. 1.4. Розташування обладнання на електровозі ВЛ80^к

На блоці трансформатора змонтовані головний контролер, перехідний реактор, розрядники захисту трансформатора від перенапруження, блок диференціального реле, конденсатори захисту ЕКГ, трансформатор струму 9. За трансформатором в приміщенні високовольтної камери встановлені випрямна установка, мотор-компресор 18, блок силових агрегатів 10, панель апаратів № 2, лічильник електроенергії, конденсатори 4 кола допоміжних машин та інше обладнання.

У торцевому відсіку кузова встановлені мотор-вентилятор для обдування двох тягових двигунів, компресор для піднімання струмоприймача 13, панелі з приладами і апаратами розподільного щита 16. Відмінність в установленні обладнання двох секцій полягає в тому, що в торцевому відсіку 1-ї секції встановлена радіостанція з антеною на даху, а у 2-й секції – розміщений санітарний вузол 14.

На даху електровоза розташовані струмоприймачі, дросель перешкодозаглушення, роз'єднувач 19, головний вимикач, розрядник, антена і головні резервуари. Струмоведучі шини виконані з труби і встановлені на опорних ізоляторах.

Приєднання струмоприймача до дроселя перешкодозаглушення і головного вимикача до прохідного ізолятора виконано смуговою шиною, а роз'єднувача до головного вимикача і розрядники – проводом.

Під кузовом електровоза встановлені акумуляторна батарея 8, заземлювальна штанга, розетка для підключення переносних ламп, світильники для освітлення ходових частин. На торцевій стінці розташовані розетки міжсекційних з'єднань, розетки для живлення тягових двигунів від мережі депо, зарядження акумуляторних батарей, розетки допоміжних машин. На торцевій стіні 2-ї секції, крім того, є головка для заправки водою бака санвузла. Розетки допоміжних машин і живлення тягових двигунів від мережі депо встановлені в коробці, яка зблокована з щитами ВВК, що запобігає потраплянню під високу напругу обслуговуючого персоналу.

Все основне обладнання скомпоновано в окремі блоки, які можна демонтувати через отвори даху. Для демонтажу блока трансформатора слід попередньо зняти захисні огорожі радіаторів, роз'єднувачі вентилів.

Також на рис. 1.4 зображені такі елементи: 6 – панель апаратів № 4; 11 – трансформатор Т-45; 15 – прийомопередавач; 17 – панель апаратів № 2; 20 – блок конденсаторів; 21 – дросель ДС-3; 22 – дросель ДС-1; 23 – резистор пуску роз'єднувача фаз.

1.1.5. Електровози ВЛ82

Кузов електровоза, що складається з двох секцій, спирається на чотири візки за допомогою бічних пружинних опор. Візки мають боковини звареної конструкції. Листові ресори розташовані під буксами.

На кожній секції електровоза (рис. 1.5) встановлено по одному трансформатору 4 ОДЦЕ-4000/25 номінальною потужністю 4000 кВА. Охолодження трансформатора масляне з примусовою циркуляцією.

У кабіні машиніста встановлений пульт керування 1, в якому змонтовані: контролер машиніста; кнопкові вимикачі, рукоятка пильності локомотивної сигналізації

Контролери машиніста КМЕ-72 мають три рукоятки: реверсивну (положення: вперед, 0, назад), головну (39 позицій, в тому числі 0, і дві ходові: 25 і 38) і режимну (положення гальмування, повного збудження і чотири ступені ослабленого збудження).

На кожній секції встановлено по два мотор-вентилятори 7 і мотор-компресор 2. Крім того, на кожній секції є мотор-вентилятор для охолодження пускгальмівних резисторів 8 і силового трансформатора, а також допоміжний мотор-компресор. На електровозі встановлені дві акумуляторні батареї КН-100 (по одній на секцію). Для охолодження тягових електродвигунів, випрямних установок 6 і згладжувальних реакторів служать мотор-вентилятори з електродвигунами НБ-411. Компресори охолоджуються мотор-вентиляторами з електродвигунами НБ-107. Для живлення кіл управління напругою 50 В і зарядження акумуляторних батарей служать трифазні генератори 3 НБ-104, також є випрямно-стабілізуюча установка. Секції електровоза мають однакові електричні схеми і можуть працювати за системою багатьох одиниць.

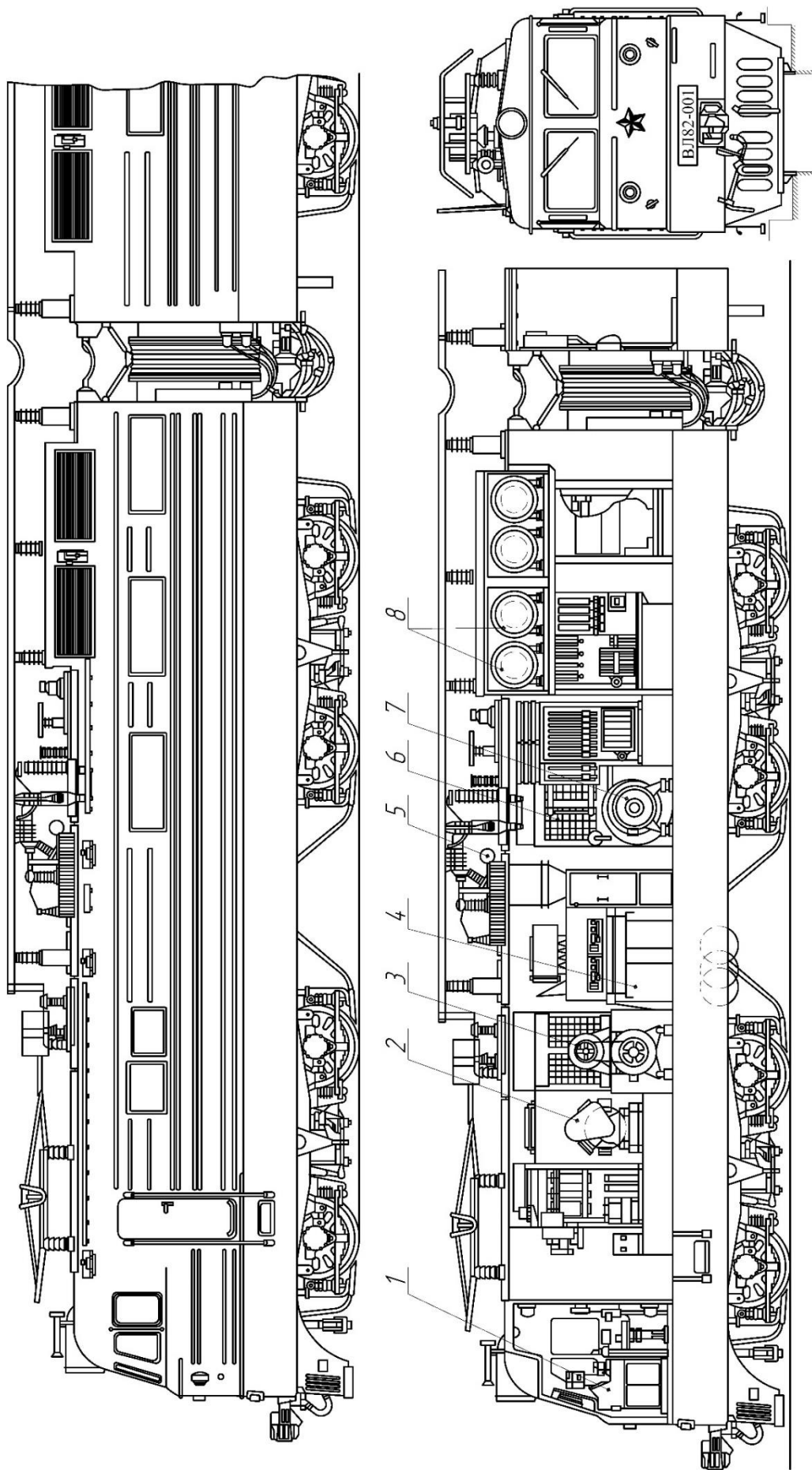


Рис. 1.5. Розташування обладнання на електровозі ВЛ82

При живленні електровоза змінним струмом енергія до тягових електродвигунів підводиться через знижувальний трансформатор і випрямну установку; при живленні постійним струмом – безпосередньо в коло тягових електродвигунів. На обох системах струму регулювання напруги на двигунах здійснюється реостатами. Тягові двигуни вмикаються по чотири послідовно і послідовно-паралельно. Перехід від одного з'єднання до іншого здійснений за мостовою схемою. У коло резисторів ослаблення збудження включені індуктивні шунти і кремнієві вентилі для захисту від генераторних струмів.

Схема електровоза дозволяє виробляти реостатне гальмування, при якому тягові електродвигуни з'єднуються за схемою перехресного ввімкнення. Загальний захист кіл тягових електродвигунів здійснений швидкодіючими вимикачами; на змінному струмі в коло трансформатора увімкнений головний вимикач 5; є також реле перевантаження в колах двигунів, розрядники, реле боксування і інші захисні апарати. На кожній секції електровоза встановлено струмоприймач. Для захисту силових кіл при роботі на змінному струмі служать повітряні вимикачі ВВВ-25-4М, при постійному струмі коло захищають швидкодіючими вимикачами БВП-5А. Перемикання кіл тягових електродвигунів здійснюється електропневматичними контакторами ПК-340, ПК-341, ПК-342.

1.1.6. Електровози ВЛ85

Електровоз має дві кабіни управління (рис. 1.6) – по одній в кожній секції. Розташування обладнання в обох кабінах однакове.

Кожна кабіна обладнана пультом управління, що конструктивно складається з двох блоків: правого та лівого.

На даху електровоза встановлено струмоприймач 2 з дроселем перешкодогашення і фільтром для захисту від радіоперешкод, обмежувач для зняття перенапруг, повітряний високовольтний вимикач 6 з трансформатором струму 5, роз'єднувачі 7, антена 4 радіостанції короткохвильового діапазону, кондиціонер 1 і антена радіостанції ультракороткохвильового діапазону.

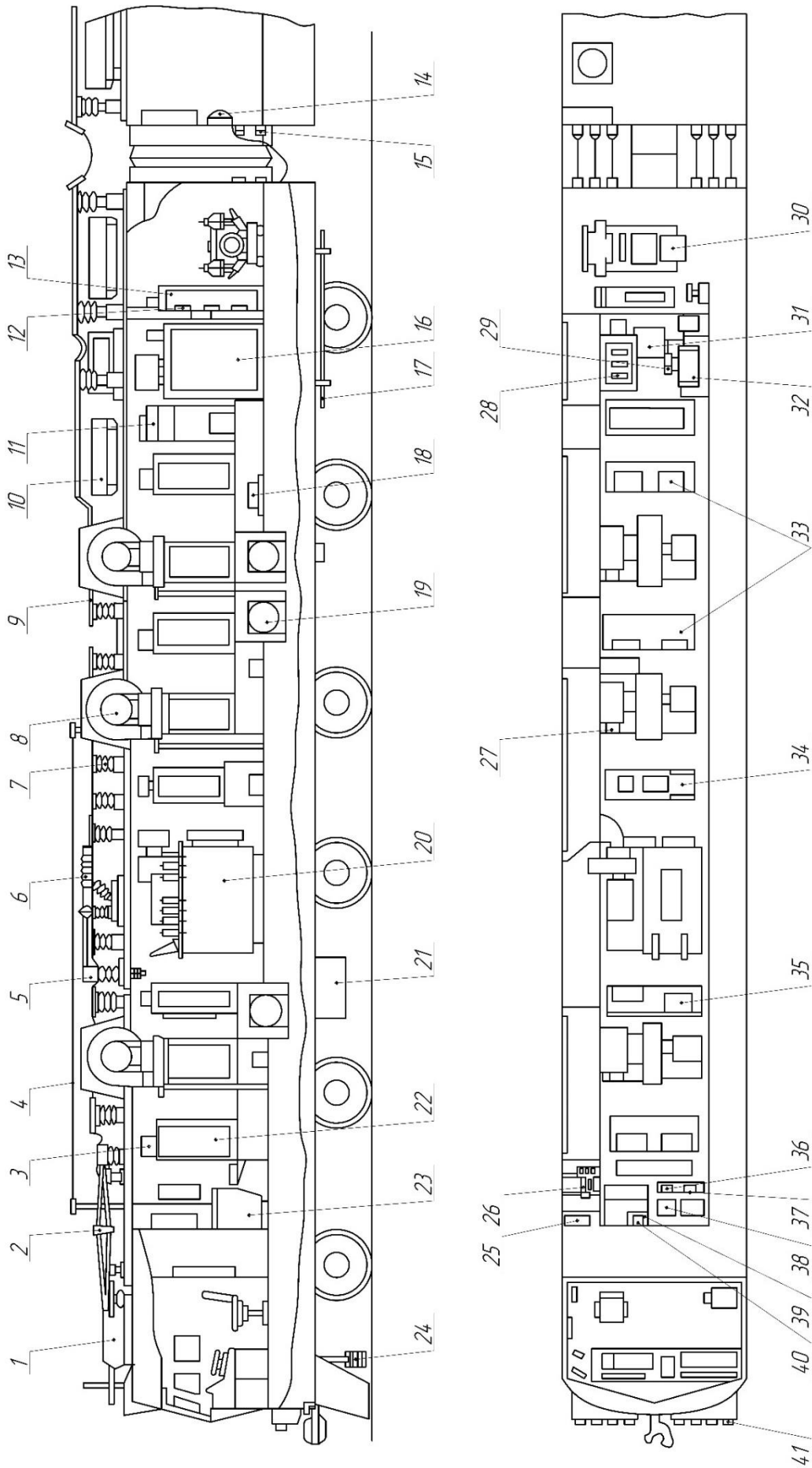


Рис. 1.6. Розташування обладнання на електровозі ВЛ85

Електричний зв'язок струмоприймачів з апаратами і пристроями виконаний латунними трубами 9.

Для з'єднання електричного високовольтного ланцюга секцій при роботі електровоза за СБО і трьома секціями на коробці прожектора передбачені пристрої для установаження між секціями шини з гнучким з'єднанням.

На даху розміщені також головні повітряні резервуари 10 і їх змішувачі.

У кузові встановлено таке основне обладнання: по три блоки силових агрегатів 3 і відцентрових вентиляторів 8 охолодження перетворювачів і тягових двигунів, по блоку допоміжного обладнання 11 і пневматичного обладнання 13, санітарний вузол 14 (тільки на 2-й секції), по блоку мотор-компресора 30 з адсорбційною установкою і низьковольтною апаратурою 16, шість індуктивних шунтів 18, три згладжувальних реактори 19, блок тягового трансформатора 20, три перетворювачі 22, автотрансформатор 26, блок автоматичного управління 23, перемикач 36, шафа для радіостанції 25 ультракороткохвильового діапазону, блоки живлення 39, управління 38, вимірювання 37, блоки апаратів 35 і 34, три блоки живлення перетворювачів 27, блок баластних резисторів 28, розщеплювач фаз 32, блок відцентрового вентилятора 31 охолодження баластних резисторів, щит управління кондиціонером 40, генератор синхронний 29, кнопка збудження генератора 12, приймальні катушки локомотивної сигналізації 24, блоки силових агрегатів 33.

На бічній стінці кузова знаходяться штанги вимикальна і заземлювальна з проводом без ізоляції; на стінці ВВК в середній її частині – автомат – обігрів вимикача. В кінці кузова кожної секції на торцевій і бічній стінках розміщені по три вогнегасники ОУ-5.

Тільки в 1-й секції встановлені в коридорі ящик з інструментами та електроплитка для підігріву їжі, панель фільтра живлення холодильника.

Високовольтна камера огорожена сітчастими шторами, які блокуються електрично при піднятому струмоприймачі, і розділена на 13 відсіків, у кожному з яких розміщено відповідне обладнання.

Під кузовом електровоза розміщено таке обладнання: приймальні котушки локомотивної сигналізації; світильники освітлення ходових частин; акумуляторна батарея 21, встановлена в двох ящиках в середній частині кузова; розетки для підключення переносної лампи; штанга заземлювальна 17, розетки 41 для електричного з'єднання низьковольтних кіл при роботі за СБО (розташовані на лобовій частині електровоза), розетки 15 міжкузовного з'єднання на торцевій частині кузова. Там же знаходяться розетки: для підключення проводів при зарядженні акумуляторної батареї; підключення кіл допоміжних машин від мережі депо, подачі живлення на тягові двигуни з метою переміщення електровоза за допомогою електроустановок депо та розетка для подачі низької напруги до контактора депо при блокуванні засувних штор і дверей ВВК в разі подачі високої електричної напруги в схему електровоза від зовнішнього джерела.

1.1.7. Електровози ЧС4 і ЧС4^Т

Обладнання на електровозах ЧС4 і ЧС4^Т, за невеликим винятком, розташоване в основному однаково. Тому достатньо розглянути розташування обладнання на електровозах ЧС4 і необхідно акцентувати відмінності, що стосуються електровозів ЧС4^Т.

Електричне та пневматичне обладнання встановлено в кузові, під кузовом, на даху і в кабінах машиніста (рис. 1.7).

Кабіни машиніста розташовані по кінцях кузова і відокремлені від машинного приміщення проміжними стінами. Вхід в кабіни здійснюється з поперечного коридору машинного приміщення через двері, розташовані приблизно в середині проміжної стіни. Обидві кабіни обладнані однаковими пультами управління електровозом 1, контрольними, допоміжними і сигнальними приладами та апаратами.

Стіни, стеля та підлога кабін мають звуко- і теплоізоляційні прокладки з поліуретану. Стеля і панелі стін облицьовані декоративним пластиком, підлога вкрита поліхлорвініловим лінолеумом.

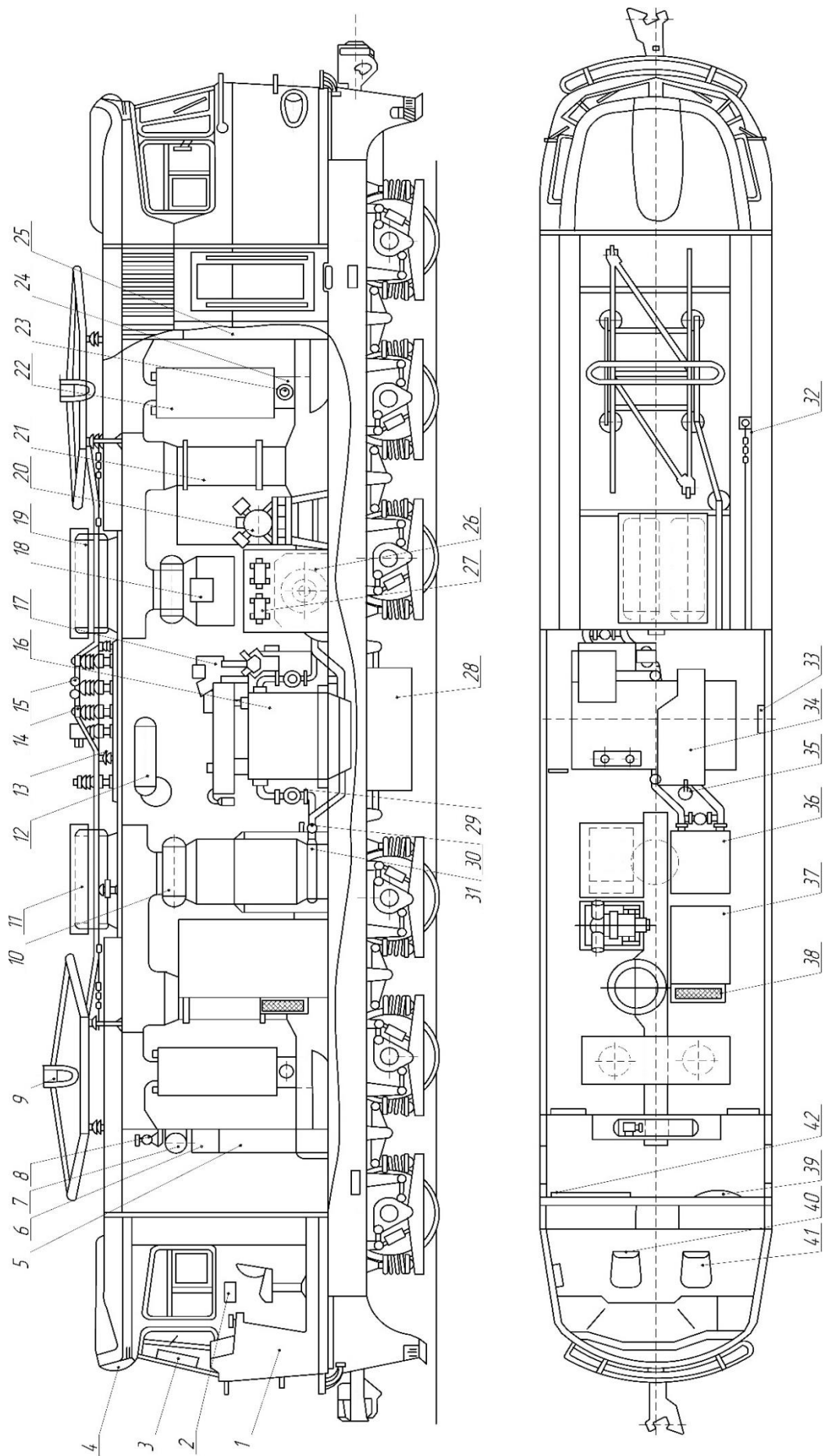


Рис. 1.7. Розташування обладнання на електровозі ЧС4

У верхній частині кожної кабіни над лобовими вікнами розташований короб з освітлювальним прожектором 4. На електровозах ЧС4 в коробі прожектора є вентиляційні проходи для забору повітря в кабіні машиніста; там же встановлені тифони. На електровозах ЧС4^Т, обладнаних системою кондиціонування повітря в кабінах машиніста, вентиляційних проходів немає, а тифони перенесені на дах електровоза.

Всю передню частину кабіни займає пульт управління електровозом, що поєднує пульти машиніста і помічника. На електровозах до ЧС4-062 пульт виготовлений зі склопластику (ламінату) і займає майже половину кабіни за довжиною. З метою збільшення вільної площі в кабіні на електровозах наступних випусків встановлені нові пульти з меншими габаритними розмірами. На нових пультах використана більша кількість сигнальних ламп і дещо змінено розташування кулачкових перемикачів; на пультах електровозів ЧС4^Т, крім того, встановлено прилади і апарати, що відносяться до кіл реостатного гальма. У верхній частині пульта розміщено дев'ять приладів і чотири манометри. Вони прикріплені до каркасу пульта і закриті трьома металевими декоративними рамками, на яких є таблички із зазначенням призначення приладів.

Крани управління електропневматичними гальмами розміщені праворуч від машиніста; там же знаходиться реєструючий швидкостемір типу СЛ2М. Колонка ручного гальма на електровозах ЧС4 встановлена під пультом з боку помічника машиніста. На електровозах ЧС4^Т колонка ручного гальма змонтована на задній стіні кабіни за кріслом машиніста.

На задніх стінах кабін електровозів ЧС4 розташовані також вимикачі і перемикачі, які не потребують періодичного впливу з боку машиніста під час поїздки.

На електровозах ЧС4^Т всі апарати та обладнання з задніх стін кабін перенесені в поперечні коридори електровоза.

Для опалення кабін на електровозах ЧС4 використовуються калорифери, а на електровозах ЧС4^Т система кондиціонування повітря. Крім того, в пультах під ногами машиніста і помічника встановлені електричні печі. На електровозах ЧС4 там же знаходяться калорифери, які в зимовий період обігрівають лобові вікна, не допускаючи їх замерзання. У нижній частині вікон

змонтовані склоочисники з пневматичним приводом. Зовні вікна можуть омиватися потоком води з бака, розташованого над пультом управління електровозом.

У кабіні є три м'яких сидіння (одне відкидне). Сидіння машиніста 41 можна регулювати за висотою і в горизонтальній площині.

За кожною кабіною знаходяться поперечні проходи, на протилежних кінцях яких розташовані вхідні двері електровоза. У проході за першою кабіною встановлені шафа з контакторами і реле 25, системи виявлення несправностей в низьковольтних колах, лічильник електроенергії, реле управління, перемикачі радіостанції та автостопа, фільтр локомотивної сигналізації. У поперечному коридорі за другою кабіною змонтовані пневматичні апарати, допоміжний мотор-компресор і зарядний пристрій акумуляторної батареї 5 з блоком управління. Там же розташовані холодильник 39 і санітарний вузол.

Розташування обладнання в машинних приміщеннях електровозів ЧС4 і ЧС4^Т виконано за блоковим принципом. Електрична апаратура високовольтних кіл розміщена частково у високовольтній камері (ВВК) електровоза, частково в окремих шафах, оснащених блокуваннями безпеки. Витриманий принцип симетрії – над кожним візком встановлено обладнання, що відноситься до тягових двигунів цього візка.

В машинних відділеннях електровозів знаходяться напівпровідникові перетворювальні установки з апаратурою їх захисту, згладжувальні реактори тягових двигунів 26 і допоміжних машин 27, резистори ослаблення поля тягових двигунів, допоміжні електродвигуни та шафи з високовольтною апаратурою 37: реверсори, перемикачі, контактори ослаблення поля тягових двигунів, реле перевантаження та ін.

Уздовж бічних стін кузова електровоза через машинне приміщення проходять два коридори. З одного коридору при знеструмлених силових колах і опущених струмоприймачах через сітчасті двері з блокуваннями безпеки можна увійти в середню частину кузова ВВК, де розміщені блок тягового трансформатора 16 з високовольтним перемикачем ступенів 17, масляні насоси 29 з електродвигунами, газове реле тягового трансформатора і резистори в колі реле захисту високовольтного обладнання від

замикання на землю і інші апарати, пов'язані з тяговим трансформатором.

Силові кабелі укладені над підлогою машинного приміщення, шини – у верхній частині кузова, а низьковольтні дроти в пучках прокладені вздовж коридорів і введені в загальну коробку затискачів за допомогою штепсельних рознімачів.

Під кузовом електровоза розташовані акумуляторна батарея 28, розетки для підзарядки батареї, розетки для підключення переносних ламп, світильники для освітлення ходових частин, приймальні котушки локомотивної сигналізації, штекер пристроїв для під'єднання кіл опалення поїзда від електровоза; а на електровозах ЧС4^T, крім того, – пристрій для введення електровоза в депо від джерела постійного струму і пристрій для живлення допоміжних машин від стороннього джерела змінної напруги (останні на електровозах ЧС4^T встановлені в машинному приміщенні). З кожного боку електровоза на трьох шийках колісних пар встановлені пристрої для відведення струму в рейки.

На даху знаходяться струмоприймачі 9, головний вимикач 13, блок роз'єднувача струмоприймачів з заземлювачем 15, високовольтний розрядник 14, головні резервуари 11, антена радіостанції 32, прохідний ізолятор для введення антени, змійовики компресорів. Для проходу по даху з двох боків встановлені містки. Поруч з ними знаходяться вісім люків пісочних бункерів. Самі бункери розміщені уздовж бічних стін кузова, причому кожен бункер обладнаний заксленими вікнами, через які з кузова електровоза можна контролювати наявність піску.

Для зручності монтажу і демонтажу обладнання дах електровоза розділений на окремі знімні секції з гумовими ущільнювачами.

Всі блоки апаратів і машин, розташовані на електровозах, виконані знімними. Демонтаж обладнання не потребує зняття сусідніх апаратів і машин.

Також на рис. 1.7 зображені такі елементи: 2 – маневровий контролер; 3 – світлофор; 6 – панель з пневматичними апаратами; 7 – резервуар з повітрям кіл управління; 8 – допоміжний мотор-компресор; 10 – допоміжний повітряний резервуар;

12 – резервуар головного вимикача; 18 – блоки ємнісного захисту від перенапруг; 19 – мотор-вентилятор резисторів, згладжувальних реакторів; 20 – мотор-компресор; 21 – мотор-вентилятор тягових двигунів; 22 – випрямна установка; 23 – повітродструминне реле; 24 – мотор-вентилятор випрямної установки; 30 – запірний кран системи масляного охолодження; 31 – радіатори охолодження тягового трансформатора; 33 – коробка затискачів; 34 – розширювальний бак тягового трансформатора; 35 – повітроосушувач; 36 – шафа з резисторами; 37 – шафа з високовольтною апаратурою; 38 – холодильник; 40 – крісло помічника машиніста; 42 – шафа з апаратурою управління.

1.1.8. Електровози ЧС7

Обладнання на кожній із секцій електровоза ЧС7 (в кузові, під кузовом і на даху) розташовується в основному однаково (рис. 1.8). В кузові електровоза обладнання розміщується в кабіні машиніста, поперечному проході і машинному відділенні.

Розташування обладнання в обох кабінах машиніста однакове. Всю передню частину кабіни займає пульт управління. На середній частині пульта з лівого боку розташовані кнопки подачі піску, тифона, свистка. Праворуч від них розміщуються у верхньому ряду: вимикач електродинамічного гальма, перемикач реле АЛС, вимикач водовідведення та обігріву, вимикач мотор-компресора головної секції, вимикач струмоприймача і роз'єднувача головної секції, вимикач управління і швидкодіючого вимикача; в середньому ряду: вимикач жалюзі, вимикач допоміжного компресора, вимикач мотор-компресора задньої секції, вимикач струмоприймача і роз'єднувача задньої секції; в нижньому ряду: вимикач освітлення візків, перемикач живлення радіостанції, вимикач освітлення кабіни машиніста, вимикачі лівих і правих буферних ліхтарів, вимикач прожектора.

Далі на середній частині пульта знаходяться реверсивна рукоятка з реверсивним барабаном, штурвал контролера машиніста з кнопкою свистка, сигнальна лампа дефектів, головний вимикач ЕПГ, ручний перемикач гальма, перемикач

обмеження сили електродинамічного гальмування, кнопка вирівнювання осьових навантажень, кнопка відпуску гальм електровоза. Крани управління гальмами електровоза розташовані праворуч від машиніста. Поруч з ними на похилій панелі встановлені п'ять манометрів для контролю тиску в головних резервуарах, гальмовій магістралі, запасних резервуарах, гальмових циліндрах. Тут же розміщений швидкостемір СЛ2М з лампою освітлення швидкостеміра.

У верхній частині пульта управління розташовані: розетка і лампа для освітлення пульта з боку помічника машиніста, реостат регулювання яскравості ламп освітлення вимірювальних приладів, вимикач опалення поїзда, покажчики ввімкнення контакторів опалення поїзда, кнопка для перевірки напруги акумуляторної батареї задньої секції, вольтметр акумуляторної батареї, лампи освітлення приладів.

На вертикальній стінці пульта встановлені: апарати поїзного радіозв'язку, рукоятка пильності, перемикач обігріву скла, штепсельна розетка, вимикач опалення під ногами, перемикач опалення і кондиціонера.

На стелі кабіни розміщені кнопка ВК1 АЛС, вентилятори, лампи освітлення кабіни, гучномовці радіостанції. Вгорі над пультом управління з боку машиніста знаходяться панелі сигналізації відповідно для 1-ї і 2-ї секцій з сигнальними лампами. Під підлогою кабіни машиніста з лівого боку встановлені пристрої кондиціонування повітря: двигун кондиціонера, двигун вентилятора кондиціонера, захисний термостат, захисні реле тиску фреону. У поперечному проході з боку машинного відділення встановлена шафа захисту від боксування та юзу, під яким розташований розподільний щит.

У блоці, розташованому з боку поздовжнього коридору, розміщені такі апарати: у верхньому ряду лічильник електроенергії для опалення поїзда, електропневматичні контактори, два реле буксування; в нижньому ряду лічильник електроенергії для тяги поїзда, запобіжник лічильника, диференціальне реле силового кола, шунт амперметра, затискачі роз'єднувачів для введення електровоза в депо під низькою напругою, реле перевантаження, лінійні контактори, запобіжник реле напруги і вольтметрів мережі, реверсор.

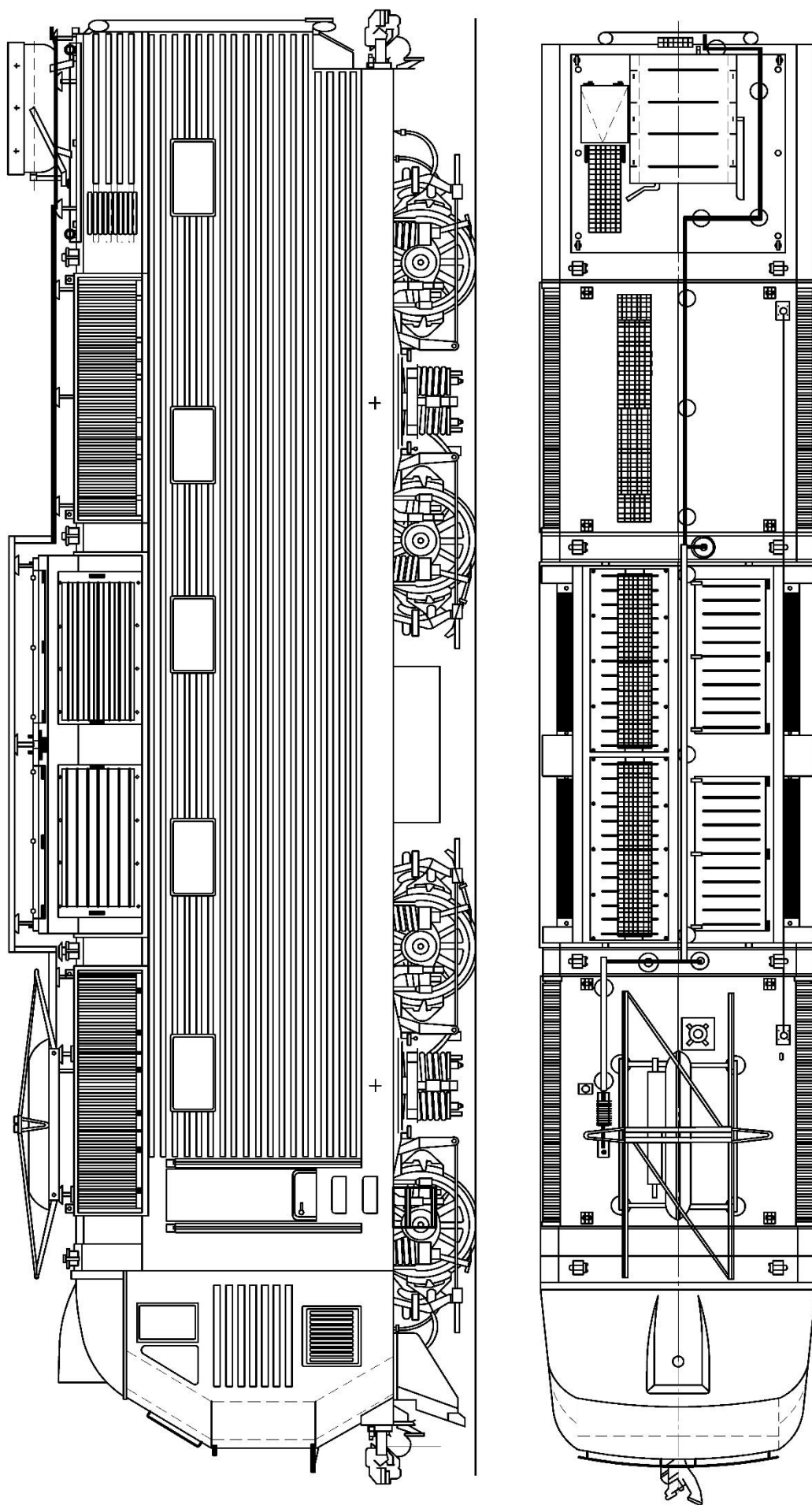


Рис. 1.8. Розташування обладнання на електровозі ЧС7

Усередині високовольтної камери з боку кабіни машиніста розташовані: диференціальне реле двигунів мотор-вентиляторів пускогальмівних резисторів, захисний конденсатор, розрядний резистор конденсатора.

З боку пневматичної панелі на торцевому боці блоку знаходяться: диференціальне реле двигунів мотор-вентиляторів пускогальмівних резисторів, реле перевантаження опалення поїзда.

У блоці, розташованому з боку, протилежного подовжньому проходу, встановлено такі апарати: у верхній частині резистори мотор-компресорів і мотор-вентиляторів, резистори ослаблення збудження тягових двигунів, запобіжники допоміжних машин, електропневматичні контактори ослаблення збудження; в нижній частині лінійні контактори, теплові реле, диференціальне реле, контактор двигуна допоміжного компресора, електромагнітні контактори допоміжних машин, контактор двигуна кондиціонера, контактор підключення тиристорного збудника, перемикач вентиляторів, швидкодіючий вимикач.

На стіні машинного відділення, що є частиною високовольтної камери, знаходяться приводи всмоктувальних жалюзі.

Під кузовом електровоза розташовані: акумуляторні батареї, індуктивні шунти в спеціальних шафах, розетки для введення електровоза в депо від джерела низької напруги. Між секціями проходять міжсекційні кабелі силових кіл і з'єднувальні рукави.

На даху електровоза розміщені струмоприймачі, роз'єднувачі, заземлювачі, розрядник, дросель для заглушення радіоперешкод, головні резервуари, антена для радіостанції. Для проходу по даху встановлені містки і поруч з ними знаходяться люки пісочниць. На даху 1-ї секції електровоза розташований міжсекційний роз'єднувач.

1.1.9. Електровози ЧС8

Електровоз складається з двох однакових секцій (рис. 1.9). Основа кожної секції – кузов вагонного типу, конструктивно близький до кузова електровоза ЧС7, що складається з несучої

рами, лобової частини кабіни машиніста, двох бічних стін, даху і задньої торцевої стіни з міжсекційним переходом.

Пульт управління та крісло машиніста розміщені з правого боку кабіни, пульт і місце помічника – з лівого.

Дах локомотива використовується для розміщення на ньому струмоведучого обладнання та головних повітряних резервуарів. З боків вбудовані жалюзі вентиляторів.

Задні торцеві стінки мають плоску форму і оснащені міжвагонним переходом з гумовим ущільнювачем для переходу членів локомотивної бригади між секціями. З боків від міжвагонних переходів розташовані розетки міжсекційних електричних кіл, що з'єднуються кабелями.

За кабіною машиніста з кожного боку є одностулкові двері службового тамбура машиніста, за яким розташоване машинне відділення, що має по п'ять бічних вікон з кожного боку секції.

За кабіною знаходиться тамбур, який має п'ять дверей. У тамбурі встановлені різні електронні прилади безпеки і шафа з автоматичними захисними вимикачами, блоком виявлення боксування коліс і аварійними сигналізаторами і перемикачами.

За тамбуром знаходиться машинне відділення, що має два бічних вузьких проходи вздовж стін, між якими розміщено основне електрообладнання локомотива. Обладнання розташоване в такий спосіб: в передній частині розміщені випрямляч, перетворювачі струму і мотор-вентилятор тягових двигунів переднього візка; в середині – високовольтна камера тягового трансформатора з власним мотор-вентилятором; в задній частині за високовольтною камерою – випрямляч, перетворювачі струму і мотор-вентилятор заднього візка; за ними – пневматична панель з кранами і мотор-компресор.

Струмоведуче високовольтне обладнання розміщено на даху електровоза. Струмознімання з контактної мережі здійснюється через струмоприймач 2SLS2 у вигляді пантографа легкого типу, встановленого в передній частині даху секції. При подачі повітря в циліндр струмоприймача він піднімається, і струм з контактної мережі проходить через струмоприймач і далі йде по струмоведучих шинах, подовжньо прокладених на ізоляторах уздовж даху від струмоприймачів до задньої частини секції.

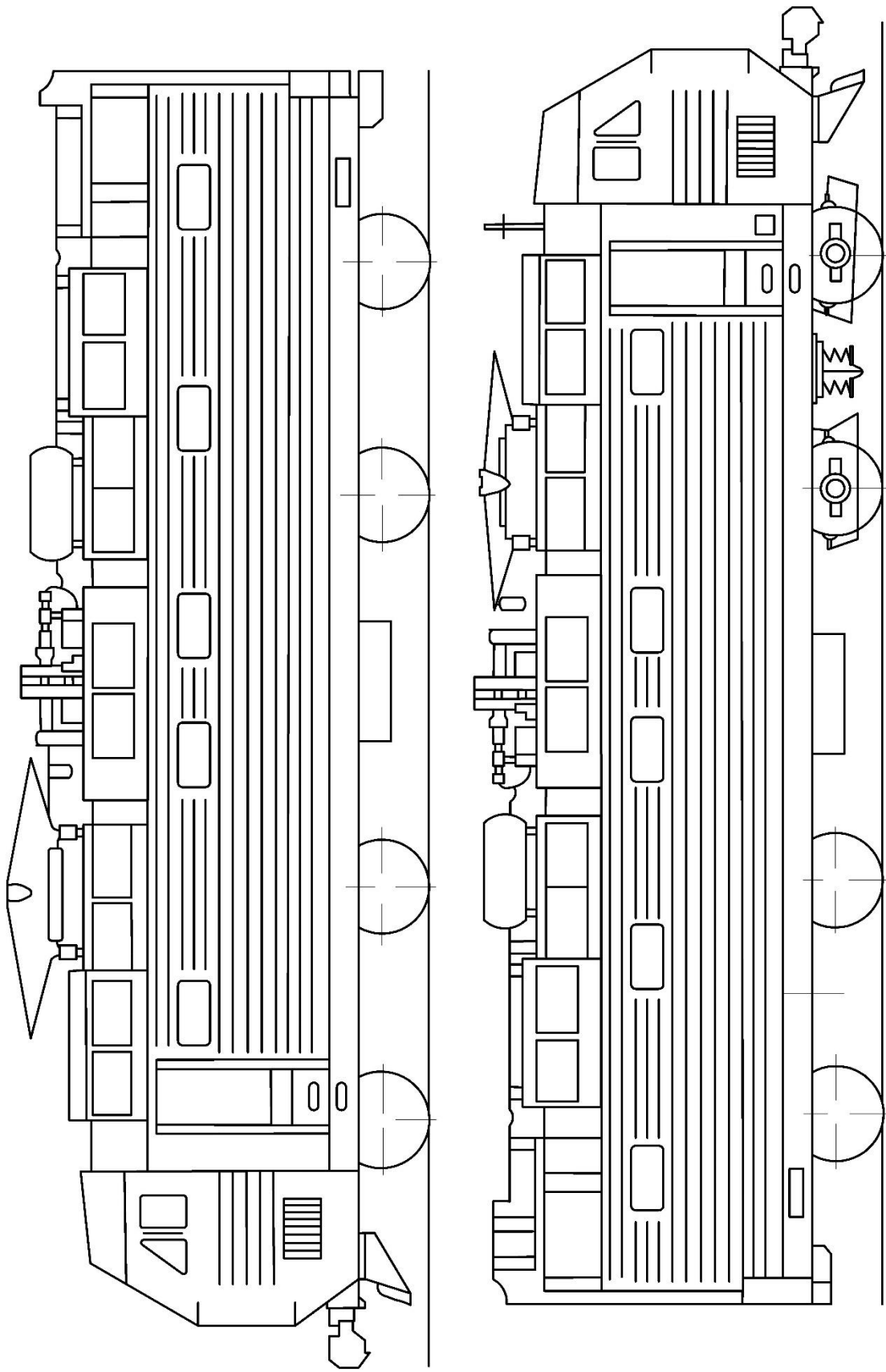


Рис. 1.9. Розташування обладнання на електровозі ЧС8

У місці зчеплення секцій шини пов'язані між собою перемичкою для можливості живлення обох секцій від одного струмоприймача.

В середині даху кожної секції встановлено головний повітряний вимикач з дугогасильною камерою, через який струм подається від шини і потім йде в кузов електровоза через вступний ізолятор до тягового трансформатора.

На кожній секції електровоза в середині машинного відділення встановлено трансформатор з масляним охолодженням. Масляний радіатор і мотор-вентилятор, що обдуває його, встановлені безпосередньо на бічній частині бака трансформатора. Силова схема секції має випрямні установки, реле перевантаження і т. д. Перемикач ступенів, який регулює напругу на тягових двигунах, має 32 ступені.

Кожна випрямна установка живить два тягових двигуни візка, ввімкнених паралельно, і розташована в передній і задній частині машинного відділення відповідно.

1.1.10. Електровози ЕП1

Обладнання електровоза розміщено на даху, в кузові та під кузовом відповідно до рис. 1.10.

На даху встановлено: кондиціонери КТГ-ЕЗ 1; два струмоприймачі Л1-У1-01 3; два дроселі ДП-011 4; роз'єднувачі Р-213-1 5 і 10; трансформатор струму ТПОФ-25 6; фільтр для захисту від радіоперешкод Ф6 7; обмежувач перенапруг ОПН-25М 8; повітряний високовольтний вимикач ВОВ-25А 10/400 9; антена радіостанції короткохвильового діапазону 11; антена радіостанції ультракороткохвильового діапазону АЛ-2 12.

Електричне з'єднання струмоприймачів з апаратами виконано шинами, встановленими на високовольтних ізоляторах. Для компенсації теплового розширення в ланцюзі сталевих шин передбачені гнучкі мідні шунти.

Крім електричного обладнання на даху електровоза розміщені головні повітряні резервуари зі змійовиками.

Під кузовом встановлено таке обладнання: приймальні котушки локомотивної сигналізації КПУ1 14; світильники 15; по

дві розетки з кожного боку рами для підключення переносної лампи; акумуляторна батарея 28, розміщена у двох ящиках; розетки РПС 400-1В1К 23 для подачі напруги від мережі депо на допоміжні машини, на тягові двигуни, на коло управління.

У кузові обладнання в основному встановлено у ВВК. Високовольтна камера має суцільні по торцях і сітчасті (уздовж прохідного коридору) огорожі. Доступ у ВВК здійснюється через розсувні сітчасті штори, які блокуються в закритому положенні перед подачею високої напруги на електровоз (від контактного проводу або від мережі депо).

Майже все обладнання в кузові має блокову компоновку, що спрощує монтаж і скорочує монтажні комунікації.

Згідно з кресленнями установки обладнання високовольтна камера умовно розділена на частини: ВВК1, середня частина ВВК, компресорне приміщення і ВВК2.

У ВВК1 встановлено таке обладнання: затискачі контактні 2; перетворювач частоти і числа фаз ЛЧФ-136; шафа живлення ШП-21 19; індуктивні шунти ІШ-009 20; блок силових агрегатів 46; панель перемикачів 51; панелі живлення ПП-720 53; блок живлення кондиціонера БПК-044 54; блок силових агрегатів № 4 55; згладжувальний реактор РС-38 30; випрямно-побутовий перетворювач ВПП-5600 31; блок діагностики 56; блок живлення 62; блок відцентрового вентилятора 59; блок комутації БКР-У-2М 48.

У середній частині ВВК встановлено таке обладнання: шунтувальний дросель Д-180 37; реле перенавантаження РТ-13 38; трансформатор струму ТКЛП 22; блок випрямної установки збудження ВУЗ-118 24; блок силового трансформатора 57; блокувальний перемикач БП-207 58.

У компресорному приміщенні встановлені: блок апаратів 29; блок баластних резисторів ВБР-20 40; блок пневматичного обладнання 26; блок відцентрового вентилятора 60; блок мотор-компресора 61.

Розташування обладнання в кабінах однакове, проте є деякі відмінності. У першій кабіні розміщений приймально-контактуючий пристрій, в другій – штурвал ручного гальма, шафа для одягу зі встановленим в ньому приймачем радіостанції і місцем для аптечки.

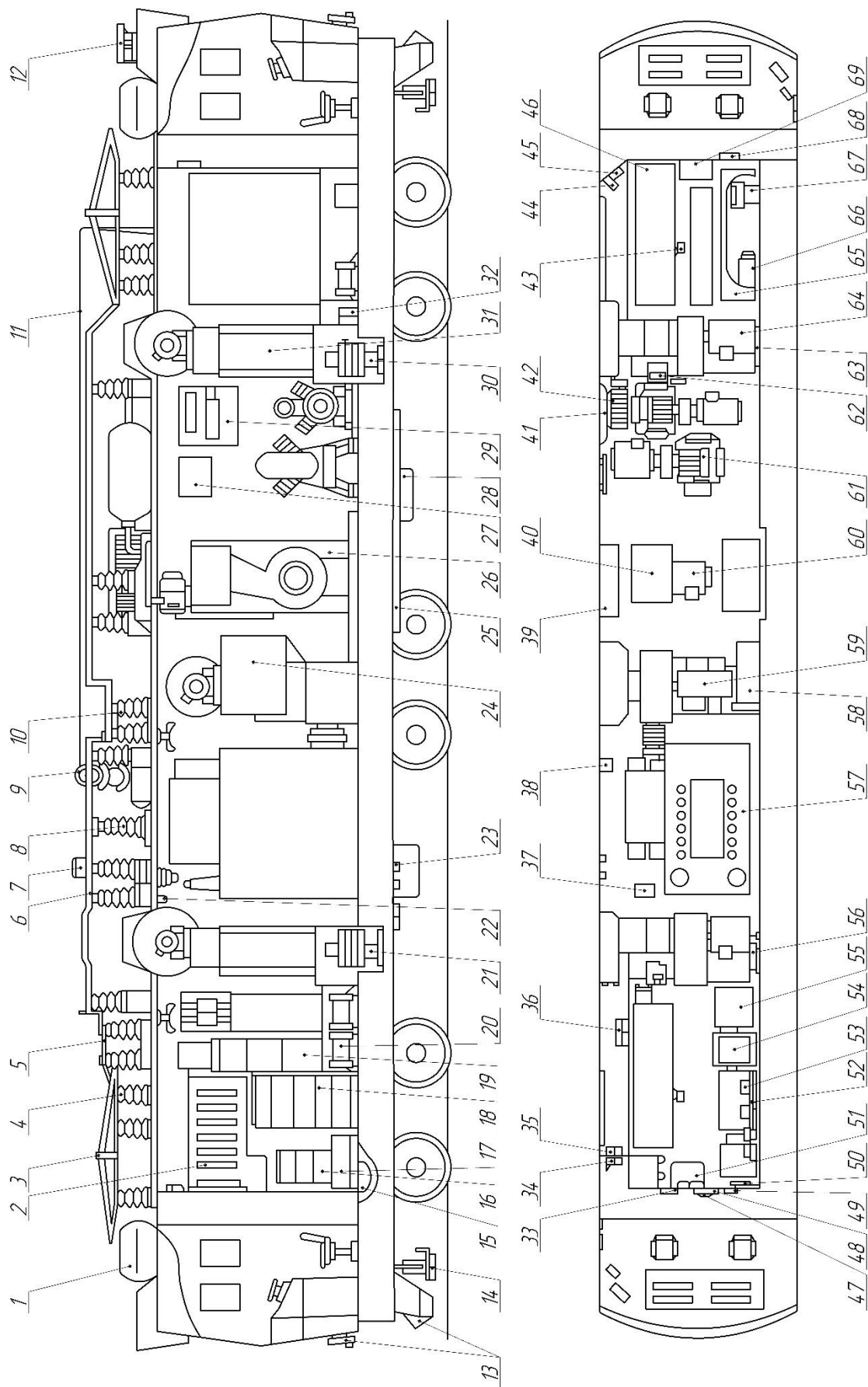


Рис. 1.10. Розташування обладнання на електровозі ЕП1

Кожна кабіна обладнана пультом управління, який складається з двох модулів – лівого і правого. Правий модуль з розташованим на ньому обладнанням і кріслом утворює пост машиніста. Лівий модуль пульта з обладнанням і кріслом утворює пост помічника машиніста.

Також на рис. 1.10 зображені такі елементи: 13 – холості приймачі; 16 – перетворювач частоти; 17 – блок ПП; 18 – блок мікропроцесорної системи управління; 21 – згладжувальні реактори; 25 – заземлювальна штанга; 27 – блок пневматичного обладнання; 32, 42 – конденсатори; 33 – блок комутації; 34 – санвузол; 35, 45 – додаткові резистори; 36 – панель конденсаторів; 39, 41 – блоки апаратів; 43 – панель апаратів; 44 – запобіжники; 47 – фільтри; 49 – блок ОПТРОН; 50 – блок № 1; 52 – блок фільтра; 63 – блок діагностики; 64 – блок відцентрового вентилятора; 65 – блок № 2; 66 – індуктивні шунти; 67 – автотрансформатор; 68 – блок комутації; 69 – блок № 4.

1.1.11. Електровози 2ЕС5К

Двосекційний електровоз 2ЕС5К (рис. 1.11) може працювати за системою багатьох одиниць (СБО) у складі трьох або чотирьох (2ЕС5К×2) головних (з кабінами управління) секцій.

Кожна головна секція електровоза має кабіну управління, виконану з пластикової або металевої оболонки. Вікна кабіни (лобове і чотири бічних) забезпечують машиністу та помічнику, що сидять за правим і лівим блоками пультів, огляд колійних сигналів.

Над лобовим і бічними вікнами встановлені сонцезахисні штори. Опускні вікна, розташовані на бічних стінках, дозволяють вести огляд рухомого складу з відкритого вікна. Органи управління і візуального контролю зосереджені у двох робочих місцях: правому й лівому блоках.

До складу робочих місць машиніста і помічника входять: пульт управління, крісла машиніста і помічника.

У кожній кабіні машиніста встановлено: блок живлення підсвічування, динамік, панель діодів, блок реєстрації, свисток електропневматичний, калорифери, блок сигналізації,

вогнегасник, прилад приймально-контрольний пожежний, пристрій сигналізації та пуску, до шафи на поперечній стінці встановлено обладнання радіостанції.

Обігрів кабіни здійснюється двома електрокалориферами потужністю 2,25 кВт кожен. Калорифери розташовані так, щоб забезпечувався рівномірний розподіл температури в кабіні, підігріте повітря подається до ніг машиніста та помічника і вздовж бічних стін.

Пристрої опалення мають як ручне, так і автоматичне регулювання температури.

Лобові та два бокових глухих вікна обладнані електронагрівальними елементами, що оберігають скло від обмерзання. В кабіні електровоза передбачена система кондиціонування, до складу якої входить термоелектричний кондиціонер 1 і система повітророзподілу.

Обладнання на електровозі розміщено на двох однотипних (з кабінами управління) секціях. На кожній секції обладнання встановлено на даху, в кузові та під кузовом.

Дах секції має сім герметично закритих кришками прорізів, призначених для монтажу і демонтажу обладнання, що встановлюється в кузові. На даху встановлено високовольтне обладнання кола струмоприймача на напругу 25 кВ, радіоантени КВ і УКВ діапазонів, а також головні резервуари 17 пневмосистеми зі змійовиком охолодження, дефлектори вентиляційної системи і люк на дах.

У верхній частині кабіни, в прожекторній коробці, розташованій уздовж подовжньої осі електровоза, встановлений прожектор. Праворуч і ліворуч від прожекторної коробки на каркасах встановлені блоки охолодження (правий і лівий) термоелектричного кондиціонера. З метою забезпечення промислового дизайну охолоджувальні блоки кондиціонера закриті знімними капотами. Електричний зв'язок струмоприймача з апаратами здійснюється за допомогою гнучких мідних шунтів і сталевих шин трубчастого перетину, встановлених на ізоляторах. Контактні поверхні шин луджені. Для компенсації теплового розширення в ланцюзі сталевих шин передбачені гнучкі мідні шунти. Міжсекційне з'єднання шин виконано за допомогою двох гнучких мідних шунтів.

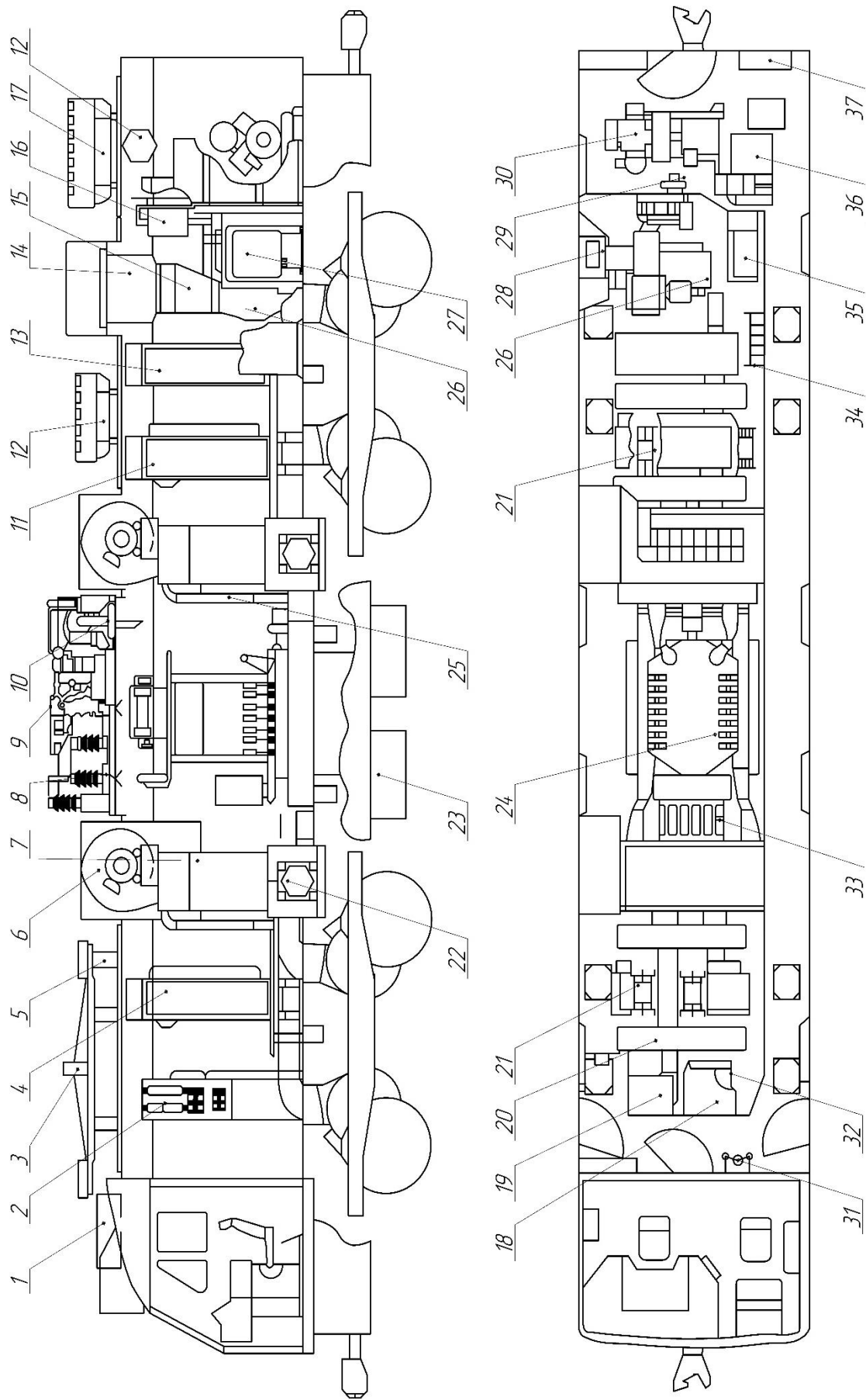


Рис. 1.11. Розташування обладнання на електровозі 2ЕС5К

Вимикач ВВВ-25, роз'єднувачі 8, головний ввід 10 з трансформатором струму встановлені на ущільнювальних прокладках з промазуванням сполучених поверхонь.

Всі знімні кришки монтажних люків, на яких встановлені апарати, заземлені на кузов мідними шинами.

Установлення обладнання на даху дозволяє здійснювати з'єднання секцій електровоза для роботи за системою багатьох одиниць (СБО).

У кузові секції основне обладнання встановлено в високовольтній камері (ВВК). ВВК має суцільні (по торцях) і сітчасті (уздовж прохідного коридору) огорожі. Доступ у ВВК для обслуговування обладнання здійснюється через сім розсувних сітчастих штор, які блокуються в закритому положенні перед подачею високої напруги на електровоз (від контактного проводу або від мережі депо).

Розташування обладнання в кузові – змішане, тобто частина його встановлена вздовж подовжньої осі електровоза (тяговий трансформатор 24, індуктивні шунти 21, блок пневматичного обладнання 36), а частина – поперек (блоки силових агрегатів 2, 13, 35, випрямно-інверторні перетворювачі 7, блоки відцентрових вентиляторів 26, блок мотор-компресора 30). Деякі блоки і апарати розміщені на стінках кузова, на поперечній стінці кабіни, на торцевих стінках ВВК і на щитах стелі. Таке розташування обумовлено найбільш раціональним використанням кузовного простору, умовами розвішування, а також зручністю монтажу та обслуговування. Майже все обладнання в кузові має блокову компоновку, що спрощує монтаж і скорочує монтажні комунікації. Між блоками передбачені проходи для обслуговування і ремонту.

На кришках дахових люків у ВВК встановлені генератори системи пожежогасіння і лампочки освітлення.

У прохідному коридорі, на лівій стінці кузова встановлені: панелі з вимикачами ламп освітлення коридору; штанга для вимкнення роз'єднувачів; штанга для заземлення головного введення; ящик для інструменту (встановлюється тільки на одну секцію); бак санвузла (тільки на дві секції); гнізда для установлення чотирьох гальмових башмаків. Санітарний вузол 37 встановлений в прохідному коридорі 2-ї секції (навпроти

трансформаторного приміщення). У торцевій частині кожної секції встановлені по три вуглекислотних вогнегасники ОУ-3 (два на правій стінці і один на торцевій).

Під кузовом кожної секції встановлено таке обладнання: акумуляторна батарея 23, розміщена у двох ящиках; світильники, рівномірно розподілені уздовж рами кузова над кожною колісною парою з двох боків, для освітлення ходових частин; по дві розетки з кожного боку кузова для підключення переносної лампи; приймальні котушки локомотивної сигналізації; антена.

На торцевій стінці кузова секції зовні встановлені чотири розетки для подачі напруги від мережі депо: на допоміжні машини, на тягові двигуни, на коло управління і розетка для подачі низької напруги на вентиль контактора депо.

Все основне електрообладнання розміщене в блоках і на панелях.

У блоках № 1, 2, 3, 7, 8, 10 змонтована комутаційна апаратура допоміжних кіл, кіл управління електровоза, а також захисна апаратура. У блоці № 9 встановлені роз'єднувачі, лічильник електричної енергії, реле перевантаження, проміжні реле, панелі апаратів. У блоках силових агрегатів (БСА) встановлена силова і комутаційна апаратура кіл тягових двигунів.

На блоці тягового трансформатора встановлені роз'єднувачі випрямно-інверторних перетворювачів (ВІП) і апарати для захисту обмоток трансформатора від струмових перевантажень і від перенапруг.

Апарати у всіх блоках встановлені на каркасах. Блоки мають закінчений провідний і шинний монтаж.

Також на рис. 1.11 зображені такі елементи: 3 – струмоприймач; 4 – блок силових апаратів № 1; 5 – дросель; 6 – блок центробіжного вентилятора; 9 – головний вимикач; 11 – блок силових апаратів № 2; 12 – резервуар; 14 – блок резисторів; 15 – патрубок; 16 – випрямна установка збудження; 18 – блок живлення кондиціонера; 19 – шафа МСУД; 20 – блоки з комплектів КЛУБ і САУТ; 22 – реактор згладжувальний; 25 – труба пиловідвідна; 27 – блок ПЧФ; 28 – блок діодів; 29 – перемикач блокувальний; 31 – колонка ручного гальма; 32 – шафа живлення; 33 – конденсатор; 34 – блок низьковольтних апаратів.

1.1.12. Електровози 2ЕС10

Комплект обладнання кожної секції електровоза 2ЕС10 ідентичний. Устаткування розташоване на даху, в кузовній частині і під кузовом електровоза. Компонування обладнання забезпечує свободу доступу обслуговуючого персоналу для огляду, ремонту, монтажу та демонтажу агрегатів і вузлів, а також дотримання заходів безпеки та виробничої санітарії.

Зовнішній вигляд і розміщення обладнання в секції показано на рис. 1.12. На ізоляторах встановлюється таке електричне обладнання: струмоприймач 3, дросель перешкодозаглушувального фільтра 4, заземлювач 6, прохідний ізолятор для введення високовольтного силового проводу в кузов секції, струмоведуча високовольтна шина 12 для з'єднання силових кіл з іншими секціями, антена радіозв'язку 13.

Дахове обладнання також розміщено в знімних секціях даху:

- всередині першої знімної секції розміщена форкамера 5 для системи охолодження тягових двигунів першого візка. Забір повітря здійснюється через спеціальні жалюзі 8, конструкція яких забезпечує фільтрацію повітря;

- всередині другої знімної секції даху розміщені два блоки гальмівних резисторів першого візка і два мотор-вентилятори 7 для їх повітряного охолодження;

- третя знімна секція 9 за своєю конструкцією аналогічна другій знімній секції, а четверта знімна секція 10 – першій.

Всі стики знімних секцій даху мають ущільнення, які виключають проникнення води всередину кузова.

Для технічного обслуговування дахового обладнання передбачений люк на дах 69 і настили 14. У кабіні машиніста 1 встановлено таке обладнання: пульт управління машиніста 39, два крісла машиніста 40 і відкидне сидіння для інструктора-машиніста 41, маневровий пульт управління 42, обладнання мікроклімату кабіни 2, омивач лобового скла 56, санітарно-побутові пристрої 57, що включають в себе шафи, піч СВЧ, холодильник.

На лобовій частині кабіни розташовані: прожектор 32, буферні ліхтарі 35 червоного і білого кольору, склоочисники 33 і регульовані дзеркала заднього виду 34.

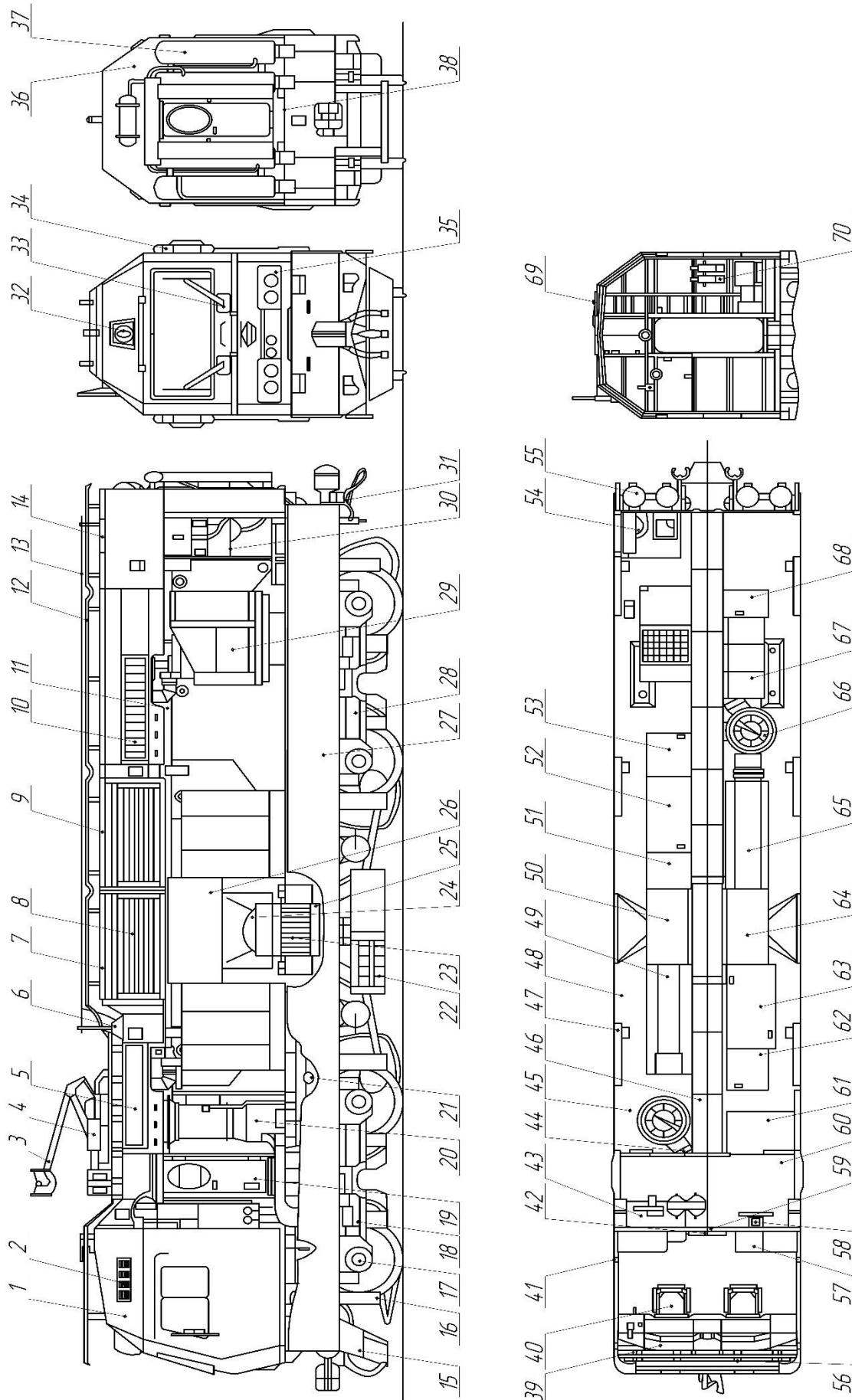


Рис. 1.12. Розташування обладнання на електровозі 2ЭС10

Поперечний тамбур 60 має зовнішні двері з обох боків кузова 19, і двері в кабінку машиніста 59 і машинне відділення 45. У тамбурі встановлений модуль комплексу гальмівного обладнання, у верхній частині якого знаходяться запасний і зрівняльний резервуари 43. У тамбурі також встановлений привод ручного гальма стоянки 58.

Машинне відділення 45 виконано з наскрізним центральним проходом, під настилом якого знаходиться монтажний канал 46 для електричних кабелів силових кіл і допоміжного обладнання. Біля бічних стін кузова розміщені канали для проводів кіл управління і низьковольтних кіл 48.

У машинному відділенні розміщені модулі охолодження тягових електродвигунів: першого візка 20 та другого візка 66, які являють собою осьовий вентилятор з асинхронним двигуном, об'єднаний в один корпус з дифузором і розподільною коробкою.

У центрі машинного відділення під настилом центрального проходу розміщений дросель вхідного фільтра 23. З боків розміщена система охолодження дроселя, з двома осьовими вентиляторами 24. Забір повітря здійснюється через постійно відкриті захисні жалюзі 26 на бічних стінах кузова, вихід повітря під дроселем, через отвори в рамі кузова 25.

В кінці машинного відділення розташовані: модуль компресорного агрегату 29, допоміжний компресор і повітряний резервуар кіл управління, повітряний вентилятор 11 для створення надлишкового тиску в кузові. Електричне обладнання в машинному відділенні скомпоновано в шафах, які встановлені по обидва боки від проходу:

- шафа низьковольтної апаратури – ШНА 30, із встановленим обладнанням: комплексною системою безпеки, мікропроцесорною системою управління МПСУ і низьковольтними апаратами;

- шафа швидкодіючого вимикача і реле диференційного захисту – ШШВ 49. Тягові перетворювачі скомпоновані у двох шафах: ТП1 призначений для живлення тягових двигунів першого візка, ТП2 65 – для другого візка;

- шафи інверторів для живлення двигунів вентиляторів охолодження гальмівних резисторів – ШІ1 50 і ШІ2 64;

- шафи перемикачів тягових двигунів: першого візка ШП1 62, другого візка ШП2 53;

- шафа високовольтних конденсаторів – ШК 51 для вхідного згладжувального фільтра;

- шафа високовольтних апаратів – силових контакторів – ШСК 52;

- шафа перетворювача власних потреб ПВП 67;

- шафа допоміжних апаратів – ШДА 68.

У машинному відділенні також встановлено сантехнічне обладнання: біотуалет та умивальник 54.

По бічних стінках машинного відділення встановлені світильники освітлення, пристрої системи пожежогасіння, і повітропроводи з пневматичними клапанами і роз'єднувальними кранами 47.

Зовні, на торцевій частині кузова 36 зліва і справа від перехідного майданчика розміщені головні повітряні резервуари 37 з продувними клапанами і роз'єднувальними кранами.

Під кузовом електровоза встановлено механічне обладнання 15 і обладнання двовісних візків 17, а також гальмівне і пневматичне обладнання 18.

Під кузовом електровоза встановлено таке електричне обладнання: приймальні котушки локомотивної сигналізації 16, положення яких може регулюватися за висотою щодо головок рейок, тифон і свисток, світильники освітлення ходових частин 21, акумуляторна батарея 22, скомпонована в два ящики, чотири тягових асинхронних двигуни 28, міжкузовне з'єднання 31.

Також на рис. 1.12 зображені такі елементи: 27 – модуль охолодження тягових двигунів; 38 – струмоведучий пристрій; 55 – канали низьковольтних кіл; 61 – шафа низьковольтної апаратури; 63 – шафа діагностики; 70 – вогнегасник.

1.1.13. Електровози ДЕ1

Локомотив містить дві однакові секції, з'єднані між собою автозчепленням. Зовнішній вигляд і розміщення обладнання в секції показано на рис. 1.13. Кузов кожної секції спирається на два двовісних візки. Кузов суцільнометалевий, виготовлений з

низьколегованої сталі. Рама кузова охоплюючого типу виконана з двох боковин, які об'єднані в одну конструкцію буферними брусами і балками коробчатого перетину.

Щоб поліпшити компоновання обладнання, верхня частина рами з боку заднього буферного бруса має надбудову розміром 220 мм. Бічні стінки являють собою каркас з гнутих профілів, обшитих гофрованим листом товщиною 2 мм. Лобова стінка кузова містить гнуті профілі і обшита плоским листом товщиною 3 мм.

Дах кабіни має обтічну форму і зварюванням жорстко з'єднаний з бічними і лобовими стінками. Дахи кузова – знімні, виконані з гнутих профілів, які зовні обшиті листом товщиною 2 мм. Лобові стекла кабіни машиніста виготовлені з багатошарового скла підвищеної міцності товщиною 15 мм. В обшивці кабіни машиніста застосований негорючий тепло- і звукоізоляційний матеріал.

На електровозі ДЕ1 з кожного боку кузова встановлені автозчеплення типу СА-3. Вони забезпечені пружинно-фрикційними поглинальними апаратами типу ПМК 110К-23.

Двовісний безшворневий візок оснащений індивідуальним тяговим приводом на кожен вісь з опорно-осьовим підвішуванням електродвигуна, гальмовою важільною передачею з використанням двох гальмових циліндрів на візок. Букси колісних пар пов'язані пружними гумометалевими повідками. На електровозі встановлені уніфіковані збірні колісні пари з одноступінчастою двосторонньою циліндричною косозубою передачею, що має на колесах 88 зубів. При цьому число зубів малих шестерень тягових редукторів – 23 (передавальне відношення зубчастого редуктора 3,826).

Ресорне підвішування локомотива, як надбуксове, так і центральне (другий ступінь), також має свої особливості. Надбуксове ресорне підвішування забезпечує опору рами візка на кожен буксу через два пакети циліндричних пружин, розташованих по кінцях балансира, який в середині підвішується шарнірно.

Щоб поліпшити динамічні характеристики екіпажної частини, на електровозі застосована нова конструкція колискового підвішування кузова зі статичним прогином 120 мм.

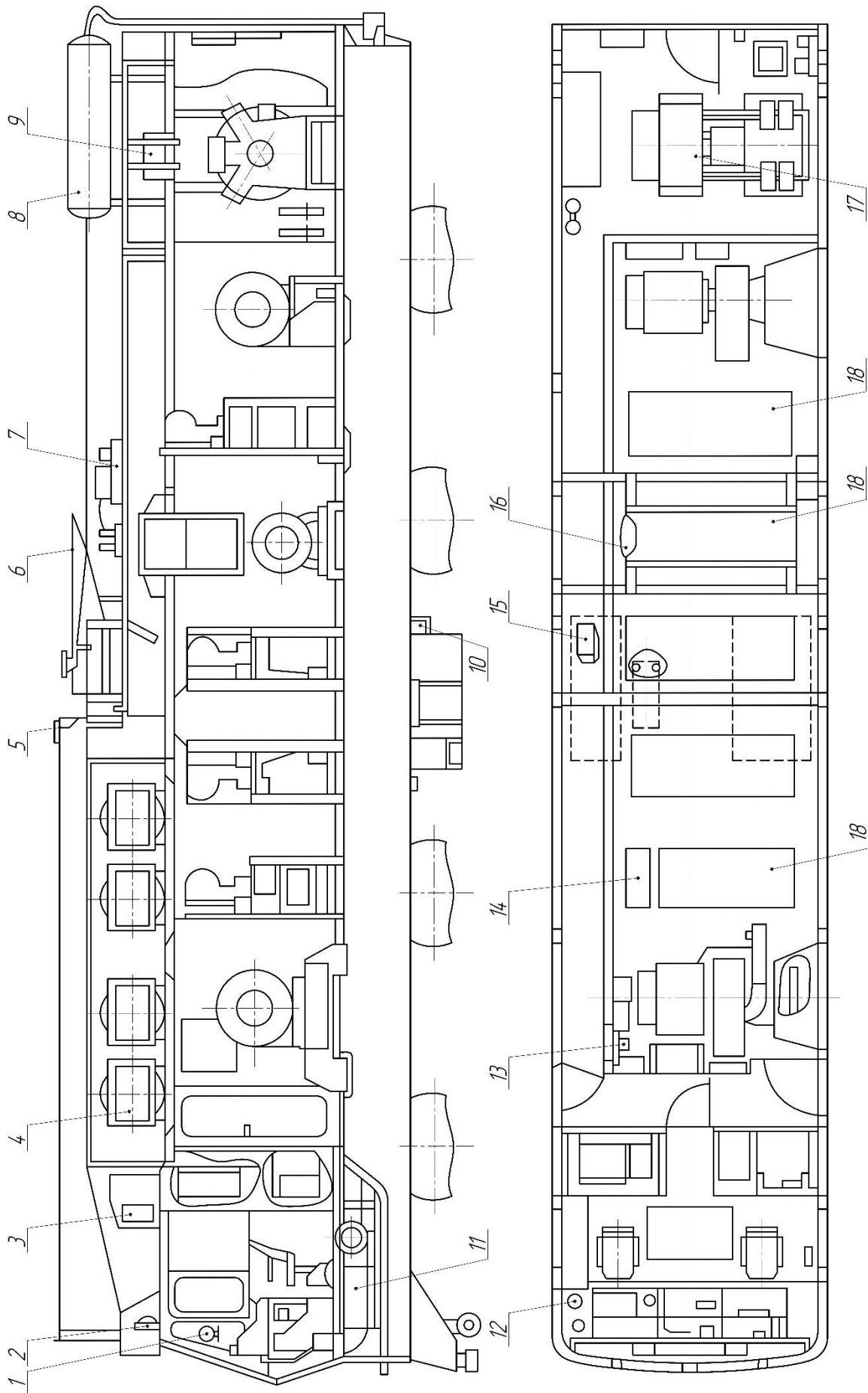


Рис. 1.13. Розташування обладнання на електровозі ДЕ1

Кузов з кожного боку візка з'єднаний двома похилими колісковими підвісками з проміжною балкою, яка спирається через комплекти дворядних циліндричних пружин на боковину рами візка. Кожна проміжна балка в поперечному напрямку через сферичний шарнір з'єднана із середнім брусом рами візка, а в подовжньому напрямку – шарнірно з двома тягами, які за допомогою гумових шайб взаємодіють з боковинами рами візка.

Пневматичне та автогальмове обладнання електровоза ДЕ1 типове, що застосовується для всього локомотивного парку.

Особливість пневматичної системи електровоза ДЕ1 – система осушення стисненого повітря за допомогою жалюзійних сепараторів вологи, які розміщені в головних резервуарах 8. У поєднанні з попереднім охолодженням повітря за допомогою змійовика, встановленого перед головними резервуарами, жалюзійні сепаратори забезпечують зниження температури стисненого повітря на виході з другого головного резервуара практично до температури навколишнього середовища.

Гальмові циліндри кожного візка при дії автоматичного або допоміжного гальма наповнюються через реле тиску № 404. Запас стисненого повітря на гальмування електровоза в разі роз'єднання міжсекційних рукавів забезпечує спеціальний резервуар.

Управління автоматичними гальмами здійснюється краном машиніста № 395 12 і краном допоміжного гальма № 254. Для забезпечення автоматичних гальм і допоміжного обладнання стисненим повітрям на кожній секції електровоза встановлено по одному компресору 17 з електроприводом. Щоб підняти струмоприймачі, використовують допоміжні компресорні установки 9, розміщені на кожній секції з приводом від акумуляторної батареї 15.

У схемі ДЕ1 використані основні технічні рішення для тягового приводу і основного допоміжного обладнання (електродвигуна вентиляторів, перетворювачів, компресорів, електропечей та ін.), відпрацьовані на електровозах ВЛ10 і ЧС7.

На двох секціях електровоза встановлено вісім тягових електродвигунів (ТЕД) типу ЕД-141У1. На електровозі ДЕ1 замість одного швидкодіючого вимикача з електропневматичним приводом застосовано чотири типи ВА-45-39 з електромагнітним

приводом, які захищають кола двох послідовно з'єднаних тягових двигунів.

Управління електровозом здійснюється із застосуванням бортових мікропроцесорних систем управління тяговим електроприводом (СУТЕП) і діагностики (МСД). Система СУТЕП забезпечує ручне та автоматичне керування процесом перемикання позицій контролера машиніста для регулювання швидкості в тяговому режимі. Вона містить комплект відповідної апаратури, що працює за заданим алгоритмом. Система автоматично управляє режимами електричного гальмування, захистом тягових двигунів, а також забезпечує обмін інформацією між СУТЕП кожної із секцій електровоза.

Для електричного живлення кіл управління електровозом, допоміжних кіл і кіл освітлення напругою 50 В служить акумуляторна батарея.

Електровоз обладнаний радіостанцією 5, конструктивно виконаною на мікропроцесорних елементах і розрахованою на роботу в КВ і УКВ-діапазонах.

Також на рис. 1.13 зображені такі елементи: 1 – швидкостемір; 2 – прожектор; 3 – кондиціонер; 4 – блок пускогальмівних резисторів; 6 – струмоприймач; 7 – розрядник; 10 – розетка вводу; 11 – калорифер; 13 – заземлювач; 14 – швидкодіючий вимикач; 16 – електромашинний перетворювач; 18 – блоки силових апаратів.

Питання для самоконтролю

1. Яких загальних вимог слід дотримуватися при розташуванні електричного обладнання на електровозах?

2. Які існують схеми розташування обладнання в кузовах електровозів серії ВЛ?

3. Охарактеризуйте загальні принципи розташування електричного обладнання на електровозах змінного струму.

4. На що звертають основну увагу при розташуванні апаратури в кабінах машиніста?

5. Охарактеризуйте розміщення електричного обладнання на електровозі ВЛ11.

6. Охарактеризуйте розміщення електричного обладнання на електровозі ВЛ60.

7. Охарактеризуйте розміщення електричного обладнання на електровозі ВЛ80.

8. Охарактеризуйте розміщення електричного обладнання на електровозі ВЛ82.

9. Охарактеризуйте розміщення електричного обладнання на електровозі ВЛ85.

10. Охарактеризуйте розміщення електричного обладнання на електровозі ЧС4.

11. Охарактеризуйте розміщення електричного обладнання на електровозі ЧС7.

12. Охарактеризуйте розміщення електричного обладнання на електровозі ЧС8.

13. Охарактеризуйте розміщення електричного обладнання на електровозі ЕП1.

14. Охарактеризуйте розміщення електричного обладнання на електровозі 2ЕС5К.

15. Охарактеризуйте розміщення електричного обладнання на електровозі 2ЕС10.

16. Охарактеризуйте розміщення електричного обладнання на електровозі ДЕ1.

1.2. РОЗТАШУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ НА ЕЛЕКТРОПОЇЗДАХ

1.2.1. Загальні положення

Крім загальних вимог, розташування електричного обладнання на електропоїздах повинне забезпечувати таке: якнайповніше і максимальне використання площі кузовів вагонів для пасажирів, оптимальні умови освітлення, опалювання і вентиляції. Основну частину електроустаткування розміщують в підвагонних камерах, підвішених до рам кузовів, на візках і на дахах кузовів. Тільки невелику частину апаратури розташовують в шафах, встановлених в тамбурах вагонів.

Підвагонні камери електропоїздів є зварною конструкцією із знімними кришками, які забезпечені подвійним ущільненням з губчастої гуми. Далі як приклади розглянемо розташування електрообладнання на електропоїздах постійного струму EP2^P, ET2^T і змінного струму EP9^E.

1.2.2. Вагони електропоїздів EP2^P і EP2^T

На рамі під кузовом головного вагона (рис. 1.14, *a*) підвішені акумуляторна батарея 12, мотор-компресор 5, перетворювач (двомашинний агрегат) 17, ящик 16 з контакторами допоміжних кіл, електроповітророзподільник 14, повітророзподільник 15, повітряні резервуари – два головних 19 по 170 л кожен, три резервуари 6 по 78 л, один зрівняльний 2 на 20 л і один допоміжний 13 на 12 л, блок пускових резисторів 11 і перетворювач.

На рамах візків встановлені гальмові циліндри 3, а під кузовом на рамі – фільтри 4 для очищення повітря, що засмоктується компресором, два масловіддільники 18, обігрівач зливної труби 20, два свистки 1, два тифони 21, сміттєзбірник 9, з лівого і правого боку – розетки 7 деповського живлення, а також вакуумні патрубки 10 і патрубки 8 водопостачання, використовувані при механізованому прибиранні вагона електропоїзда.

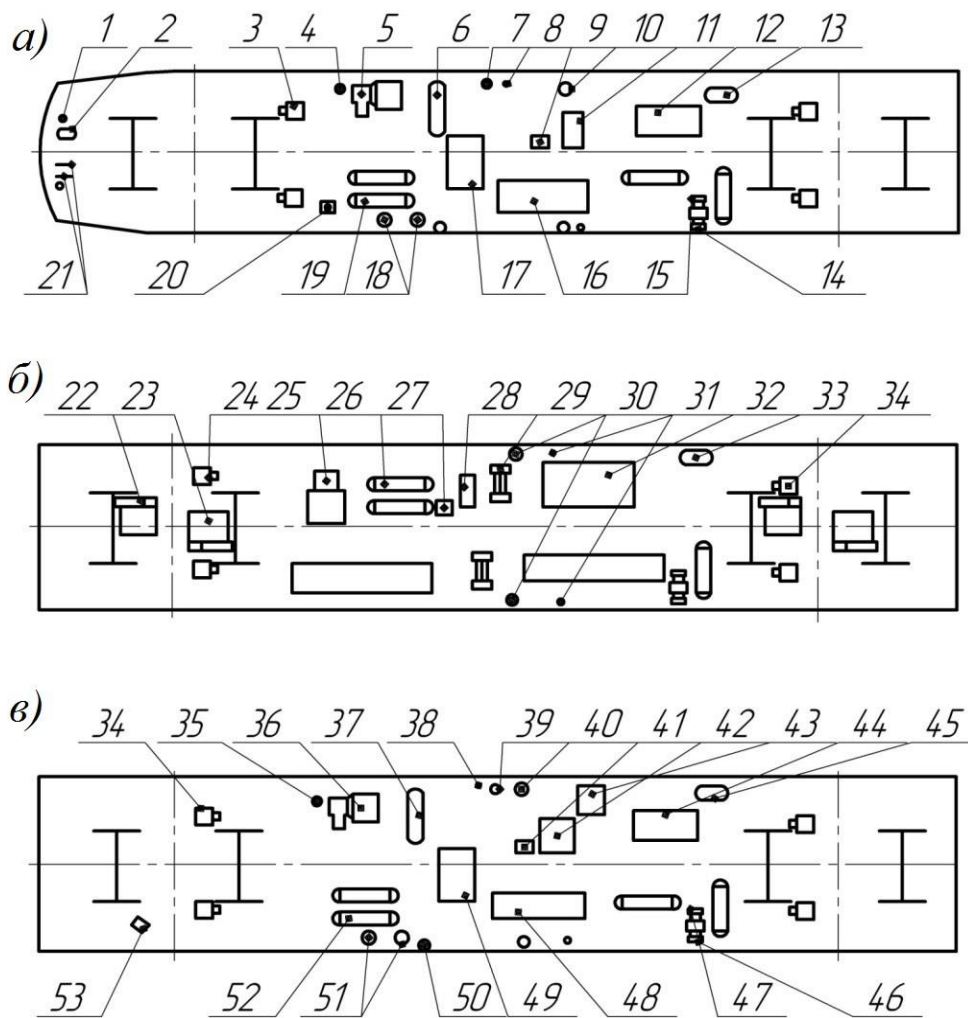


Рис. 1.14. Розташування обладнання під кузовом і в шафах головного (а), моторного (б) і причіпного (в) вагонів електропоїзда EP2^P

У кабіні машиніста змонтований пульт з апаратами керування, сигналізації і радіозв'язку, вимірювальними приладами. Частина з них розміщена на задній стінці kabіни. Пульт виконаний у вигляді окремих знімних блоків. У лівій його частині біля місця помічника машиніста встановлений маховик ручного гальма (рис. 1.14, а). У пульті передбачені відсіки для аптечки і технічної документації, під ним на підлозі перед кріслом машиніста встановлена педаль для дії на клапан тифона і свистка. Така сама педаль є і біля місця помічника В правій частині kabіни на задній стінці розташований блок з вимикачами кіл допоміжних потреб.

У шафі № 1 розміщені електропневматичний клапан автостопа, кран подвійної тяги, вентиль заміщення

електропневматичного гальмування пневматичним, два «роз'єднувальних» крани, фільтр, штепсельні рознімачі та ін. У шафі № 2 встановлений блок з апаратурою керування поїздом, вентиляцією і електропневматичним гальмуванням; у шафі № 3 – підсилювач і пристрій живлення, приймач і блок живлення з комплекту радіостанції, блоки живлення, керування і реєстрації з комплекту швидкостеміра; в шафі № 4 – дешифратор і підсилювач з апаратури локомотивної сигналізації; в шафі № 5 – блок з апаратурою керування освітленням, опалюванням і вентиляцією; у шафі № 6 – блок з амперметром і вольтметром заряджання батареї і регуляторами напруги і частоти перетворювача; в шафі № 7 – блок з апаратурою керування і перемикачем кола зарядження батареї, трансформатор кола керування зарядженням батареї і живлення кіл 110 В.

Поряд із шафою № 1 змонтований електрокалорифер для обігріву кабіни. Зліва від дверей кабіни знаходиться шафа для одягу, що відкривається з боку тамбура, а над ним – шафка для термосів і продуктів, що відкривається всередину кабіни. На каркасах шафи № 1 і шафи для одягу біля зовнішніх дверей встановлені блоки з вимикачами дверей, кнопками звукової сигналізації і лампами сигналізації закритого положення дверей; поряд розміщені пульти сповіщення системи ТОН. На даху вагона встановлені антена і резистор кола прожектора.

Під кузовом моторного вагона розміщено все електричне і пневматичне устаткування (рис. 1.14, б), по два тягові двигуни 22, 23 і два гальмові циліндри 24, 34 на кожному візку, ящик 32 (ІЯК.013) з силовими контакторами, ящик з контакторами опалювання і реверсивно-гальмівним перемикачем, ящик з реостатним контролером, головним роз'єднувачем і повторювачем силових контакторів, автоматичний швидкодіючий вимикач 25, індуктивний шунт 28, блок 29 шунтувальних резисторів, блок резисторів ослаблення збудження, електророзподільник повітря, розподільник повітря, повітряні резервуари 26 по 78 л і 33 на 12 л, а також сміттєзбірник 27. З лівого та правого боку розташовані вакуумні патрубки 30 і патрубки 31 водопостачання, використовувані при механізованому прибиранні вагона. У лобовій і торцевій шафах розташовані блоки з апаратурою для пуску допоміжного

компресора, вимикачі, допоміжний компресор і масловіддільник з апаратурою керування гальмуванням; розміщені амперметри для вимірювання тягового струму і струму реостатного гальмування і вольтметр для вимірювання напруги тягових двигунів, амперметр для вимірювання струму тягових двигунів у режимі тяги і рекуперації, лічильник, шунти і додаткові резистори, колонка ручного гальма. На даху розташовані струмоприймач, два розрядники РМВУ-3,3, конденсаторний і індуктивний фільтри радіоперешкод і 16 блоків пуско-гальмівних резисторів. Розрядники і фільтри встановлені на загальній рамі, яку кріплять до даху на амортизаторах, розрядники мають огорожі, які у разі їх руйнування не дозволяють розлетітися осколкам. Дроти для з'єднання струмоприймачів при їх паралельній роботі прокладені в трубі уздовж даху; перемичку міжвагонного з'єднання, що забезпечує паралельну роботу струмоприймачів, кріплять болтами до кронштейнів по кінцях даху. Дроти від пускогальмівних резисторів проходять по жолобу на горище. Сходи для піднімання на дах розташовані на лобовій стіні і мають електричне блокування безпеки.

Під кузовом причіпного вагона (рис. 1.14, в) розміщені акумуляторна батарея 44, перетворювач 49, мотор-компресор 36, ящик 48 з контакторами високовольтних допоміжних кіл, блок 42 демпферних резисторів, електроповітророзподільник 46, повітророзподільник 47, по два гальмові циліндри 34 на візку, два головні резервуари 52 по 170 л, три резервуари 37 по 78 л, резервуар 45 на 12 л, два масловіддільники 51, обігрівач зливної труби 53, сміттєзбірник 41, фільтр 35 і ящик для колодок 43. З лівого і правого боку розташовані розетки 38, 50 деповського живлення, вакуумні патрубки 40 і патрубки 39 водопостачань.

1.2.3. Вагони електропоїздів ЕР9^Е

На рамі під кузовом головного вагона (рис. 1.15, а) підвішені: повітряні резервуари – один зрівняльний 1 на 20 л, два головних 8 по 170 л, один запасний 9 на 78 л, трансформатор 2, реактор (дросель) 3, акумуляторна батарея 4, мотор-компресор 5, фільтр 6, масловіддільник 7, електроповітророзподільник 10,

повітророзподільник 11, гальмовий циліндр 12, сміттєзбірник 13 і обігрівач 14 зливної труби туалету. В кабіні машиніста розташований пульт з апаратами керування, сигналізації і радіозв'язку, вимірювальними приладами.

Пульт, як і на вагоні електропоїзда ЕР2^Р, виконаний у вигляді окремих знімних блоків. У шафі № 1 розміщені електропневматичний клапан автостопа, кран подвійної тяги, вентиль заміщення електропневматичного гальмування пневматичним, електричний дзвоник і штепсельні рознімачі; у шафі № 2 – блок з апаратурою акумуляторної батареї і живлення кіл керування; у шафі № 3 – блоки з комплекту радіостанції, підсилювач, пристрій перехідний і пристрій живлення з комплекту апаратури сповіщення ТОН; у шафі № 4 – панель з апаратурою електропневматичного гальма; у шафі № 5 – апаратура локомотивної сигналізації; у шафі № 6 – блок з апаратурою освітлення, вентиляції і компресор; у шафі № 7 – панель ІПА.383 з контакторами кіл опалювання салону.

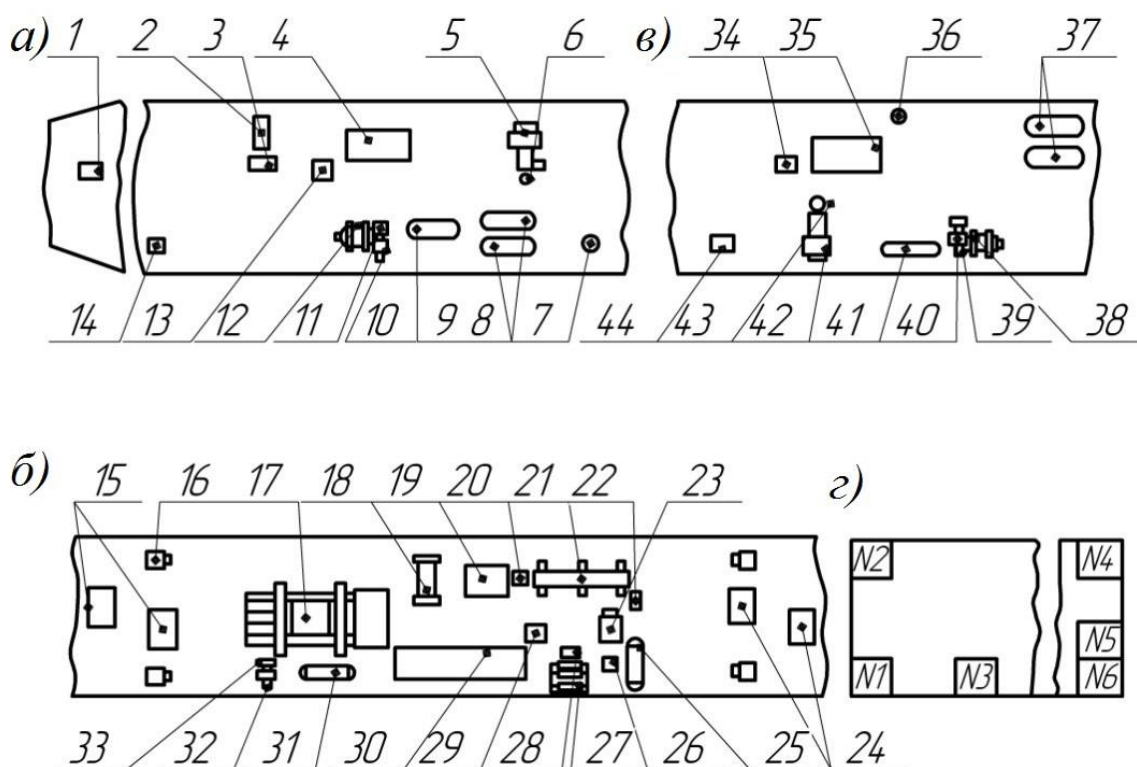


Рис. 1.15. Розташування обладнання під кузовом і в шафах головного (а), моторного (б і з) і причіпного (в) вагонів електропоїзда ЕР9^Е

Поряд з шафою № 1 встановлений електрокалорифер для обігріву кабіни. Зліва від дверей кабіни знаходиться шафа для одягу, а над ним – шафка для термосів і продуктів. На каркасах шафи № 1 і шафи для одягу біля зовнішніх дверей встановлені блоки з вимикачами дверей, кнопками звукової сигналізації і лампами сигналізації закритого положення дверей, поряд розміщені пульти сповіщення системи ТОН. Блоки з'єднуються з колами вагона штепсельними рознімачами. На даху вагона встановлені антена і резистори прожектора.

Під кузовом моторного вагона на візках встановлені тягові двигуни 15 і 24 (рис. 1.15, б) і гальмові циліндри 16, на рамі кузова – тяговий трансформатор 17 з вбудованим реактором, випрямляч 21, охолоджувач масла 18, ящик 19 з контакторами і трансформаторами струму, ящик 20 з розрядником, резистор 22 розщеплювача фаз 23, повітряні резервуари 25 і 31, реле тиску 26, резистори 27 і 28, сміттєзбірник 29, камера 30 з апаратурою, електроповітророзподільник 32 і повітророзподільник 33. У шафах (рис. 1.15, з) розташовані: № 1 – панель з апаратурою освітлення і вентиляції, допоміжний компресор з двигуном і регулятором тиску, два манометри, редуктор, клапан струмоприймача, перемикальні крани пневматичної мережі струмоприймача і повітряного вимикача; № 2 – блок з апаратурою керування; № 3 – прохідний трансформатор струму, верхня частина прохідного ізолятора і струмоведуча шина, що сполучає їх; № 4 – блок з апаратурою стабілізації напруги 220 В; № 5 – блок прискореного відключення вимикача, конденсаторний фільтр, амперметр кола тягових двигунів і лічильник витрати електроенергії; № 6 – планки із затискачами.

Через дверці шаф № 1, 2, 4 і 6 здійснюється доступ до проводів, відповідних розеткам і штепселям міжвагонних з'єднань кіл керування.

У тамбурах і в простінку між вікнами поряд з шафою з високовольтним вводом встановлено по одному стоп-крану.

На даху моторного вагона розташовані струмоприймач, розрядник, індуктивний фільтр радіоперешкод, повітряний вимикач, верхня половина трансформатора струму високовольтного вводу і опорні ізолятори з шинами для паралельного з'єднання струмоприймачів.

Під кузовом на рамі причіпного вагона (рис. 1.15, в) розташовані: сміттєзбірник 34, акумуляторна батарея 35, масловіддільник 36, головні повітряні резервуари 37 по 170 л кожен, гальмовий циліндр 38, електророзподільник повітря 39, розподільник повітря 40, запасний резервуар 41 на 78 л, мотор-компресор 42, фільтр 43 і обігрівач 44 зливної труби. У шафах, як і на моторному вагоні, встановлені блоки з апаратурою керування, освітлення, вентиляції, опалювання. У торцевій шафі № 4 розміщені маховик ручного гальма і планки із затискачами, на даху – опорні ізолятори з шинами для паралельного з'єднання струмоприймачів.

1.2.4. Вагони електропоїздів EP200

Розташування обладнання електропоїзда EP200 подано на рис. 1.16. У головному вагоні в шафі № 1 3, яка розташована в кабіні машиніста 2, розміщені блоки управління, реєстрації та живлення швидкостеміра, а також панель з запобіжниками. Шафа № 2 16 призначена для одягу локомотивної бригади. У шафі № 3 17 службового тамбура розміщена апаратура АЛС-200, в шафі № 4 4 – блоки радіостанції ЖР-ЗМ, управління інформаційною системою і панель з проміжним підсилювачем між системами автомашиніста і автоматичного регулювання. В середній шафі № 5 6 розміщені стояк і водно-релейний щит системи автомашиніста. Там же є блок з електроапаратурою управління вентиляцією, освітленням і магнітно-рейковим гальмом, а також щит приладів кондиціонера 5.

У приміщенні провідника вагона Г знаходиться стіл з апаратурою радіотрансляції, в комплект якої входить також магнітофон. У шафі № 6 8, розташованій в службовому відділенні, міститься протипожежний інвентар. У задньому тамбурі в шафі № 7 14 розташований блок з апаратурою управління компресором і машинним перетворювачем. У шафі № 8 заднього тамбура є блок з апаратурою регулювання частоти і напруги перетворювача, заряджання батарей і вимірювальними приладами. На даху вагона Г встановлені антени радіостанції ЖР-ЗМ і радіоприймачі системи радіотрансляції.

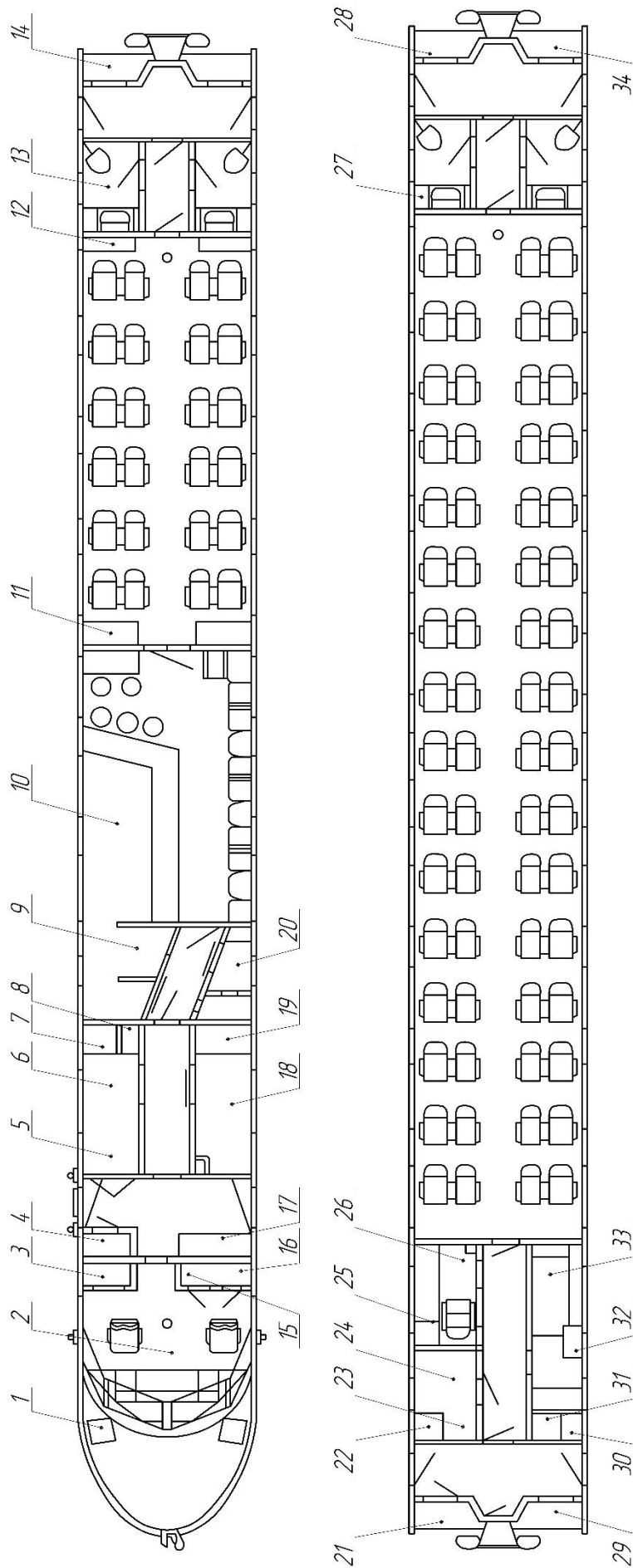


Рис. 1.16. Розташування обладнання головного та моторного вагонів
під кузовом і в шафах електропоїзда ЕР200

На даху вагона *M* встановлені струмоприймач, два розрядники, фільтр і дросель для заглушення радіоперешкод. У передній шафі № 1 25 встановлено блок з універсальним перемикачем для відключення несправного вагона та іншою електроапаратурою. У шафі № 2 29 переднього тамбура розташоване пневматичне обладнання (допоміжний компресор, триходовий кран, редуктор та ін.), а також є панель з електроапаратурою управління струмоприймачем.

В середній шафі № 3 24 розташований блок електроапаратури керування вентиляцією та кондиціонуванням повітря, освітленням, магнітно-рейковими гальмами. У цій же шафі є щит приладів кондиціонера, а також панель з апаратурою управління опаленням і водопостачанням туалетів. У шафі № 4 31, розташований поруч з купе провідника, знаходиться протипожежний інвентар. В приміщенні провідника є блок з електричною апаратурою управління і сигналізації вагона. Тут же є телефон, яким користується провідник для повідомлення машиністу електропоїзда про несправності в разі загоряння однієї з сигнальних ламп. Провідник може сам вмикати або відключати опалення туалетів, обігрів евакуаційного бака, освітлення і гучномовець свого приміщення. У шафі № 5 28 заднього тамбура встановлений блок з апаратурою системи автоматичного регулювання процесів тяги і електричного гальмування. У шафі № 6 34 заднього тамбура розміщені вимірювальні прилади (амперметри, вольтметри і лічильник) з шунтами та додатковими резисторами.

В кабіні машиніста головного вагона встановлені апарати управління, спостереження, сигналізації, радіозв'язку і телефонного зв'язку. Пульт управління кабіни машиніста складений з 11 окремих знімних блоків перемикачів, електро- і пневмовимірювальних приладів.

Під кузовом вагона *M* розміщені машинний перетворювач для перетворення постійного струму напругою 3000 В у трифазний змінний струм частотою 50 Гц і напругою 220 В, акумуляторна батарея секції, мотор-компресор, реле боксування, контактори опалення і перетворювача, блок резисторів для обмеження струму в обмотці якоря двигуна перетворювача при різких змінах напруги в контактній мережі.

Під кузовом вагона Г розміщена частина такого самого обладнання, що і під кузовом вагона М, а саме – машинний перетворювач з блоком струмообмежувальних резисторів, мотор-компресор, акумуляторна батарея, контактори опалення і перетворювача. Крім цього, під кузовом вагона Г розміщені приймальні котушки і індуктор АЛС-200; ящик з контакторами пуску, гальмування, електрообладнання буфета, опалення, вентилятора кабіни, екстреного опускання струмоприймача, а також реле контролю ЕПГ, увімкнення автомашиніста, екстреної зупинки та ін. Крім того, під кузовами всіх вагонів електропоїзда розташовані агрегати кондиціонерів (компресори, конденсатори та теплообмінні апарати), а також пневматичне та гальмівне обладнання. Апаратура опалення та водопостачання туалетів розміщена на вагонах Г і М під кузовами.

Також на рис. 1.16 зображені такі елементи: 1 – пісочниця; 7 – холодильник; 9 – відділення для миття посуду; 10 – приміщення буфету; 11, 12, 33 – гардероби для одягу; 13, 27 – санвузли; 15 – калорифер; 18, 26 – купе провідника; 19 – апаратура радіотрансляції; 20 – приміщення буфету; 21 – шафа № 1 з електроапаратурою; 22, 30 – пісочниці; 23 – апаратура кондиціонера; 32 – канали вентиляції електродвигунів.

1.2.5. Вагони електропоїздів ЕПЛ2Т

Розташування обладнання електропоїзда ЕПЛ2Т подано на рис. 1.17. Електропоїзд ЕПЛ2Т формується з двох головних вагонів, що розташовуються по кінцях поїзда, і проміжних (моторних і причіпних) вагонів. Системи опалення та вентиляції вагонів забезпечують можливість експлуатації електропоїзда при температурі навколишнього повітря від мінус 40 °С до плюс 40 °С.

Вагони мають комбінований вихід, що допускає їх експлуатацію на ділянках з високими і низькими платформами.

На електропоїзді застосована електропередача з ТЕД постійного струму. Електропоїзд обладнаний електричним, електропневматичним, пневматичним, ручним гальмами.

Візок моторного вагона двовісний з подвійним ресорним підвішуванням: буксовим безщелепним з фрикційними гасителями коливань і центральним колісковим підвішуванням з гідравлічними гасителями коливань. Тяговий привод має комбіноване підвішування (тяговий двигун – опорно-рамне; редуктор – опорно-осьове).

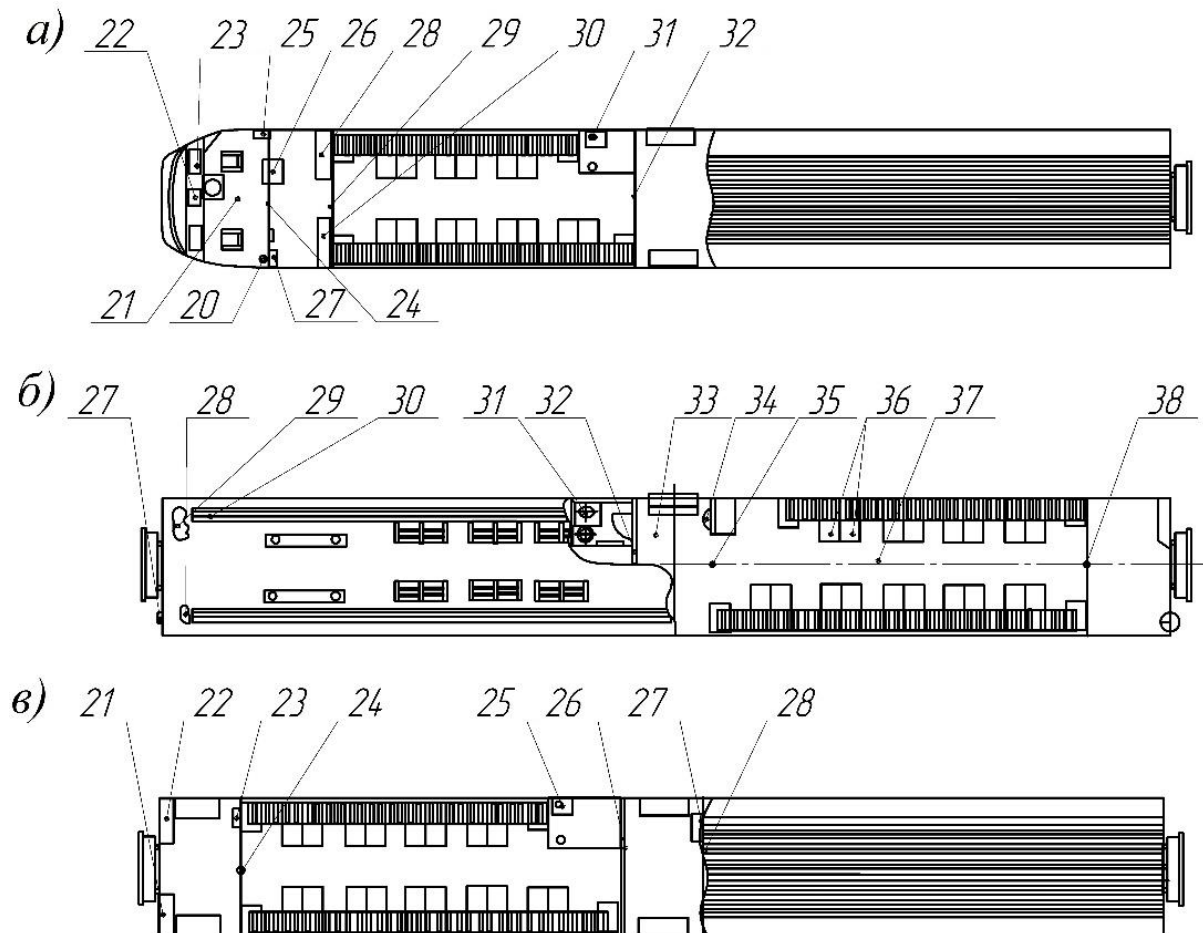


Рис. 1.17. Розташування обладнання під кузовом і в шафах головного (а), моторного (б) і причіпного (в) вагонів електропоїзда ЕПЛ2Т

Підтримувальний візок головного і причіпного вагонів двовісний, безщелепний з двоступеневим ресорним підвішуванням.

Двоступеневе ресорне підвішування забезпечує плавність ходу і комфорт пасажирів.

Кузов вагона і настил рами виконані з нержавіючої сталі. Між вагонами знаходяться закриті перехідні площадки балонного

типу, що забезпечують безпечний перехід пасажирів з вагона у вагон. Вагони електропоїзда обладнані автозчепленням. Головний вагон має з кожного боку по дві, а пасажирський вагон – по три зовнішні розсувні двері, дистанційно керовані машиністом. Внутрішні розсувні двері самозакривні. Вікна вагонів – блочного типу.

Електропоїзд має наскрізний прохід по всьому поїзду з вагона у вагон. Основне силове і допоміжне електрообладнання, а також гальмівне обладнання електропоїзда розподілено по секціях, що включає головний і моторний або причіпний і моторний вагони. Управління секціями електропоїзда здійснюється за системою багатьох одиниць з передньої (у напрямку руху) кабіни машиніста.

Кузови вагонів суцільнометалеві, зварні, несучої конструкції, мають салони для розміщення пасажирів і пристосовані для установа основного і допоміжного обладнання в торцевих шафах, під вагонами та на даху.

Опалення пасажирських салонів вагонів забезпечується нагрівальними пристроями, розташованими вздовж стін. Вентиляція салонів примусова, за допомогою електровентиляторів і природна – відкриттям кватирок бічних вікон. Для освітлення салонів вагонів застосовані люмінесцентні світильники, а для аварійного освітлення і освітлення тамбурів – лампи розжарювання. Для контролю посадки і висадки пасажирів на бічних стінках кабіни машиніста встановлені ліхтарі.

У всіх вагонах є туалетні приміщення 31. Вентиляція туалетного приміщення здійснюється через дефлектор, в каналі якого встановлений електровентилятор.

У передній частині головного вагона розташована кабіна машиніста зі службовим тамбуром. У кабіні 21 встановлено апарати управління 23, сигналізації, оповіщення, радіозв'язку 22. На задній стінці кабіни встановлено штурвал ручного гальма 24, динаміки, відкидне сидіння, вогнегасники 20 і аптечка. У службовому тамбурі розташовані шафи електрообладнання 28 і 30, шафа для одягу 27, апаратура АЛС і оповіщення.

Кузов головного вагона спирається на два підтримувальних двовісних безщелепних візки.

У моторному вагоні у шафі 28 встановлено пневматичне та електричне обладнання. У шафі 29 встановлена колонка ручного гальма і електрообладнання. Для обслуговування обладнання на даху встановлені трапи 30. Для піднімання на дах передбачена драбина 27, встановлена на передній торцевій стінці вагона.

Кузов моторного вагона спирається на два моторні двовісні візки. У причіпному вагоні у шафі 21 розташована колонка ручного гальма. У шафі 22 розташоване електрообладнання. Кузов причіпного вагона спирається на два підтримувальних візки.

Електропоїзд приводиться в рух тяговими електродвигунами, встановленими на візках моторних вагонів, які отримують енергію від контактної мережі постійного струму. Ланкою, що з'єднує контактний провід і силове коло електропоїзда, є струмоприймач.

Швидкість руху електропоїзда в режимі тяги регулюється за допомогою контролера машиніста під контролем блока регулятора прискорення шляхом зміни величини напруги живлення тягових електродвигунів і зміни їх струму збудження.

Швидкість руху в гальмівному режимі регулюється за допомогою контролера машиніста під контролем:

- системи автоматичного управління гальмування – реостатне, рекуперативне гальмування з незалежним збудженням тягових електродвигунів;

- блока регулятора прискорення – реостатне з самозбудженням тягових електродвигунів з переходом на електропневматичне гальмування до зупинки електропоїзда.

1.2.6. Вагони електропоїздів ЕПЛ9Т

Розташування обладнання електропоїзда ЕПЛ9Т подано на рис. 1.18. Електропоїзд ЕПЛ9Т формується з двох головних вагонів, що розташовуються по кінцях поїзда, і проміжних (моторних і причіпних) вагонів, які розташовуються між головними вагонами.

Електропоїзд має наскрізний прохід по всьому поїзду з вагона у вагон. Основне силове і допоміжне обладнання, а також

гальмівне обладнання електропоїзда розподілено по секціях, що включає головний і моторний або причіпний і моторний вагони. Управління секціями електропоїзда здійснюється за системою багатьох одиниць з передньої (у напрямку руху) kabіни машиніста. Кузови вагонів суцільнометалеві, зварні, несучої конструкції, мають салони для розміщення пасажирів і пристосовані для установлення основного і допоміжного обладнання в торцевих шафах, під вагонами і на даху.

Дах кузова вагона складається з секції даху крайньої і секції даху середньої, на яких є кришки на петлях для обслуговування обладнання вентиляції вагона, а також секції даху, на якій є кришка люка для монтажу та обслуговування кондиціонера. Крім того, на середній секції даху встановлено дефлектор для вентиляції туалетного приміщення.

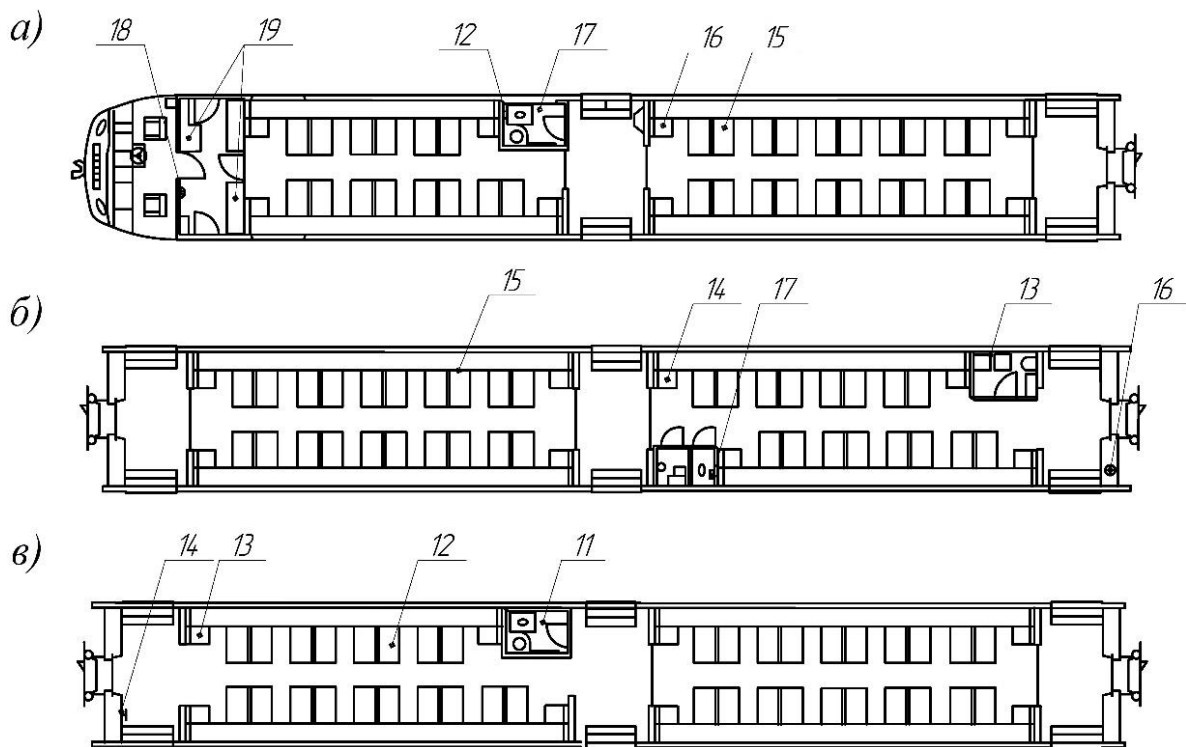


Рис. 1.18. Розташування обладнання під кузовом і в шафах головного (а), моторного (б) і причіпного (в) вагонів електропоїзда ЕПЛ9Т

Внутрішня частина кузова складається з kabіни машиніста, пасажирських салонів, тамбурів, туалетного приміщення 17 і блока торцевого. До торцевого блока кріпляться балони перехідного майданчика. У дверні прорізи встановлюються

зовнішні двері для посадки і висадки пасажирів. Двері мають електропневматичне дистанційне керування з робочого місця машиніста. Закрите положення дверей визначається за світловим сигналом на пульті управління. При постановці вагонів на відстій двері в закритому положенні фіксуються зсередини ключем.

Для екстреної зупинки складу в аварійних ситуаціях в тамбурах і салонах вагонів встановлені стоп-крани.

Для вечірнього освітлення призначені світильники комбіновані з люмінесцентними лампами і лампами розжарювання, розташованими в два ряди на стелі салонів.

Двері салонів розсувні з фіксацією їх у відкритому положенні. Підлоги салонів і тамбурів виготовлені з фанери і покриті зверху лінолеумом.

Природна вентиляція салонів здійснюється через віконні блоки з кватиркою, що відкривається всередину приміщення вагона.

Примусова вентиляція салону здійснюється мотор-вентиляторами через решітки вентиляційного каналу, розташованого на стелі.

Опалення салонів у холодну пору здійснюється нагрівальними пристроями 12, розташованими на бічних стінках кузова.

Кузови моторного та причіпного вагонів відрізняються від кузова головного вагона відсутністю кабіни машиніста. В кузові моторного вагона є купе провідника 13 і туалетне приміщення 17. Купе провідника обладнане кріслом, столиком, відкидним сидінням, шафою для одягу, дзеркалом, аптечкою, вогнегасниками. У денний час купе освітлюється через вікно, в нічний час – світильником з люмінесцентною лампою.

Для обслуговування обладнання, розташованого на даху моторного вагона, на задній стінці заднього торцевого блока кузова встановлені дві драбини.

На даху вагона по периметру встановлені трапи з дерев'яним настилом. Трап, встановлений на початку даху, має поручні, що полегшують підйом обслуговуючого персоналу на дах.

На кузові, з обох боків, розташовані жалюзі забору повітря для тягових електродвигунів переднього і заднього візків.

При експлуатації електропоїзда на залізничних лініях з низькими платформами сходинки знімаються.

1.2.7. Вагони електропоїздів TGV

Розташування обладнання електропоїзда TGV подано на рис. 1.19. Електропоїзд TGV формується з головних моторних вагонів, у яких розміщено основне електричне обладнання поїзда, і причіпних зчленованих вагонів для пасажирів.

Електрообладнання поїзда включає головний трансформатор 6, імпульсний перетворювач для роботи на постійному струмі і змішаний випрямляч 2 для роботи на змінному струмі, а також інше обладнання. Тягові двигуни моторного візка підвішені до рами кузова вагона, передають тягове зусилля через карданну передачу і осьовий редуктор 13. Пуск і розгін поїзда після зупинки на підйомі може проводитися на тягових двигунах п'яти моторних візків. Електропоїзд має три типи гальм – колодкове, дискове і реостатне 1. Дисковим гальмом обладнані опорні візки пасажирських вагонів.

За необхідності два електропоїзди можуть працювати за системою багатьох одиниць і управлятися з однієї кабіни.

Автозчеплення на головних вагонах забезпечує з'єднання пневматичних магістралей і електричних кіл обох составів.

За рахунок вдосконалення аеродинаміки поїзда витрата енергії знижена майже на 15 %. Цьому сприяло застосування зчленованих пасажирських вагонів і відмова від підвагонного розміщення електричного обладнання. В результаті зменшилася відстань між вагонами, більш ніж на третину скоротилося число візків, знизився рівень підлоги вагонів і покращилася обтічність нижньої частини кузова. Допоміжні кола головних і пасажирських вагонів живляться від одного з двох перетворювачів потужністю по 450 кВА, встановлених в крайніх пасажирських вагонах. Поїзд має всього два струмоприймачі. Вони змонтовані на головних вагонах і з'єднані між собою кабелем на 25 кВ. При русі піднімається один пантограф, при роботі за системою багатьох одиниць – по одному на кожному поїзді. Пасажирські вагони і кабіни управління обладнані системою кондиціонування повітря, розрахованою для підтримки у вагонах температури +21 °С. Форма і розташування крісел, кольорове оформлення салонів, конструкція дверей та іншого внутрішнього обладнання обрані з урахуванням вимог комфорту.

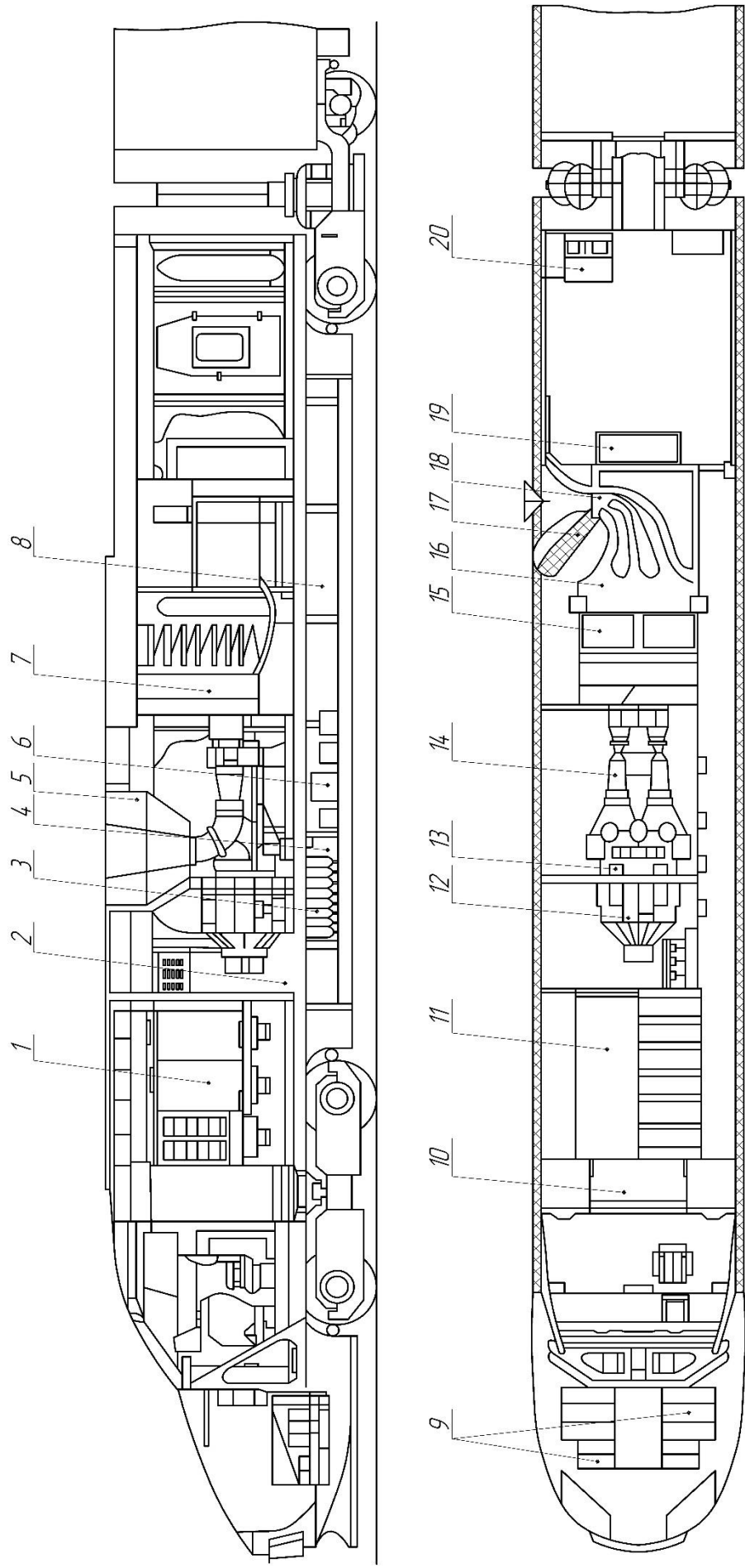


Рис. 1.19. Розташування електричного обладнання електропоїзда TGV

Для внутрішнього оздоблення вагонів застосовується пластик, армований скловолокном. Він має високу механічну міцність і довговічність, корозійну стійкість, низьку собівартість.

Зниженню рівня шуму в пасажирських салонах сприяють: застосування зчленованих вагонів; розміщення багажних відділень, туалетів, барів, перетворювачів над візками; установлення основного електрообладнання 11 поїзда в головних вагонах. У туалетах застосовані санвузли замкнутого типу зі збірним баком на 150 л. Ремонтопридатність електропоїздів TGV істотно поліпшена за рахунок зменшення числа візків, апаратів, тягових і допоміжних електричних машин. Зниженню витрат на обслуговування і ремонт сприяє також розміщення основного електричного обладнання в головних вагонах, блоковий спосіб його монтажу, точне визначення обсягу та періодичності робіт.

Також на рис. 1.19 зображені такі елементи: 3 – допоміжна апаратура; 4 – пневматика; 5 – випускний патрубок; 7 – повітряні фільтри; 8 – паливний бак; 9 – акумуляторний відсік; 10 – електрообладнання; 12 – генератор змінного струму; 14 – ВДМ; 15 – повітряні фільтри; 16 – вентиляційний короб; 17 – вогнегасники; 18 – розсікачі; 19 – електричне обладнання; 20 – радіопульт.

Питання для самоконтролю

1. Яких вимог слід дотримуватися при розташуванні електричного обладнання на електропоїздах?

2. Охарактеризуйте розташування обладнання під кузовом і в шафах вагонів електропоїзда EP2^P.

3. Охарактеризуйте розташування обладнання під кузовом і в шафах вагонів електропоїзда EP9^E.

4. Охарактеризуйте розташування обладнання під кузовом і в шафах вагонів електропоїзда EP200.

5. Охарактеризуйте розташування обладнання під кузовом і в шафах вагонів електропоїзда ЕПЛ2Т.

6. Охарактеризуйте розташування обладнання під кузовом і в шафах вагонів електропоїзда ЕПЛ9Т.

7. Охарактеризуйте розташування обладнання під кузовом і в шафах вагонів електропоїзда TGV.

1.3. СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ ТА ОПАЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

1.3.1. Системи вентиляції на електровозах

На електровозах застосовують *примусову вентиляцію* для забезпечення нормальних умов роботи тягових двигунів, двигунів компресорів, пускових резисторів, резисторів ослаблення збудження, індуктивних шунтів, випрямлячів, теплообмінників трансформаторів, згладжувальних реакторів, блоків гальмівних резисторів і іншого обладнання, для забезпечення необхідного надмірного тиску в кузові з метою запобігання проникненню в нього пилу і снігу під час руху електровоза, а також для охолодження приміщення кузова в літній час.

Повітря вентиляторами, що приводяться в обертання електродвигунами, засмоктується через повітрязабірні пристрої, які складаються зі спеціальних камер з жалюзі і фільтрами. Потоки повітря, пройшовши через повітрязабірні пристрої, очищаються від вологи, снігу і пилу і прямують у повітроводи для охолодження електричного устаткування. Як приклад розглянемо системи вентиляції електровозів ВЛ80^С (рис. 1.20, а). Повітря через лабіринтові жалюзі і форкамери 17 і 19 відцентровими вентиляторами, що приводяться в обертання двигунами 1 і 10, охолоджуючи індуктивні шунти 23, нагнітається у повітроводи 13 і 16 з патрубками 15 до тягових двигунів першої секції. Після їх охолодження повітря викидається під кузов секції. Від повітровода до двигуна ТДІВ відгалужується повітровод 12 з заслінкою до випрямної установки збудження 11.

Для запобігання попаданню в тягові двигуни снігу і сезонного регулювання витрати повітря (заслінки 18 і 21) передбачений лист 24, який в літній період встановлюють на стінку кузова в неробоче положення, в зимовий – на камеру з індуктивними шунтами. З 1981 р. на електровозах замість листа 24 і фільтра 13 кріплять раму з сіткою, на яку взимку ставлять фільтр, а у форкамерах встановлюють додаткові рухомі фільтри (штори).

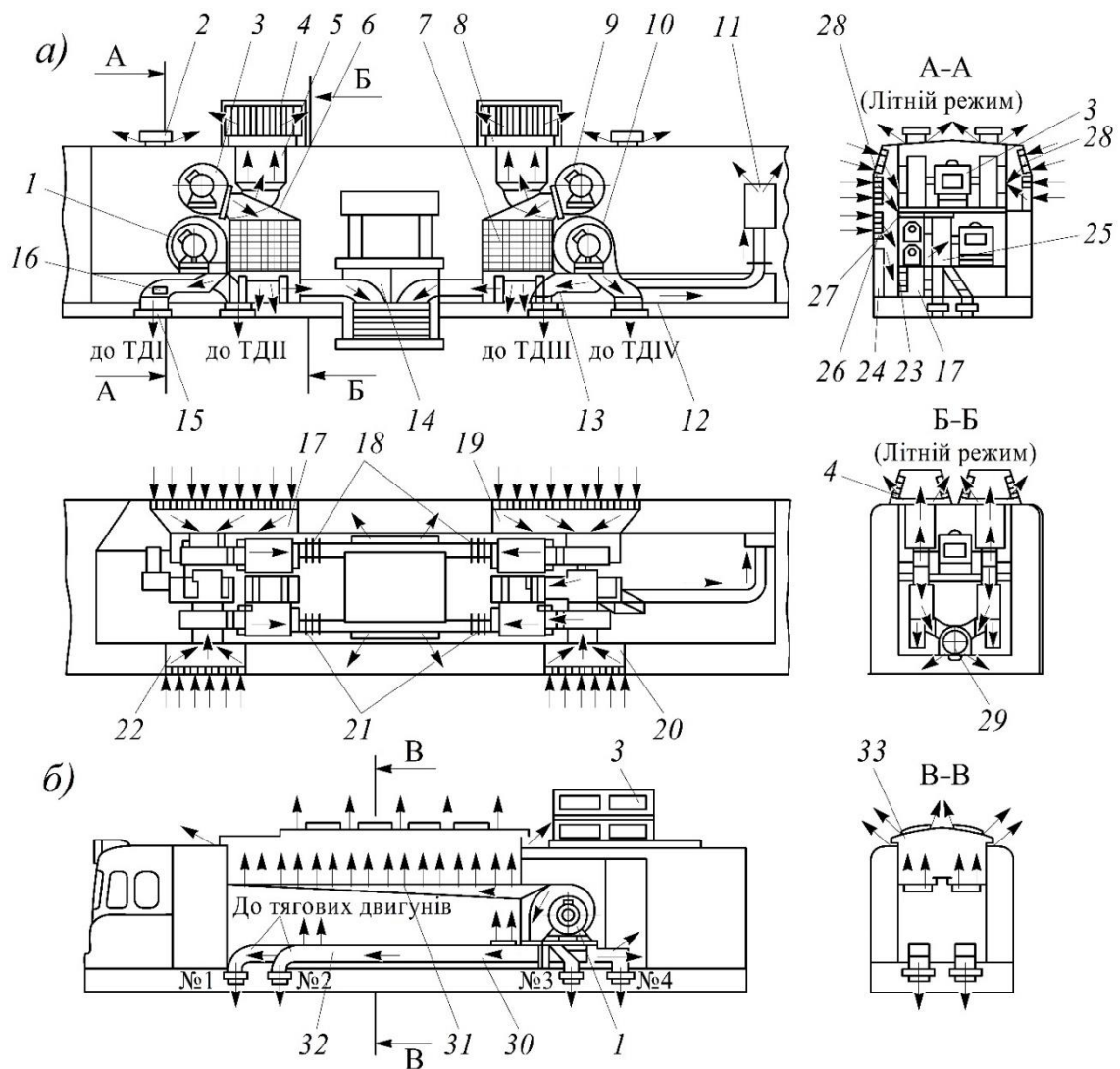


Рис. 1.20. Система вентиляції на електровозах ВЛ80 (а) і ВЛ10 (б)

Повітря через жалюзі 26, 28 і форкамери 19, 20, 22 вентиляторами, що приводяться в обертання електродвигунами 1, 9, нагнітається через пристрій перемикавання повітря ППП-5, коли його заслінка 8 встановлена вгору (що відповідає режиму тяги), у випрямлячі 6 і 7, охолоджуючи їх, далі по двох повітроводах воно проходить до згладжувальних реакторів 29, теплообмінників 14 тягового трансформатора і викидається під кузов в атмосферу. Коли заслінка 8 встановлена вниз, що відповідає режиму гальмування, повітря йде на охолодження блоків гальмівних резисторів 5 і викидається через жалюзі 4 на даху кузова секції. З 1981 р. в жалюзі 4 встановлюють сніговідбійні листи для запобігання попаданню снігу в гальмівні резистори. Щоб виключити взаємний вплив вентиляторів з електродвигунами 1 і 10, форкамери 17 і 19 розділені перегородкою 27.

Надмірний тиск в кузові в $40\div 60$ Па забезпечується в результаті викиду повітря після охолодження випрямної установки збудження в кузов секції через спеціальні вікна на повітроводах до тягових двигунів. На кришках дахових люків встановлені витяжні дефлектори 2, які влітку відкривають, взимку закривають. Система вентиляції забезпечує подачу повітря в об'ємі 922 м^3 за 1 хв.

Система вентиляції на електровозах ВЛ80^Т, ВЛ80^К конструктивно виконана аналогічно розглянутій.

На електровозах ВЛ10 і ВЛ10^У (рис. 1.20, б) примусова вентиляція здійснюється на секції одним відцентровим вентилятором Ц13-50 № 8 з електродвигуном 1 (рис. 1.20, б). Забір повітря проводиться через габаритні жалюзі 3, розташовані на даху секції електровоза. Очищене від пилу або вологи повітря, пройшовши форкамеру, через патрубок подається у вентилятор і нагнітається двома потоками, одним – по системі повітроводів 30 до тягових двигунів даної секції і по відгалуженнях до електродвигуна компресора, другим – до резисторів і індуктивних шпунтів по повітроводу 31, із спеціальними прорізами в жолобах, розташованому на рівні 2-го поверху високовольтної камери (над блоками апаратів). Витрата повітря в цьому потоці складає $195\text{ м}^3/\text{хв}$, викид його в атмосферу проводиться через лабіринтові щілини 33 в даху, забезпечені шиберами (взимку вони повинні бути закриті, влітку – відкриті). Витрата повітря на кожен тяговий двигун не менше $95\text{ м}^3/\text{хв}$. Розподіл повітря по тягових двигунах регулюють, переміщаючи заслінки, встановлені на кожухи вентиляторів.

Для підтримки в кузові тиску вище атмосферного передбачений викид повітря в зонах високовольтної камери і в машинному приміщенні з повітроводів до тягових двигунів через жалюзі 32. При цьому надмірний тиск в кузові повинен бути $30\div 50$ Па.

На електровозах ЧС2, ЧС2^Т, ЧС4 і ЧС4^Т також використані системи примусової вентиляції.

1.3.2. Системи вентиляції та опалення на електропоїздах

На електропоїздах тягові двигуни мають *самовентиляцію*. Повітря для їх охолодження забирається через жалюзі, розташовані над входними дверима і сполучені вентиляційним каналом з фільтрами. Далі по вертикальному каналу, що знаходиться в пасажирському приміщенні, і по підвагонному каналу через гнучке з'єднання повітря надходить до двигуна, а з двигуна викидається в атмосферу.

Крім того, є спеціальні системи для вентиляції ділянки напруги електропоїзда EP2, а також для охолодження випрямної установки, реактора і охолоджувача масла трансформатора електропоїзда EP9^M. Для подачі повітря до цих агрегатів на валу розщеплювача фаз встановлено колесо вентилятора. Повітря забирається через спеціальні жалюзі в бічних стінках моторних вагонів (під вікнами) і подається у фільтрову камеру. З камери воно засмоктується колесом вентилятора і подається по двох трактах: розщеплювач фаз - атмосфера (для охолодження самого розщеплювача фаз) і випрямна установка, реактор, охолоджувач масла трансформатора - атмосфера. У зимовий період перед всмоктувальними жалюзі встановлюють матерчаті фільтри, що запобігають попаданню снігу. У всіх вентиляційних пристроях застосовані сітчасті фільтри розміром 500×500 мм з масляним просоченням.

Система опалювання вагонів складається з електричних печей і електрокалориферів. Печі встановлені в заземлених кожухах на підлозі під диванами, а електрокалорифери – в горищних приміщеннях біля переднього кінця розподільного вентиляційного каналу, розташованого на стелі.

Вентиляція пасажирських приміщень виконана *примусовою*, має два режими роботи (літній і зимовий) або три (літній, перехідний, тобто осінньо-зимовий або зимово-весняний, і зимовий). Вентиляційна система електропоїздів EP2, EP9^M, EP9^E (рис. 1.21) забезпечує подачу 1,67 м³/с повітря літом і близько 0,55 м³/с зимою. Влітку повітря в салон може надходити і через відкриті вікна, а взимку – тільки через систему вентиляції, заздалегідь підігріте в електрокалориферах. Якщо зовнішня

температура нижча мінус 20 °С, спеціальними заслінками 13, встановлюючи їх в певне положення, зменшують кількість повітря, що подається в кузов. При цьому використовується частина повітря, що знаходиться у вагоні, тобто здійснюється рециркуляція.

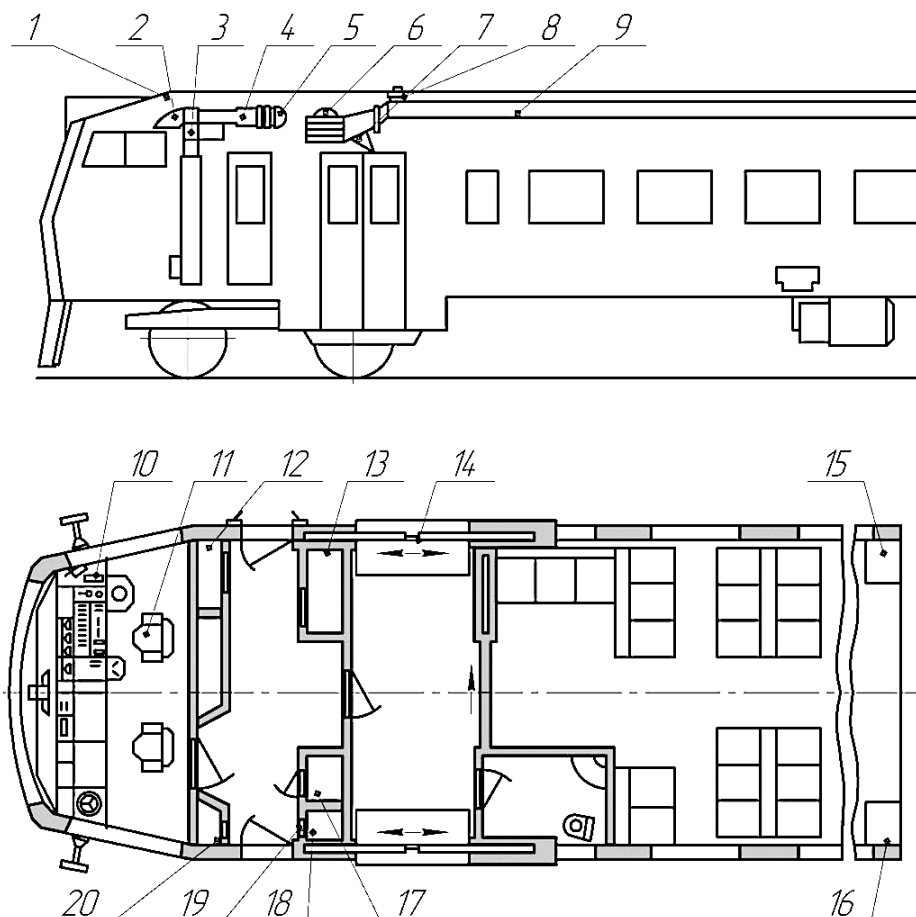


Рис. 1.21. Система вентиляції головного вагона електропоїзда (стрілками вказаний напрям повітря при літньому режимі)

На електропоїзді ЕР2 в кожному вагоні є два самостійні вентиляційні агрегати, розташовані в горищних приміщеннях тамбурів. Агрегат 6 складається з двох відцентрових вентиляторів і двигуна постійного струму напругою 50 В з частотою обертання 5÷20 об/с. Передбачений перехідний брезентовий патрубок 7 з відведеннями для вентиляції тамбура. Зовнішнє повітря надходить через жалюзі 12, 15, 16, 18, 20, проходить через сітчасті фільтри в горищне приміщення, а звідти через дифузор 14 і калорифер нагнітається вентилятором в стельовий вентиляційний канал 9. Видаляється повітря з вагона і

службових приміщень 17, 19 через двері під час виходу і входу пасажирів, влітку – ще через жалюзі 2. Взимку заслінки вентиляторів закриті, а рециркуляційні люки відкриті. У зимовому режимі 40÷50 % теплого повітря з пасажирського приміщення через рециркуляційні люки потрапляє в горищні приміщення тамбурів, де змішується з холодним повітрям і подається вентилятором в стельовий канал. Влітку заслінки вентиляторів відкриті, а рециркуляційні люки закриті.

На електропоїздах ЕР2 і ЕР9^М виробництва 1974 р. передбачена також примусова вентиляція і кабіни машиніста (рис. 1.21). Для подачі в кабіну свіжого повітря над службовим тамбуром в горищному приміщенні встановлені вентиляційний агрегат 5 і фільтрова камера 3, забезпечена засувкою і заслінкою форсованого нагрівання повітря, що подається. За сидінням машиніста 11 проходять вертикальний і горизонтальний 4 канали, у верхній частині якого знаходиться заслінка зимового і літнього режимів і отвір для подачі повітря в літній час. Проти отвору встановлений щиток 1, що дозволяє за бажанням машиніста міняти напрям повітряного потоку. У нижній частині вертикального каналу розташовані жалюзі 10 для подачі підігрітого повітря в зимовий час. Електрокалорифер, встановлений у вертикальному каналі, має два ступені потужності: великої 6,5 і малої 2,2 кВт. Ступінь малої потужності використовується в період, коли температура зовнішнього повітря знаходиться в межах від 0 до плюс 15 °С. У верхній частині задньої перегородки є рециркуляційний люк, що відкривається в зимовий час. Встановлені в кабіні терморегулятори, автоматично вмикаючи або вимикаючи будь-який ступінь калорифера, підтримують температуру в межах від плюс 16 до плюс 20 °С. У літньому режимі заслінка форсованого підігріву і засувка на фільтровій камері відкриті повністю, у верхній частині каналу заслінка знаходиться в положенні літнього режиму, а заслінка на вентиляторі прикрита на 3/4. У зимовому режимі засувка на фільтровій камері висунута до упору, заслінки форсованого підігріву, рециркуляційний люк і засувки на вентиляторі відкриті. Залежно від температури зовнішнього повітря вмикається великий або малий ступінь потужності електрокалорифера. При форсованому режимі

(використовують, якщо температура нижча мінус 20 °С) закривають заслінку форсованого підігріву. Надходження свіжого повітря припиняється, і вентилятором подається тільки рециркуляційне повітря. Крім того, для вентиляції кабіни машиніста в літній час можна відкрити бічні вікна і нагнітальні патрубки, змонтовані біля лобових вікон кабіни.

На кожному вагоні електропоїздів EP9^M і EP9^E встановлюють по одній аналогічній вентиляційній установці, але з двигунами змінного струму, що мають максимальну частоту обертання 23 об/с. Система вентиляції має три режими: літній, перехідний і зимовий. Літній режим аналогічний такому ж на вагонах EP2, причому подача одного вентилятора 1,12 м³/с, а іншого (при одному закритому заслінкою всмоктувальному отворі) 0,72 м³/с. У перехідні періоди (осінньо-зимовий і зимово-весняний) залежно від температури зовнішнього повітря працює тільки один вентилятор. При температурі зовнішнього повітря від плюс 18 до мінус 20 °С один вентилятор подає в пасажирське приміщення 0,665 м³/с свіжого повітря, а при температурі нижче мінус 20 °С інший – 0,42 м³/с. Крім того, в зимовий час створюється рециркуляція. При відкритих рециркуляційних люках кількість повітря, що нагнітається через них у вагон, складає 30÷40 % загальної кількості повітря, яке подається. Аналогічно виконана вентиляція і у вагонах електропоїзда EP2^P. Туалетні приміщення у вагонах вентилюються дефлекторами 8.

Для створення оптимальних метеорологічних умов у вагонах поїздів використовують найбільш досконалий вид вентиляції – **кондиціонування**. Кондиціонування повітря значно дорожче вентиляції, але створює найкращі умови для життя і діяльності людини. Кондиціонування повітря застосовується на електропоїздах EM4 «Спутник». Опалювальна система вагонів складається з електричних печей, призначених для нагрівання повітря внутрішніх приміщень електропоїзда, і електрокалориферів (рис. 1.22) – для підігріву зовнішнього повітря, що надходить в пасажирське приміщення.

Електричні печі ПЕТ-1У3 (рис. 1.23) розташовані в заземлених кожухах 3 на підлозі пасажирського приміщення під диванами. Кожна піч має чотири трубчастих нагрівальних елементи 6, через які пропущені дротяні спіралі. Елементи

прикріплені на ізоляторах 5 і з'єднані послідовно. Вивідні затискачі 4 приєднані до шпильок, пропущених через ізолятор. Електрокалорифери складені з трубчастих нагрівальних елементів ТЕН-78А потужністю 800 Вт напругою 220 В. Ці елементи закріплені на фарфорових ізоляторах, встановлених на металевих планках. У середині нагрівального елемента намотана спіраль з ніхромової проволочки діаметром 0,35 мм, активна довжина якої 670 мм. Для запобігання зміщенню спіралі трубка заповнена кварцовим піском. По кінцях трубки є виводи.

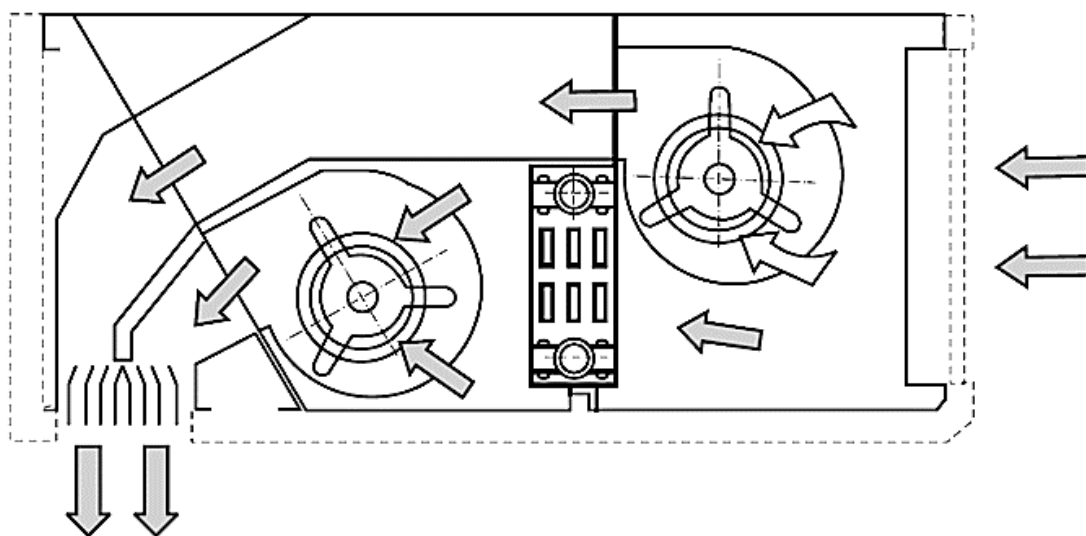


Рис. 1.22. Схема роботи калорифера

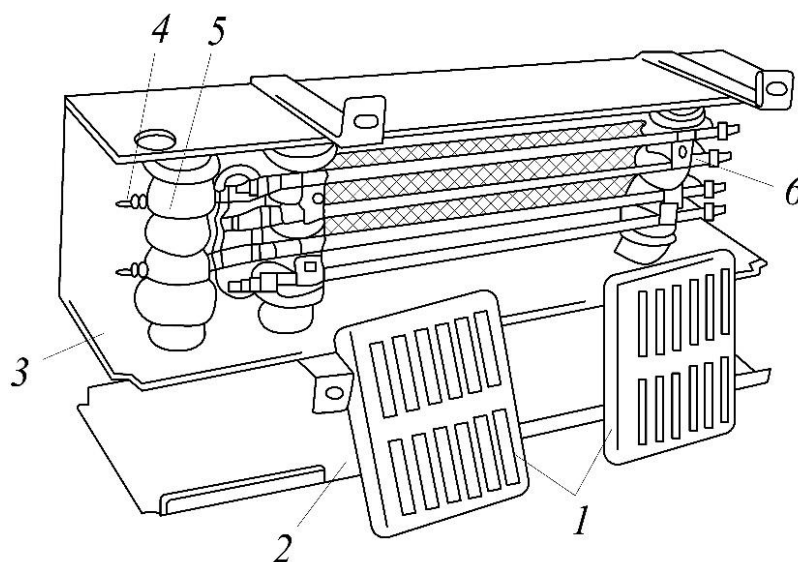


Рис. 1.23. Електрична піч електропоїзда:
 1 – кришка; 2 – бокова стінка; 3 – кожух; 4 – затискачі;
 5 – ізолятори; 6 – ТЕНи

На електропоїздах EM2 (і деяких інших) теплоелектронагрівачі розташовані вздовж віконних прорізів і закриті кожухами з отворами. Це сприяє більш повному перемішуванню холодного повітря, що надходить від вікон, з нагрітим повітрям, яке піднімається вгору від ТЕНів. Однак з досвіду експлуатації відомо, що вільної конвекції для забезпечення рівномірного теплового режиму в салоні електропоїзда недостатньо. Це призводить до виникнення «холодних» і «тепліх» зон, що не відповідає вимогам комфорту пасажирів. Для більш рівномірного розподілу теплових потоків всередині салону на електропоїздах EM4 і ЕД4МКМ поліпшення циркуляції повітря по салону досягається примусовою вентиляцією ТЕНів, встановлених знизу віконних прорізів.

Салони електропоїзда обладнані примусовою вентиляцією, для чого в горищних приміщеннях над тамбурами встановлено по одному вентиляційному агрегату, що складається з основи і відцентрового вентилятора, робоче колесо якого насаджено на кінець вала електродвигуна.

На вхідному отворі вентилятора розташований дросель-клапан, який має три положення і регулюється вручну залежно від пори року. Для установадження дросель-клапана в потрібне положення передбачена ручка, на вісь якої насаджена стрілка. На корпусі дросель-клапана закріплена планка з вибитими на ній літерами Л (літній), П (перехідний) і З (зимовий). Для вибору потрібного режиму вентиляції вістря стрілки поєднується з відповідною буквою.

Забір зовнішнього повітря в горищних приміщеннях здійснюється через жалюзі, до яких прикріплені фільтрові камери зі встановленими в них фільтрами. Фільтри призначені для очищення засмоктуваного повітря. Подача повітря в пасажирські приміщення здійснюється по стельовому каналу, що має в нижній частині перфоровані листи для виходу повітря. Зовнішнє повітря засмоктується через жалюзі і сітчасті фільтри в горищне приміщення і вентиляційним агрегатом подається в стельовий канал, з якого через отвори в листах каналу надходить в салон.

Вентиляція тамбурів виконується через встановлені приливні насадки в стелях (по дві в кожному тамбурі). Повітря в насадки надходить при роботі вентилятора через відвід, зроблений в

гнучкому з'єднанні вентилятора зі стельовим каналом. Вентиляція туалетів – витяжна і здійснюється за допомогою дефлектора на даху вагона.

Заходи щодо удосконалення систем опалення. В умовах холодної зими, при відкритті входних дверей різниця між температурою зовнішнього повітря і температурою повітря в середині салону електропоїзда викликає приплив у приміщення холодного повітря поблизу підлоги і вихід з нього теплого повітря через верхню частину дверного прорізу (рис. 1.24).

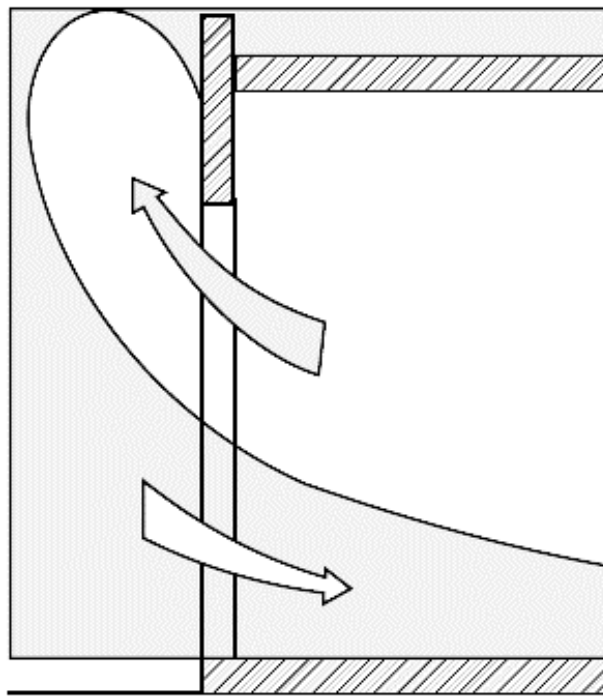


Рис. 1.24. Дверний отвір без повітряної завіси

Особливо це актуально для електропоїздів з приставно-розсувними дверима, які не мають тамбурів (наприклад, ЕМ4). У літній час відбувається протилежний рух повітряних потоків. При цьому на повітрообмін впливають погодні умови, сила і напрям вітру. Такий фізичний процес сприймається як неприємний протяг, крім того, температура в салоні починає знижуватися, що призводить до додаткових витрат електроенергії на опалення.

Для регулювання теплообміну застосовують повітряну завісу (рис. 1.25), яка діє як невидима стіна між зовнішньою і внутрішньою зонами, перешкоджаючи проникненню зовнішнього повітря в салон і тим самим розділяючи зовнішню і

внутрішню кліматичні зони. При цьому важливо досягти мінімальної витрати електроенергії і отримати невелику швидкість повітря на виході із завіси.

Теплий повітряний потік подається зверху і збоку дверного прорізу таким чином, що створюється постійна завіса по всій його ширині або висоті. Завіса протидіє надходженню холодного повітря. При цьому, залежно від сили та напрямку вітру, захоплюється частина холодного повітря. Після змішування з теплим повітряним потоком в нижній зоні підігріте таким чином зовнішнє повітря надходить у приміщення.

Крім того, завдяки постійній фільтрації всмоктуваного повітря виходить додатковий сприятливий ефект – покращення якості повітря в приміщенні.

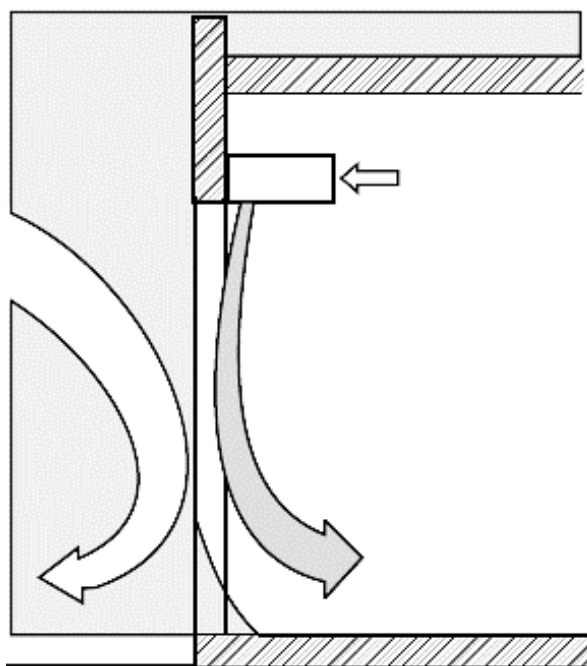


Рис. 1.25. Дверний проріз з повітряною завісою

Повітряна завіса мінімізує втрати теплоти, не пропускаючи холодного повітря і використовуючи аеродинамічний нагрів у зоні стелі.

Теплота, що виділяється при роботі завіси, не губиться: при сприятливому співвідношенні тисків зовнішнього повітря і повітря в приміщенні і при несильному зустрічному вітрі теплота в основному йде на підтримку комфортної температури повітря в приміщенні (рис. 1.26).

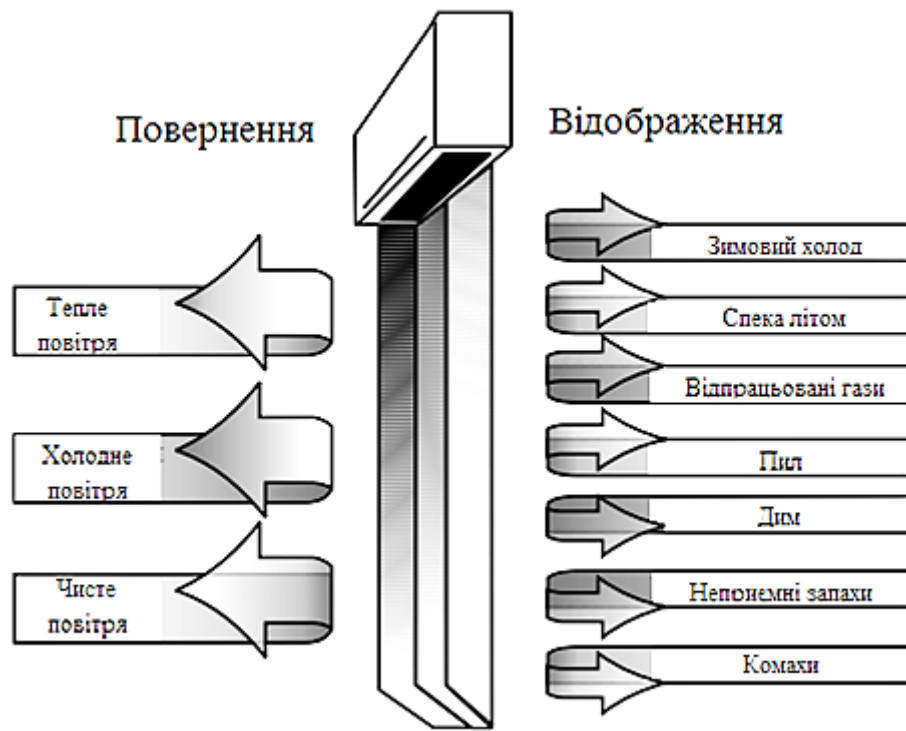


Рис. 1.26. Робота теплової завіси

Питання для самоконтролю

1. Який вид вентиляції застосовують на електровозах?
2. У чому полягає призначення системи вентиляції електровоза?
3. Охарактеризуйте систему вентиляції електровоза ВЛ80^С.
4. Охарактеризуйте систему вентиляції електровоза ВЛ10.
5. Який вид вентиляції застосовують на електропоїздах?
6. Охарактеризуйте систему вентиляції пасажирських приміщень електропоїзда ЕР2.
7. Охарактеризуйте систему вентиляції пасажирських приміщень електропоїзда ЕР9.
8. Який вид вентиляції застосовують на електропоїздах ЕМ4 «Спутник»?
9. Охарактеризуйте систему опалення електропоїзда ЕМ2.
10. Вкажіть заходи, направлені на удосконалення систем опалення електропоїздів.

РОЗДІЛ 2

ДИНАМІКА ЕЛЕКТРИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

2.1. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ПРО КОЛИВАННЯ ЛОКОМОТИВІВ І ЗБУРЕННЯ, ЯКІ ВИКЛИКАЮТЬ КОЛИВАННЯ

2.1.1. Основні завдання динаміки локомотивів

Динаміка локомотива – фізичний процес виникнення сил, моментів, переміщень складових частин локомотива внаслідок взаємодії його ходових частин і верхньої будови колії, а також локомотивів і вагонів у рухомому поїзді [7, 58].

Процес взаємодії локомотива і верхньої будови колії в значній мірі залежить від їх конструкції. Вплив на верхню будову колії надає і стан ходової частини. Від процесів взаємодії у великій мірі залежить безпека руху поїздів.

Під час руху локомотива по рейковій колії внаслідок взаємодії коліс і рейок виникають динамічні явища, які викликають коливання колії і рухомого складу. Ці коливання не потрібні для виконання основної функції рухомого складу – перевезення вантажів і пасажирів, тому такі коливання називаються шкідливими або паразитними, що викликають знос і руйнування рухомого складу і колії [33–36, 47].

Основне завдання дослідження динамічних процесів у системі «локомотив-колія» полягає у визначенні оптимальних значень параметрів цієї системи, при яких значно знижуються коливання і динамічні сили. Під параметрами розуміють габаритні розміри, маси, жорсткості елементів зв'язку. Для визначення оптимальних параметрів необхідно дослідження коливальних процесів локомотива і його окремих частин; встановлення критеріїв для оцінки плавності ходу, стійкості проти сходу з рейок, вібрації елементів. З точки зору динаміки, механічна частина локомотива повинна:

- забезпечувати стійкість руху екіпажа;
- задовольняти вимоги, що ставляться до якості механічної частини.

2.1.2. Види коливань локомотивів

При розрахунку коливань локомотивів координати, що визначають положення окремих тіл екіпажа (кузова, візків і т. д.), відносять до системи координат x_0, y_0, z_0 з центром O (на осі колії), що рухається поступально зі швидкістю екіпажа (інерційна система, рис. 2.1). Коливання тіл називають (*поступальні*):

- по осі z_0 – *підстрибування* (z);
- по осі y_0 – *бічне віднесення* (y);
- по осі x_0 – *посмикування* (рос. подёргивание) (x).

Повороти тіла визначають по відношенню до системи координат x_1, y_1, z_1 , пов'язаної з центром мас O_1 тіла, нерухомої по відношенню до основної інерційної системи координат. Кути повороту характеризують кутові коливання (*обертальні*):

- φ_x – *бічне хитання*;
- φ_y – *галопування*;
- φ_z – *виляння*.

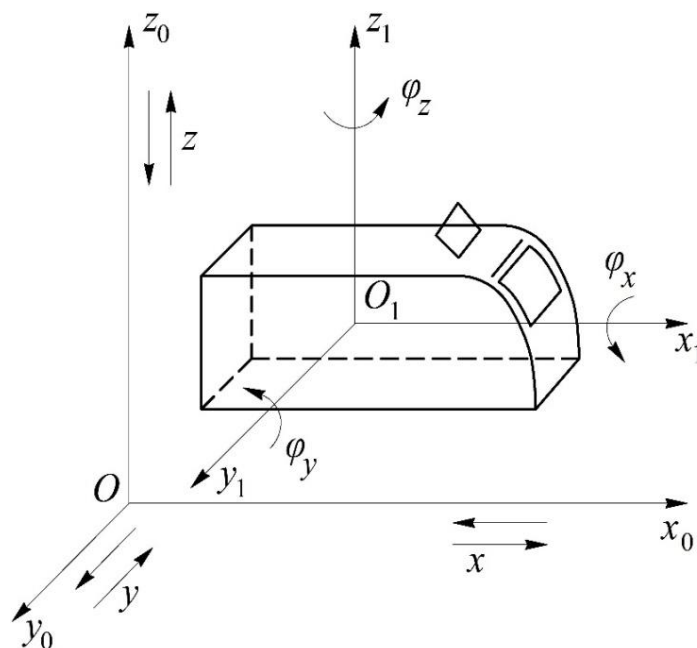


Рис. 2.1. Системи координатних осей

Всі шість видів коливань взаємно пов'язані. Однак, як показує досвід, їх можна розглядати окремо. Тому при вивченні коливань рухомого складу їх прийнято розділяти на три групи:

- *вертикальні* – за координатами z і φ_y ;
- *поздовжні* – за координатою x ;
- *поперечні (бічні)* – за координатами y , φ_z і φ_x .

Кожне з шести видів коливань складається з *вільних і змушених*.

Вільні коливання виникають за відсутності змінного зовнішнього впливу внаслідок одноразової дії збурень (удар на стику рейки, удар колеса з повзуном по рейці і т. д.).

Змушені коливання викликані під дією збурюючих факторів або збудників коливань. Параметри таких коливань залежать від швидкості руху і характеристик збудника. Змушені коливання бувають *сталими і несталими*.

Сталі коливання є умовним видом під час руху екіпажа з постійною швидкістю по прямих ділянках колії, без переломів профілю.

Несталі коливання виникають в перехідних режимах руху:

- 1) прохід одиничної нерівності колії;
- 2) вхід в криву і вихід з кривої;
- 3) зрушення і розгін, зміна швидкості руху;
- 4) перехід переломів профілю.

Дисипативні характеристики ЕРС такі, що вільні коливання швидко загасають. Тому при визначенні показників динамічних якостей розглядають в основному сталий режим змушених коливань.

2.1.3. Збурення, що викликають коливання

Збурення, що викликають змушені коливання, можна розділити на три види:

- 1) *кінематичні* – геометричні нерівності колії в профілі і в плані, нерівності на поверхні кочення колеса;
- 2) *силові* – дія прикладених зовнішніх сил (тяговий момент, періодичні сили від дисбалансу обертових частин дизелів, компресорів і т. д.);
- 3) *параметричні* – обумовлені зміною якого-небудь параметра системи.

Ці три види збурень використовуються для вирішення різних завдань динаміки. Вибір параметрів ресорного підвішування та

оцінку показників динамічних якостей локомотива виконують з використанням кінематичного збурення. Силові збурення використовують для вирішення завдань віброізоляції агрегатів.

Вибір параметрів віброзахисту статичних перетворювачів (трансформатори, тиристорні перетворювачі, електронні системи керування і т. д.) виконують з урахуванням обох типів збурень.

Вплив параметричного збурення проявляється в зміні жорсткості колії по її довжині. У міру наближення до стику вертикальна жорсткість колії зменшується. Посередині стику через наявність накладки навантаження передається на обидві рейки, і жорсткість дещо зростає.

В зимовий час жорсткість колії може зростати, в тому числі і в стиковій зоні в $2,5 \div 3$ рази.

Дисипативні сили також змінюються по довжині рейки. Ці зміни носять випадковий характер і залежать від конструкції колії, системи та якості ремонту колії, пори року.

Змінність властивостей колії по її довжині практично еквівалентна деякій випадковій геометричній нерівності $\eta_e(x) = \eta_e(Vt)$, яка наближено враховує всі причини, що викликають появи коливань рухомого складу.

Еквівалентна геометрична нерівність враховує повторюваність стику через довжину рейки, хвилеподібний знос рейок (періодичні нерівності різної довжини), ексцентриситет колеса і овальність.

Динамічні властивості колії описують за допомогою моделей, які враховують її пружні, дисипативні і інерційні властивості. Використовуються дві **моделі колії**:

- **дискретна** – колія уявляється у вигляді зосередженої маси m_n , приведеної до точки контакту колеса і рейки, пружини жорсткістю \mathcal{J}_n , гідравлічного гасителя з коефіцієнтом затухання β_n (рис. 2.2). При виконанні розрахунків за цією моделлю можна приймати значення параметрів колії в таких діапазонах: $m_n = 0,3 \div 0,8$ т; $\mathcal{J}_n = 35 \div 85$ МН/м; $\beta_n = 0,2 \div 0,8$ МНс/м;

- **континуальна** – колія як система з розподіленими по її довжині параметрами (балка на пружно-в'язкій вінклеровській основі, тобто на основі, в якій прогин з'являється тільки в точці прикладання сили, рис. 2.3).

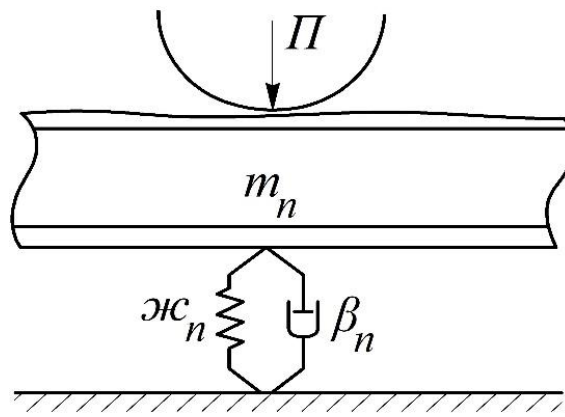


Рис. 2.2. Дискретна модель колії

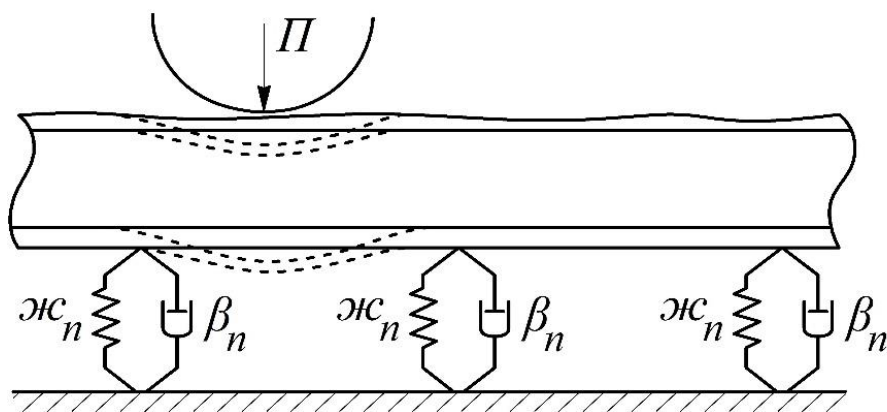


Рис. 2.3. Континуальна модель колії

Геометричні нерівності, що входять до складу еквівалентної геометричної нерівності, поділяються на три групи:

1) **рифлі** – нерівності з довжиною хвилі $L_x = 0,03 \div 0,08$ м, причини їх появи остаточно не встановлені;

2) **короткі** – з довжиною хвилі $L_x = 0,08 \div 0,3$ м, виникають зазвичай в кривих радіусом менше 600 м, викликаються проковзуванням одного з коліс;

3) **довгі** – з довжиною хвилі $L_x = 0,3 \div 3$ м, пов'язані з прокаткою і правкою рейок, а також з рухом різнотипного рухомого складу, що має близькі параметри механічної частини.

Таким чином, коливання локомотивів можуть бути викликані **постійними** і **випадковими** збуреннями, а також спільною їх дією.

2.1.4. Характеристики елементів з'єднань

Окремі тіла, з яких складається екіпаж, об'єднані в механічну систему за допомогою різних елементів з'єднань: *жорстких, пружних і дисипативних*.

Дисипативними (демпфірувальними) називають елементи, деформація яких супроводжується розсіюванням (дисипацією) енергії, обумовленим дією сил поверхневого або внутрішнього тертя (гідравлічні й фрикційні гасителі).

Жорсткі елементи не допускають відносних переміщень між тілами в одному або декількох напрямках. Поняття жорсткого елемента є умовним, оскільки будь-які елементи володіють тією чи іншою піддатливістю. Тому *жорстким елементом* вважається елемент, піддатливість якого практично не змінює істотних властивостей системи (з'єднання між віссю колісної пари і колесами, між балками рами візка).

Пружні елементи передають силові дії між окремими елементами, зменшують їх відносне переміщення, не змінюючи при цьому число ступенів свободи. Пружні зв'язки підрозділяються на *лінійні, кусково-лінійні і нелінійні*. Одна з основних характеристик пружного зв'язку – *жорсткість Ж*.

В *пружних елементах* виникає сила пружності F_n , яка залежить від відносних переміщень Δ (деформацій) і визначається виразом

$$F_n = -Ж \cdot \Delta. \quad (2.1)$$

В *дисипативних елементах* сили F_δ залежать від відносної швидкості деформації $\dot{\Delta}$ елемента з'єднання. Для елементів з в'язким тертям (гідравлічні гасителі) сила F_δ визначається як

$$F_\delta = -\beta \cdot \dot{\Delta}, \quad (2.2)$$

де β – коефіцієнт в'язкого тертя гідравлічного гасителя коливань.

Фізичний сенс коефіцієнта β – це сила, яку необхідно прикласти до поршня гідравлічного гасителя для його

переміщення зі швидкістю 1 м/с, тому розмірність β – кілоньютон-секунда на метр (кН·с/м). З ростом частоти коливань збільшується швидкість і сила опору гасителя. При високочастотних коливаннях швидкість Δ стає високою, і сили F_{∂} можуть виявитися настільки значними, що викличуть порушення міцності елементів гасителя. Через це гідравлічні гасителі найчастіше застосовують для гасіння низькочастотних коливань. Для обмеження сил F_{∂} в гасителі послідовно включають додатковий пружний елемент (гумові втулки).

В механічній частині рухомого складу великого поширення набули **пружно-дисипативні** елементи, сили в яких складаються з пружної і дисипативної складових. Вони поділяються:

- на **пружно-фрикційні** – елементи реалізують, включаючи паралельно або послідовно-паралельно пружини й фрикційні гасителі коливань (пружно-ізолюваний фрикційний гаситель);

- **пружно-в'язкі** – також містять паралельно і послідовно включені пружні (пружини) і дисипативні елементи (гідравлічні гасителі).

Характеристиками пружно-ізолюваного гасителя володіють і пневматичні гасителі коливань, робочим тілом в яких є повітря.

Питання для самоконтролю

1. У чому полягає основне завдання дослідження динамічних процесів?
2. Які види коливань локомотивів можуть бути наявні під час руху по колії?
3. За яких умов виникають вільні коливання?
4. За яких умов виникають змушені коливання?
5. Сформулюйте поняття «сталі і несталі коливання»?
6. Як класифікуються збурення, що викликають коливання?
7. Якими моделями описуються динамічні властивості колії?
8. Сформулюйте поняття «еквівалентна геометрична нерівність» і що до неї входить?
9. Від чого залежить сила пружності в пружних елементах зв'язків і як вона визначається?
10. Від чого залежить сила дисипації в дисипативних елементах зв'язків і як вона визначається?

2.2. МЕТОДИКА СКЛАДАННЯ РІВНЯНЬ КОЛИВАНЬ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ЕКІПАЖА

2.2.1. Принцип Даламбера

Аналітична механіка ґрунтується на тому чи іншому принципі – аксіоматичному твердженні. Для складання рівнянь руху може використовуватися *принцип Даламбера*, згідно з яким рівнянням руху можна надати вигляду рівнянь рівноваги, якщо до всіх точок системи прикласти додаткові сили інерції.

Розглянемо принцип Даламбера. Припустимо, що матеріальна точка під дією активної сили F_a рухається по зв'язку (рис. 2.4).

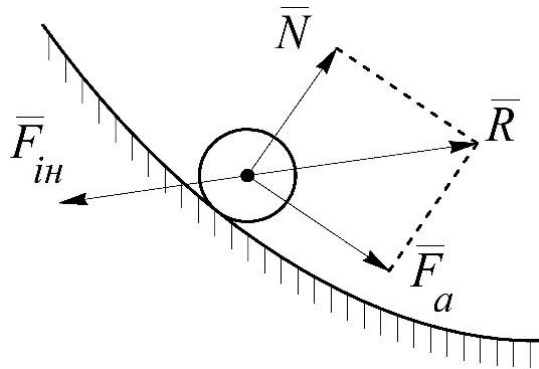


Рис. 2.4. Схема сил

Прискорення буде направлено по рівнодіючій сили R . Векторна сума активної сили F_a і сили реакції N буде визначатися як

$$\bar{R} = \bar{N} + \bar{F}_a. \quad (2.3)$$

Тоді

$$\bar{R} + \bar{F}_{in} = 0, \quad (2.4)$$

де $\bar{F}_{in} = -m \cdot \bar{a}$ – сила інерції (знак «мінус» (« \leftarrow ») означає, що сила інерції направлена проти прискорення \bar{a}).

Принцип Даламбера (визначення): якщо до діючої на тіло активної сили і реакції зв'язку прикласти додаткову силу інерції, то тіло буде перебувати в рівновазі (сума всіх сил, що діють у системі, доповнена головним вектором інерції, дорівнює нулю).

Під **силою інерції** розуміється вектор, чисельно рівний добутку маси на прискорення і спрямований проти прискорення. Цей принцип надає рівнянням руху формального вигляду рівнянь рівноваги. За допомогою принципу Даламбера зручно визначати реакції зв'язків.

Приклад 1. Підняття вантажу масою m (рис. 2.5).

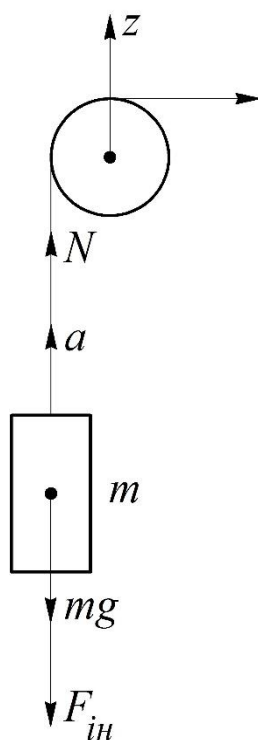


Рис. 2.5. Підняття вантажу

Згідно з принципом Даламбера, після додавання сили інерції система знаходиться в рівновазі або сума проекцій всіх сил на вертикальну вісь z дорівнює нулю, тобто

$$N - m \cdot g - F_{in} = 0, \quad (2.5)$$

або

$$N - m \cdot g - m \cdot a = 0. \quad (2.6)$$

Реакція N визначається за формулою

$$N = m \cdot (g + a). \quad (2.7)$$

Висновок: з отриманого виразу видно, що чим більше прискорення \bar{a} , тим більше реакція N , тому піднімати вантаж великої маси необхідно з меншим прискоренням.

Приклад 2. Рух колеса по нерівності колії (рис. 2.6)

Розглянемо рух одиночного колеса з масою m по абсолютно жорсткій колії. Розрахункова схема має вигляд, показаний на рис. 2.6.

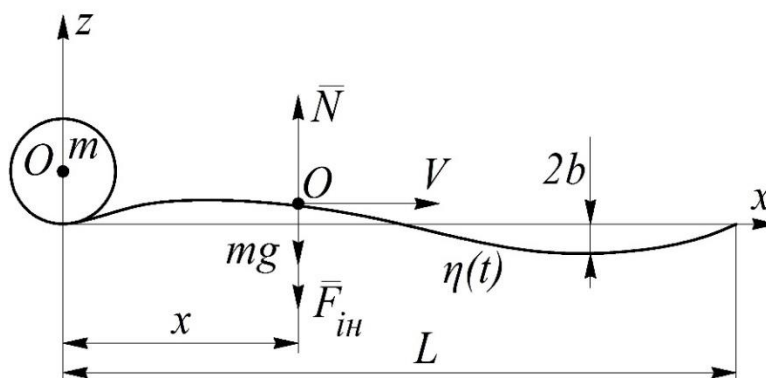


Рис. 2.6. Рух колеса по нерівності:

$2b$ – висота нерівності; x – поточна координата;

V – швидкість руху; m – маса колеса; L – довжина нерівності

Проведеними дослідженнями доведено, що більшість нерівностей мають синусоїдальний і косинусоїдальний характер. Припустимо, що форма нерівності (рис. 2.6) з достатньою точністю описується рівнянням

$$\eta(x) = b \cdot \left(1 - \cos 2 \cdot \pi \cdot \frac{x}{L} \right). \quad (2.8)$$

Позначивши поступальну швидкість колеса через V , пройдений шлях колесом від початку нерівності (поточна координата) визначимо як

$$x = V \cdot t. \quad (2.9)$$

Підставивши значення x у формулу (2.8), отримаємо

$$\eta(x) = b \cdot \left(1 - \cos 2 \cdot \pi \cdot \frac{V}{L} \cdot t \right). \quad (2.10)$$

Так як колія абсолютно жорстка, то при проходженні колеса деформація колії відсутня. У цьому випадку вертикальне переміщення колеса z_k (траєкторія руху колеса) буде визначатися формою нерівності, тобто $z_k = \eta(t)$.

Вертикальна швидкість колеса \dot{z}_k по осі z є перша похідна від його переміщення

$$\dot{z}_k(t) = b \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{V}{L} \cdot \sin 2 \cdot \pi \cdot \frac{V}{L} \cdot t. \quad (2.11)$$

Вертикальне прискорення колеса \ddot{z}_k по осі z є друга похідна від його переміщення

$$\ddot{z}_k(t) = b \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{V}{L} \right)^2 \cdot \cos 2 \cdot \pi \cdot \frac{V}{L} \cdot t. \quad (2.12)$$

Сила інерції колеса визначається за формулою

$$F_{in} = m \cdot a = m \cdot \ddot{z}_k(t) = m \cdot b \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{V}{L} \right)^2 \cdot \cos 2 \cdot \pi \cdot \frac{V}{L} \cdot t. \quad (2.13)$$

Використовуючи принцип Даламбера, складемо рівняння рівноваги сил, показаних на рис. 2.6:

$$N - m \cdot g - F_{in} = 0, \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} N &= m \cdot g + F_{in} = m \cdot g + m \cdot \ddot{z}_k(t) = m \cdot (g + \ddot{z}_k(t)) = \\ &= m \cdot \left[g + b \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{V}{L} \right)^2 \cdot \cos 2 \cdot \pi \cdot \frac{V}{L} \cdot t \right]. \end{aligned} \quad (2.15)$$

З отриманого виразу видно, що реакція впливу колеса на колію буде залежати від маси колісної пари, закону зміни нерівності, а саме від параметрів L і b і швидкості руху колеса.

2.2.2. Динамічна модель екіпажа

Для дослідження динамічних властивостей екіпажа складають його механічну модель з твердих або таких, що деформується, тіл, з'єднаних за допомогою тих чи інших елементів, при цьому вказують геометричні характеристики екіпажа. Користуючись методами механіки, виконують математичний опис моделі у вигляді системи диференціальних рівнянь її руху [34, 36].

Механіко-математичною або *динамічною моделлю* називають механічну модель локомотива, описану системою диференціальних рівнянь. Динамічна модель повинна відображати основні властивості розглянутої системи в такій мірі, щоб з її допомогою можна було з необхідною точністю оцінити динамічні якості екіпажа.

Модель екіпажа має набір таких параметрів:

- інерційні характеристики (маси окремих тіл і їх моменти інерції);
- характеристики елементів з'єднань (жорсткості і показники демпфірування);
- геометричні розміри.

Модель конкретизується залежно від поставленого завдання, тобто вона багато в чому визначається «вихідними» процесами, досліджуваними в даній задачі. При дослідженні коливань локомотивів для спрощення розрахунків застосовуються розрахункові схеми або динамічні моделі з різним ступенем деталізації (числом ступенів свободи або числом незалежних змінних).

Положення механічної системи може визначатися *набором k незалежних параметрів* різної фізичної та кінематичної природи, до яких відносяться:

- декартові координати точок;
- відстані, відлічувані по траєкторії;
- кути повороту.

Число k називають **числом ступенів свободи**, а самі параметри – **узагальненими координатами** q .

Число ступенів свободи – це число додаткових зв'язків, які необхідно накласти на систему, щоб зробити рівними нулю всі можливі переміщення. Найпростішою динамічною моделлю є модель з одним ступенем свободи.

2.2.3. Складання рівнянь вертикальних коливань моделі з одним ступенем свободи при кінематичному збуренні

Розрахункова схема динамічної моделі з одним ступенем свободи ($k = 1$) при кінематичному збуренні показана на рис. 2.7. Колія вважається абсолютно жорсткою. Дана модель дозволяє оцінити особливості динамічних властивостей, визначених її структурою і характером збурення, а також намітити шляхи забезпечення віброзахисту локомотива.

Дана модель у першому наближенні відповідає рухомому складу з двоступінчастим ресорним підвішуванням. Маса m на розрахунковій схемі відповідає сумі мас кузова і візків, а жорсткість \mathcal{J} і коефіцієнт гасіння β є еквівалентними характеристиками ресорного підвішування.

Під час руху системи кінематичне збурення викликає вертикальні коливання надресорної будови, які характеризуються однією узагальненою координатою $q_1 = z$ (підстрибування). В системі діють сили:

- інерції

$$F_{in} = -m \cdot \ddot{z}; \quad (2.16)$$

- пружна

$$F_n = -\mathcal{J} \cdot \Delta = -\mathcal{J} \cdot (z - \eta); \quad (2.17)$$

- дисипативна

$$F_\delta = -\beta \cdot \dot{\Delta} = -\beta \cdot (\dot{z} - \dot{\eta}). \quad (2.18)$$

З використанням принципу Даламбера рівняння коливань розглянутої динамічної моделі записується як

$$F_{in} + F_n + F_d = 0. \quad (2.19)$$

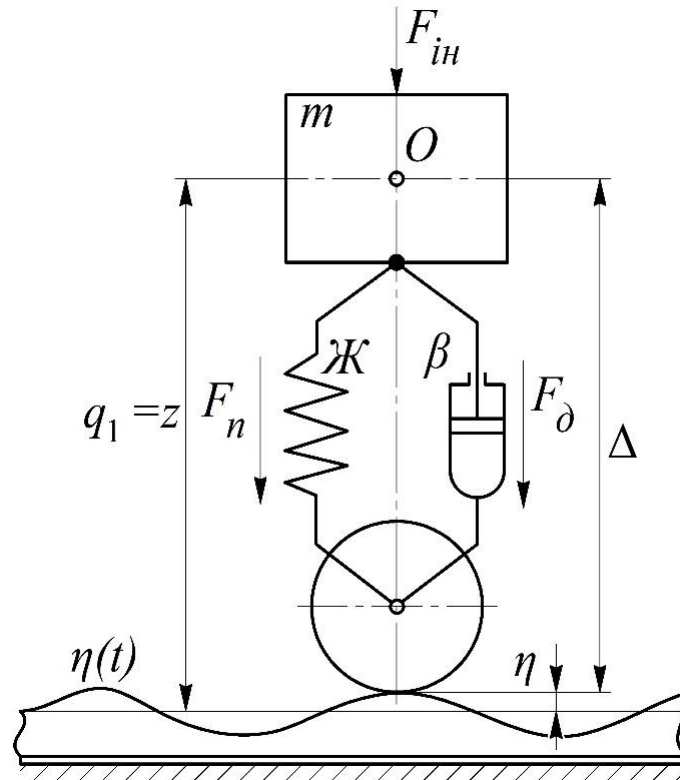


Рис. 2.7. Плоска модель з одним ступенем свободи при кінематичному збуренні:

\mathcal{J} – жорсткість пружного зв’язку; β – коефіцієнт гасіння гасителя; η – амплітуда нерівності; m – маса, що припадає на одне колесо; z – абсолютне переміщення; Δ – відносне переміщення (прогин)

З урахуванням формул (2.16)-(2.18) рівняння коливань набуде вигляду:

$$m \cdot \ddot{z} + \mathcal{J} \cdot (z - \eta) + \beta \cdot (\dot{z} - \dot{\eta}) = 0. \quad (2.20)$$

Перетворимо отримане рівняння, перенесши в праву частину члени зі збурюючою дією:

$$m \cdot \ddot{z} + \beta \cdot \dot{z} + \mathcal{J} \cdot z = \beta \cdot \dot{\eta} + \mathcal{J} \cdot \eta. \quad (2.21)$$

Отримане рівняння являє собою рівняння вертикальних коливань моделі (коливань підстрибування) з одним ступенем свободи, ліва частина якого – власні коливання, а права – змушені (так як права частина – сила від кінематичного збурення).

Розв'язання рівняння коливань дозволить отримати значення вертикальних *переміщень* z , *швидкостей* \dot{z} і *прискорень* \ddot{z} маси m і приблизно оцінити динамічні властивості моделі.

2.2.4. Рівняння коливань моделі з одним ступенем свободи при силовому збуренні

Вертикальні коливання маси m можуть виникати не тільки в результаті руху колеса по нерівностям рейки, але і в тому випадку якщо на зазначену масу діє зовнішня збурювальна сила F_z , що з'являється при роботі мотор-компресорів, мотор-вентиляторів, дизельної установки та інших елементів обладнання. У цьому випадку має місце силовий спосіб задання збурення і відповідна розрахункова схема (рис. 2.8). Прийнято, що кінематичне збурення відсутнє, а закон зміни силового збурення F_z в часі заданий.

Згідно з принципом Даламбера, рівняння вертикальних коливань динамічної моделі має вигляд

$$F_{in} + F_n + F_\delta + F_z = 0. \quad (2.22)$$

Так як кінематичне збурення відсутнє ($\eta = 0$), то пружна і дисипативна сили визначаються відповідно за формулами

$$F_n = -\mathcal{J} \cdot \Delta = -\mathcal{J} \cdot z, \quad (2.23)$$

$$F_\delta = -\beta \cdot \dot{\Delta} = -\beta \cdot \dot{z}. \quad (2.24)$$

Сила інерції визначається за формулою (2.16). Підставим вирази (2.16), (2.23) і (2.24) в рівняння коливань (2.22). Отримаємо таке остаточне рівняння:

$$m \cdot \ddot{z} + \beta \cdot \dot{z} + \mathcal{J} \cdot z = F_3. \quad (2.25)$$

Розв'язання даного рівняння дозволяє вирішувати завдання віброзахисту силового обладнання локомотивів від обертання незбалансованих частин.

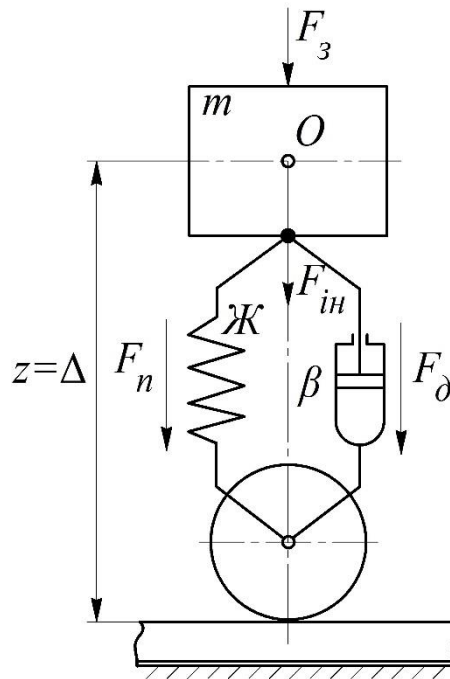


Рис. 2.8. Плоска модель з одним ступенем свободи при силовому збуренні:

\mathcal{J} – жорсткість пружного зв'язку; β – коефіцієнт гасіння гасителя; m – маса, що припадає на одне колесо;
 z – абсолютне переміщення; Δ – відносне переміщення (прогин)

2.2.5. Рівняння коливань моделі плоского двохосьового екіпажа

Користуючись такою моделлю, можна отримати більш детальну інформацію про динамічні властивості локомотива. З'являється можливість врахувати, крім підстрибування, ще й коливання галопування, а також неодноразовість задання (запізнювання) збурення під дві колісні пари.

Складемо рівняння коливань плоскої моделі двовісного візка (рис. 2.9). У моделі маса m (візок) здійснює коливання

підстрибування z і галопування φ_y . Причиною коливань є збурення $\eta_1(t)$ і $\eta_2(t)$, що передаються через першу і другу колісні пари. Під час руху екіпажа з поступальною швидкістю V нерівність $\eta_1(t)$ повторює нерівність $\eta_2(t)$ через деякий час τ , який називається **транспортним запізненням**. Цей час визначається швидкістю руху V і відстанню між осями колісних пар $2 \cdot a_m$, тобто

$$\tau = \frac{2 \cdot a_m}{V}. \quad (2.26)$$

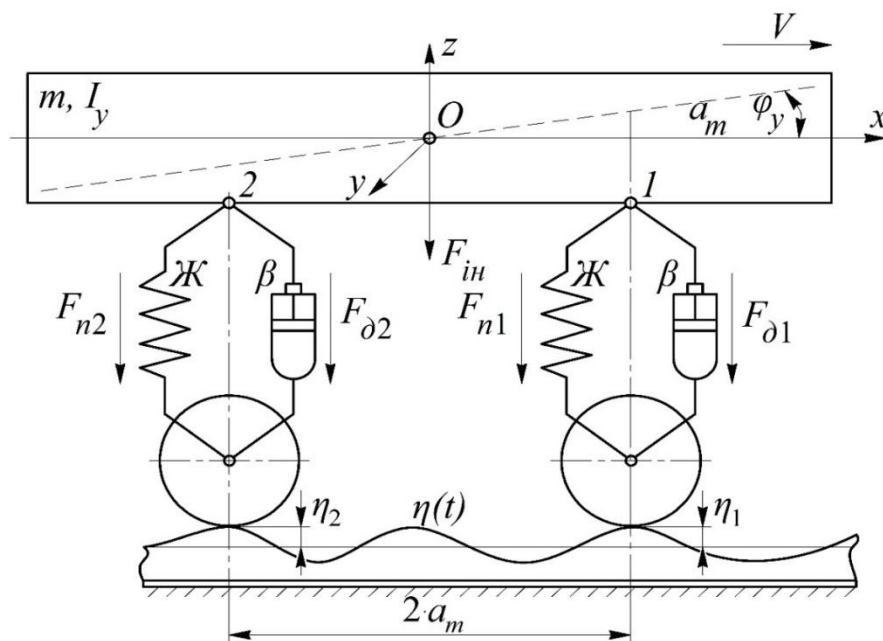


Рис. 2.9. Плоска модель двовісного екіпажа

Тому вирази для нерівностей під першою та другою колісними парами можна записати в такому вигляді:

$$\eta_1(t) = \eta(t), \quad (2.27)$$

$$\eta_2(t) = \eta \cdot (t - \tau), \quad (2.28)$$

де $\eta(t)$ – одинична збурююча вхідна дія.

Рівняння коливання підстрибування з використанням принципу Даламбера має такий вигляд:

$$F_{in} + F_{n1} + F_{\partial 1} + F_{n2} + F_{\partial 2} = 0. \quad (2.29)$$

Переміщення в точках 1 і 2 складаються з коливань підстрибування z і вертикальних складових кутових коливань галопування φ_y (рис. 2.9), тобто

$$z_1 = z + a_m \cdot \sin \varphi_y, \quad (2.30)$$

$$z_2 = z - a_m \cdot \sin \varphi_y. \quad (2.31)$$

З урахуванням малості кута φ_y , тобто $\sin \varphi_y = \varphi_y$, вирази (2.30) і (2.31) набудуть такого вигляду:

$$z_1 = z + a_m \cdot \varphi_y, \quad (2.32)$$

$$z_2 = z - a_m \cdot \varphi_y. \quad (2.33)$$

Сили, що входять в рівняння вертикальних коливань (2.29), з урахуванням формул (2.32) і (2.33) визначаються як

$$F_{in} = -m \cdot \ddot{z}, \quad (2.34)$$

$$F_{n1} = -\mathcal{J} \cdot \Delta_1 = -\mathcal{J} \cdot (z_1 - \eta_1) = -\mathcal{J} \cdot (z + a_m \cdot \varphi_y - \eta_1), \quad (2.35)$$

$$F_{\partial 1} = -\beta \cdot \dot{\Delta}_1 = -\beta \cdot (\dot{z}_1 - \dot{\eta}_1) = -\beta \cdot (\dot{z} + a_m \cdot \dot{\varphi}_y - \dot{\eta}_1), \quad (2.36)$$

$$F_{n2} = -\mathcal{J} \cdot \Delta_2 = -\mathcal{J} \cdot (z_2 - \eta_2) = -\mathcal{J} \cdot (z - a_m \cdot \varphi_y - \eta_2), \quad (2.37)$$

$$F_{\partial 2} = -\beta \cdot \dot{\Delta}_2 = -\beta \cdot (\dot{z}_2 - \dot{\eta}_2) = -\beta \cdot (\dot{z} - a_m \cdot \dot{\varphi}_y - \dot{\eta}_2). \quad (2.38)$$

Підставимо вирази (2.34)-(2.38) в рівняння вертикальних коливань (2.29), отримаємо

$$\begin{aligned}
& m \cdot \ddot{z} + \mathcal{K} \cdot (z + a_m \cdot \varphi_y - \eta_1) + \beta \cdot (\dot{z} + a_m \cdot \dot{\varphi}_y - \dot{\eta}_1) + \\
& + \mathcal{K} \cdot (z - a_m \cdot \varphi_y - \eta_2) + \beta \cdot (\dot{z} - a_m \cdot \dot{\varphi}_y - \dot{\eta}_2) = 0. \quad (2.39)
\end{aligned}$$

Розкриваючи дужки і виконуючи перетворення з подібними доданками, отримаємо остаточне рівняння коливання підстрибування

$$m \cdot \ddot{z} + 2 \cdot \beta \cdot \dot{z} + 2 \cdot \mathcal{K} \cdot z = \beta \cdot (\dot{\eta}_1 + \dot{\eta}_2) + \mathcal{K} \cdot (\eta_1 + \eta_2). \quad (2.40)$$

Для виведення рівняння коливання галопування необхідно скласти рівняння моментів щодо осі y , що проходить через центр тяжіння екіпажа O . Рівняння буде мати такий вигляд:

$$M_{in} + M_{n1} + M_{\partial 1} - M_{n2} - M_{\partial 2} = 0. \quad (2.41)$$

Моменти, що входять в рівняння (2.41), визначаються за формулами

$$M_{in} = -I_y \cdot \ddot{\varphi}_y, \quad (2.42)$$

де I_y – момент інерції маси m відносно осі y ,

$$M_{n1} = F_{n1} \cdot a_m = -\mathcal{K} \cdot z \cdot a_m - \mathcal{K} \cdot a_m^2 \cdot \varphi_y + \mathcal{K} \cdot \eta_1 \cdot a_m, \quad (2.43)$$

$$M_{\partial 1} = F_{\partial 1} \cdot a_m = -\beta \cdot \dot{z} \cdot a_m - \beta \cdot a_m^2 \cdot \dot{\varphi}_y + \beta \cdot \dot{\eta}_1 \cdot a_m, \quad (2.44)$$

$$M_{n2} = F_{n2} \cdot a_m = -\mathcal{K} \cdot z \cdot a_m + \mathcal{K} \cdot a_m^2 \cdot \varphi_y + \mathcal{K} \cdot \eta_2 \cdot a_m, \quad (2.45)$$

$$M_{\partial 2} = F_{\partial 2} \cdot a_m = -\beta \cdot \dot{z} \cdot a_m + \beta \cdot a_m^2 \cdot \dot{\varphi}_y + \beta \cdot \dot{\eta}_2 \cdot a_m. \quad (2.46)$$

Підставимо вирази (2.42)-(2.46) у рівняння коливання галопування (2.41) і, виконуючи перетворення з подібними доданками, як це зроблено в рівнянні підстрибування, отримаємо остаточне рівняння коливання галопування

$$I_y \cdot \ddot{\phi}_y + 2 \cdot a_m^2 \cdot \beta \cdot \dot{\phi}_y + 2 \cdot a_m^2 \cdot \mathcal{K} \cdot \phi_y =$$

$$= \beta \cdot a_m \cdot (\dot{\eta}_1 - \dot{\eta}_2) + \mathcal{K} \cdot a_m \cdot (\eta_1 - \eta_2). \quad (2.47)$$

Таким чином, коливання розглянутої моделі описуються двома рівняннями (2.40) і (2.47). Як видно з цих рівнянь, коливання галоупування і підстрибування візка не пов'язані. Ця модель дозволяє отримати різні значення прискорень і переміщень по довжині екіпажа і різні показники динаміки в комплектах ресорного підвішування, що в більшій мірі відповідає реальним схемам.

Питання для самоконтролю

1. У чому полягає сутність принципу Даламбера?
2. Що розуміється під силою інерції?
3. Від яких параметрів залежить реакція на колію під час руху одиночного колеса?
4. Що називають динамічною моделлю екіпажної частини?
5. Якими параметрами характеризується динамічна модель?
6. Що називають числом ступенів свободи?
7. Що називають узагальненими координатами?
8. Як визначаються пружні і дисипативні сили в моделі з одним ступенем свободи?
9. Якою узагальненою координатою характеризуються коливання моделі з одним ступенем свободи?
10. Чому, використовуючи модель з одним ступенем свободи, можна тільки наближено оцінити її динамічні властивості?
11. Що є причиною сильного збурення?
12. Які завдання вирішуються при силовому способі задання збурення?
13. Які особливості дозволяє враховувати плоска модель двовісного екіпажа?
14. Які види коливань дозволяє досліджувати плоска модель?
15. Що називають транспортним запізненням і від яких параметрів воно залежить?

2.3. ВІЛЬНІ КОЛИВАННЯ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

2.3.1. Загальні положення

Вільні коливання динамічних систем виникають за відсутності змінної зовнішнього впливу внаслідок однократно прикладеної і більше не повторюваної дії. Вільні коливання рейкових екіпажів з'являються при проведенні досліду щодо скидання екіпажа з клинів, при ударі колеса з «повзуном» по рейці і т. д. Скидання з клинів виконують для отримання інформації про пружні і дисипативні властивості ресорного підвішування екіпажа. При проходженні ізольованої нерівності одночасно відбуваються як вільні, так і змушені коливання.

Після одноразової дії передбачається, що система починає рухатися відносно до положення рівноваги. Досліджувати вільні коливання будемо на прикладі лінійної моделі з одним ступенем свободи.

2.3.2. Вільні коливання в недемпферованій системі

Нагадаємо основні результати, отримані при складанні рівнянь коливань для лінійної системи з одним ступенем свободи. Коливання підстрибування описуються рівнянням (2.21), яке має вигляд

$$m \cdot \ddot{z} + \beta \cdot \dot{z} + \mathcal{K} \cdot z = \beta \cdot \dot{\eta} + \mathcal{K} \cdot \eta.$$

Умовою вільних коливань є рівність нулю правої частини даного рівняння, тобто $\eta = 0$, $\dot{\eta} = 0$ (зовнішнє збурення відсутнє), і приймаючи $\beta = 0$, отримаємо таке рівняння:

$$m \cdot \ddot{z} + \mathcal{K} \cdot z = 0. \quad (2.48)$$

Розділивши обидва члени на масу m і прийнявши $\omega_s = \sqrt{\frac{\mathcal{K}}{m}}$, отримаємо

$$\ddot{z} + \omega_g^2 \cdot z = 0, \quad (2.49)$$

де ω_g – *власна (кругова) частота* недемпферованої системи, що є внутрішнім параметром системи.

Це рівняння описує коливальний процес з частотою ω_g . Розв'язання даного рівняння при початкових умовах $z(0) = z_0$ і $\dot{z}(0) = 0$ буде мати вигляд

$$z(t) = z_0 \cdot \cos \omega_g \cdot t, \quad (2.50)$$

де z_0 – амплітуда початкової дії.

Графік функції $z(t)$ для вихідних даних: $m = 5$ т, $J = 1500$ кН/м і початковою дією $z(0) = z_0 = 0,1$, $\dot{z}(0) = 0$ буде мати вигляд, показаний на рис. 2.10.

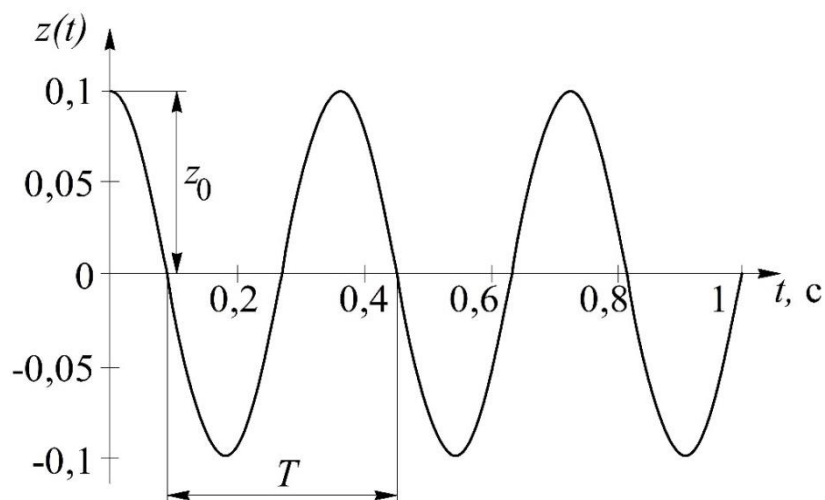


Рис. 2.10. Вільні коливання в системі без гасителя

Періодом коливань T називають мінімальний проміжок часу, за який система робить повний цикл коливань, після якого рух повторюється.

Під *амплітудою коливань* розуміється модуль найбільшого за півперіод відхилення системи від положення рівноваги.

Система з одним ступенем свободи, будучи виведена з положення рівноваги малим збуренням, необмежено довго буде здійснювати гармонічні коливання.

2.3.3. Вільні коливання в системі з гідравлічним гасителем

Розглянемо теоретичні основи демпфірування стосовно моделі з одним ступенем свободи.

Диференціальне рівняння вільних коливань даної моделі ($\eta = 0, \dot{\eta} = 0$) з урахуванням демпфірування має вигляд

$$m \cdot \ddot{z} + \beta \cdot \dot{z} + \mathcal{J} \cdot z = 0. \quad (2.51)$$

Розділивши всі члени рівняння на масу m , отримаємо

$$\ddot{z} + 2 \cdot n \cdot \omega_g \cdot \dot{z} + \omega_g^2 \cdot z = 0, \quad (2.52)$$

де n – *коефіцієнт відносного затухання*, який визначається за формулою

$$n = \frac{\beta}{\beta_{кр}}, \quad (2.53)$$

де $\beta_{кр}$ – *коефіцієнт критичного затухання*, тобто найменше значення коефіцієнта затухання, при якому рух системи перестав бути коливальним.

При $\beta < \beta_{кр}$ або $n < 1$ вільний рух системи носить *коливальний* характер, при $\beta > \beta_{кр}$ або $n > 1$ рух перестав бути коливальним і стає *аперіодичним*.

Коефіцієнт критичного затухання визначається як

$$\beta_{кр} = 2 \cdot \sqrt{m \cdot \mathcal{J}}. \quad (2.54)$$

Записавши рішення рівняння (2.52) у вигляді

$$z(t) = D \cdot e^{p \cdot t}, \quad (2.55)$$

отримаємо характеристичне рівняння

$$p^2 + 2 \cdot n \cdot \omega_g \cdot p + \omega_g^2 = 0. \quad (2.56)$$

Корені даного характеристичного рівняння визначаються за формулою

$$p_{1,2} = -n \cdot \omega_g \pm \sqrt{n^2 \cdot \omega_g^2 - \omega_g^2}. \quad (2.57)$$

Залежно від співвідношення n і ω_g можливі три випадки.

Випадок малого опору в системі $n < \omega_g$ або $n < 1$. Під коренем вийде негативне число. Винесемо з під кореня ω_g і введемо уявну одиницю $\sqrt{-1} = j$, отримаємо

$$p_{1,2} = -n \cdot \omega_g \pm j \cdot \omega_c \cdot \sqrt{1 - n^2} = -\alpha \pm j \cdot \omega_c, \quad (2.58)$$

де $\alpha = n \cdot \omega_g$ – ступінь загасання;

$\omega_c = \omega_g \cdot \sqrt{1 - n^2}$ – частота вільних коливань демпфированих системи.

З урахуванням введених позначень і наявності двох коренів загальне розв'язання рівняння (2.52) запишемо в такому вигляді

$$z(t) = D_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + D_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}. \quad (2.59)$$

Підставимо в дане рівняння значення коренів і отримаємо

$$\begin{aligned} z(t) &= D_1 \cdot e^{(-\alpha + j \cdot \omega_c) \cdot t} + D_2 \cdot e^{(-\alpha - j \cdot \omega_c) \cdot t} = \\ &= (D_1 \cdot e^{j \cdot \omega_c \cdot t} + D_2 \cdot e^{-j \cdot \omega_c \cdot t}) \cdot e^{-\alpha \cdot t}. \end{aligned} \quad (2.60)$$

Вважаючи, що D_1 і D_2 в загальному випадку є комплексними числами, і використовуючи формулу Ейлера для переходу від показникової до алгебраїчної форми, одержимо

$$z(t) = D \cdot e^{-\alpha \cdot t} \cdot \cos(\omega_c \cdot t + \varphi), \quad (2.61)$$

де D і φ – сталі, що визначаються з початкових умов.

Для вихідних даних $m = 5$ т, $\mathcal{K} = 1500$ кН/м і початковою дією $z(0) = z_0 = 0,1$, $\dot{z}(0) = 0$, $\beta_{кр} = 173$ кНс/м. Прийmemo коефіцієнт дисипації гасителя менше, ніж $\beta_{кр}$, а саме – $\beta = 40$ кНс/м. Графік коливань матиме вигляд, показаний на рис. 2.11.

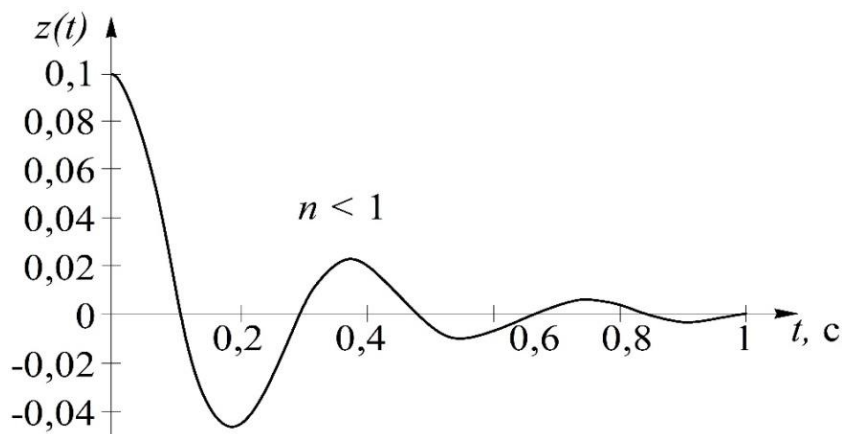


Рис. 2.11. Вільні коливання в системі з гасителем за умови $\beta < \beta_{кр}$

Отриманий вираз $z(t)$ описує коливання з амплітудою, спадної за експоненціальним законом з власною частотою ω_c , меншою, ніж ω_g , тобто **сили опору збільшують період коливань**.

Випадок великого опору в системі $n > \omega_g$ або $n > 1$.

У цьому випадку корені $p_{1,2}$ характеристичного рівняння (2.57) виходять дійсними і негативними. Так як корені негативні, то з плином часу $z(t)$ буде спадати за аперіодичним законом. Для аналогічних вихідних даних, але з коефіцієнтом дисипації

гасителя $\beta = 180$ кНс/м, більшим, ніж $\beta_{кр}$, графік функції $z(t)$ матиме вигляд, показаний на рис. 2.12.

З графіка видно, що амплітуда коливань швидко убуває до нуля. Це пояснюється тим, що велике відносне затухання (коефіцієнт n), а отже, і коефіцієнт дисипації гасителя β .

Випадок критичного опору в системі $n = \omega_g$ або $n = 1$.

Даний випадок можна розглядати як різновид випадку з великим затуханням, при цьому корені рівняння (2.57) отримуємо дійсними, негативними і кратними. Характер зміни функції цього процесу буде аналогічний графіку на рис. 2.12.

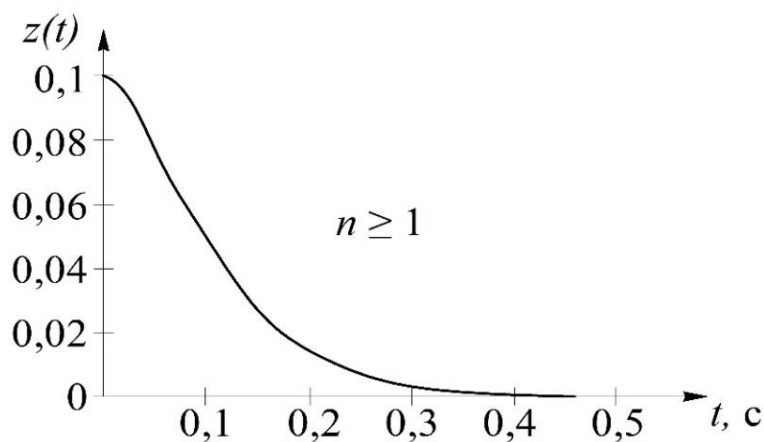


Рис. 2.12. Вільні коливання в системі з гасителем за умови $\beta > \beta_{кр}$

2.3.4. Матрична форма запису рівнянь коливань в загальному вигляді

Динамічні моделі реальних локомотивів, з точки зору механіки, являють собою системи з великим числом ступенів свободи. Розглянемо систему з k ступенями свободи (з кінцевим числом ступенів свободи). Коливання такої системи описуються системою диференціальних рівнянь загальним числом k .

Таку систему зручно записувати в матричній формі. У загальному вигляді система диференціальних рівнянь може бути записана в так званій прямій формі

$$M \cdot \ddot{\vec{q}} + B \cdot \dot{\vec{q}} + \mathcal{J} \cdot \vec{q} = \vec{Q}, \quad (2.62)$$

де M – інерційна матриця; B – дисипативна матриця; \mathcal{J} – матриця жорсткості; \vec{Q} – вектор узагальнених сил, що залежать від швидкості руху та еквівалентної геометричної нерівності (матриця нерівностей); $\ddot{\vec{q}}$ – матриця-стовпець (вектор) прискорень узагальнених координат; $\dot{\vec{q}}$ – матриця-стовпець (вектор) швидкостей узагальнених координат; \vec{q} – матриця-стовпець (вектор) узагальнених координат.

M , B і \mathcal{J} – квадратні матриці розміром $k \times k$.

Праву частину можна розглядати і як прямокутну матрицю з числом стовпців, що дорівнює кількості незалежних комбінацій збурення. Якщо вважати кінематичні збурення по лівій і правій рейковій нитці незалежними, то таких стовпців буде два. У цьому випадку у лівій частині рівняння (2.62) замість стовпців узагальнених координат, швидкостей і прискорень також будуть матриці розміром $k \times 2$.

Якщо збурення по обидві рейкові нитки однакові, то вектор узагальнених сил знаходять шляхом лінійного перетворення еквівалентної геометричної нерівності, тобто

$$Q = L_k \cdot \eta + L_{\dot{k}} \cdot \dot{\eta}, \quad (2.63)$$

де η і $\dot{\eta}$ – вектори розміром $k \times 1$, елементи яких складаються з ординат нерівності і її похідної відповідно; L_k і $L_{\dot{k}}$ – матриці розміром $k \times k$ перетворень кінематичного збурення в узагальнені сили, елементи яких залежать від параметрів екіпажа.

У цьому випадку модель екіпажа можна звести до плоскої. Матричну форму запису рівнянь зручно використовувати в динамічних моделях з кількістю ступенів свободи $k > 1$.

2.3.5. Принцип складання рівнянь коливань в матричній формі на прикладі одновісної моделі з двома ступенями свободи

Розглянемо принцип складання рівнянь коливань в матричній формі на прикладі одновісної моделі з двома ступенями свободи (рис. 2.13). Така модель використовується при дослідженні спільних коливань підстрибування кузова і візків під час руху по абсолютно жорсткій колії рухомого складу, що має два ступені підвішування. У моделі маса m_1 – сумарна маса всіх візків локомотива, маса m_2 – маса кузова. Кожна з мас може здійснювати вертикальні коливання, тому система має два ступені свободи. Пружина з жорсткістю \mathcal{J}_1 і гаситель з коефіцієнтом затухання β_1 еквівалентні буксовому підвішуванню, а пружина і гаситель з характеристиками: \mathcal{J}_2 і β_2 – центральному підвішуванню.

Розглянемо коливання динамічної системи при кінематичному збуренні. Складемо рівняння сил, що діють на кожну масу, відповідно до принципу Даламбера. Для цього необхідно по черзі зафіксувати («подумки закріпити») кожну масу.

Для маси m_1 при фіксуванні m_2 рівняння діючих сил буде мати вигляд

$$F_{in1} + F_{n1} + F_{\partial 1} - F_{n2} - F_{\partial 2} = 0. \quad (2.64)$$

Аналогічно фіксуючи m_1 , одержимо рівняння для маси m_2

$$F_{in2} + F_{n2} + F_{\partial 2} = 0. \quad (2.65)$$

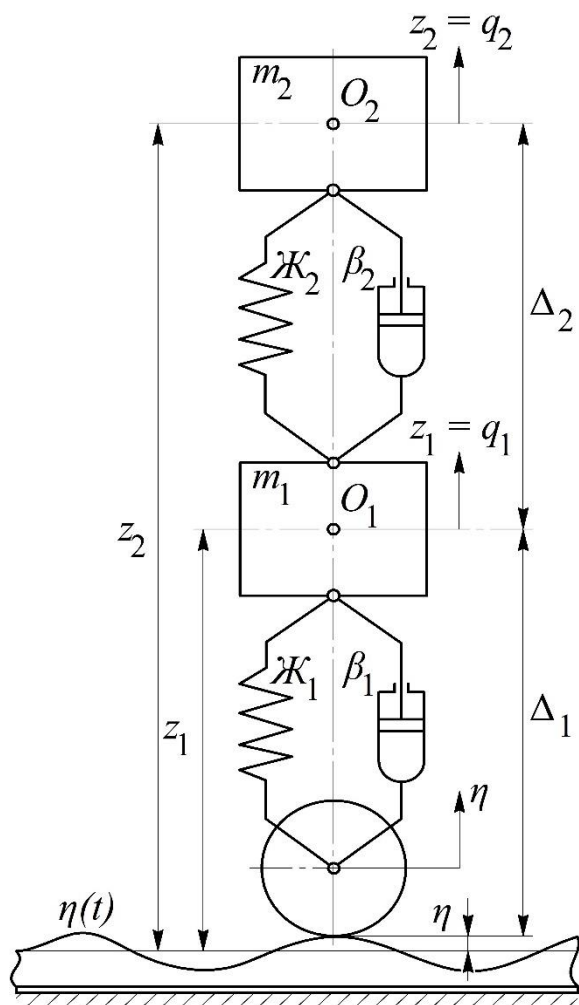


Рис. 2.13. Лінійна одновісна модель як система з двома ступенями свободи

Вирази для сил, що входять до рівнянь (2.64) і (2.65), з урахуванням того, що $\Delta_1 = z_1 - \eta$ і $\Delta_2 = z_2 - z_1$, мають вигляд

$$F_{in1} = -m_1 \cdot \ddot{z}_1, \quad (2.66)$$

$$F_{in2} = -m_2 \cdot \ddot{z}_2, \quad (2.67)$$

$$F_{n1} = -\mathcal{J}_1 \cdot \Delta_1 = -\mathcal{J}_1 \cdot (z_1 - \eta), \quad (2.68)$$

$$F_{d1} = -\beta_1 \cdot \dot{\Delta}_1 = -\beta_1 \cdot (\dot{z}_1 - \dot{\eta}), \quad (2.69)$$

$$F_{n2} = -\mathcal{J}_2 \cdot \Delta_2 = -\mathcal{J}_2 \cdot (z_2 - z_1), \quad (2.70)$$

$$F_{\partial 2} = -\beta_2 \cdot \dot{\Delta}_2 = -\beta_2 \cdot (\dot{z}_2 - \dot{z}_1). \quad (2.71)$$

Підставляючи вирази (2.66)-(2.71) в рівняння (2.64) і (2.65), отримаємо рівняння коливань динамічної моделі.

Для маси m_1 маємо

$$\begin{aligned} m_1 \cdot \ddot{z}_1 + (\beta_1 + \beta_2) \cdot \dot{z}_1 + (\mathcal{J}_1 + \mathcal{J}_2) \cdot z_1 - \\ - \beta_2 \cdot \dot{z}_2 - \mathcal{J}_2 \cdot z_2 = \beta_1 \cdot \dot{\eta} + \mathcal{J}_1 \cdot \eta. \end{aligned} \quad (2.72)$$

Для маси m_2 маємо

$$-\beta_2 \cdot \dot{z}_1 - \mathcal{J}_2 \cdot z_1 + m_2 \cdot \ddot{z}_2 + \beta_2 \cdot \dot{z}_2 + \mathcal{J}_2 \cdot z_2 = 0. \quad (2.73)$$

Отримані рівняння коливань в сукупності являють собою систему диференціальних рівнянь (в даному випадку їх два, так як $k=2$). Як видно з цієї системи рівнянь, коливання обох мас пов'язані, так як в обидва рівняння входять узагальнені координати переміщень z , швидкостей \dot{z} і прискорень \ddot{z} . Між координатами цієї системи є пружно-дисипативний зв'язок. Запишемо систему в матричній формі.

Правила запису в матричну форму

1. Записуються отримані рівняння в систему, при цьому в кожному рівнянні на першому місці стоять члени, що відносяться до координати z_1 , починаючи з похідної найбільшого порядку.

2. Заготовлюються форми матриць M , B і \mathcal{J} розміром $k \times k$ (у прикладі, що розглядається, 2×2), а матриць $\dot{q} = \ddot{z}$, $q = \dot{z}$, $q = z$ розміром $k \times 1$ (у прикладі, що розглядається, 2×1).

3. Заповнюються матриці, починаючи з координати \ddot{z}_1 , далі \ddot{z}_2 і т. д. $\dot{z}_1 - \dot{z}_2$, $z_1 - z_2$.

Для прикладу, що розглядається, рівняння коливань (2.72) і (2.73) в матричній формі будуть мати такий вигляд:

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix}}_M \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \end{pmatrix}}_{\dot{q}} + \underbrace{\begin{pmatrix} \beta_1 + \beta_2 & -\beta_2 \\ -\beta_2 & \beta_2 \end{pmatrix}}_B \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{pmatrix}}_{\dot{q}} + \\
& + \underbrace{\begin{pmatrix} \mathcal{K}_1 + \mathcal{K}_2 & -\mathcal{K}_2 \\ -\mathcal{K}_2 & \mathcal{K}_2 \end{pmatrix}}_Z \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix}}_q = \\
& = \underbrace{\begin{pmatrix} \beta_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}}_{L_k} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \dot{\eta} \\ 0 \end{pmatrix}}_{\dot{\eta}} + \underbrace{\begin{pmatrix} \mathcal{K}_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}}_{L_k} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \eta \\ 0 \end{pmatrix}}_{\eta}. \tag{2.74}
\end{aligned}$$

Матриця M є діагональною, якщо відсутні інерційні зв'язки між координатами. При наявності цих зв'язків у матриці з'являться елементи, які не стоять по діагоналі.

Матриці B і Z є пропорційними, якщо гідравлічні гасителі стоять паралельно кожному пружному елементу (пружині).

Відхилення будь-якої з мас за своєю координатою викликає появу пружних і дисипативних сил, що перешкоджають цьому відхиленню. Тому така система є стійкою. Крім того, якщо задати початкове відхилення будь-якої з мас, то коливальний рух буде згасаючим через наявність гасителів. Тому у вертикальній площині коливання будь-якого екіпажа є стійкими.

Питання для самоконтролю

1. В результаті чого можуть з'явитися вільні коливання?
2. Як визначається власна частота недемпферованої системи?
3. Що називають періодом коливань?
4. Що називається амплітудою коливань?
5. Що означає коефіцієнт відносного згасання і як він визначається?

6. Що означає коефіцієнт критичного затухання і як він визначається?
7. Які процеси будуть спостерігатися в системі за умови $n < 1$?
8. Які процеси будуть спостерігатися в системі за умови $n > 1$?
9. Якими параметрами характеризується система, що має гаситель коливань?
10. Як впливає жорсткість ресорного підвішування на частоту вільних коливань?
11. Як впливає маса екіпажа на частоту вільних коливань?
12. Як впливають початкові умови на характеристики вільних коливань?
13. Як записується система диференціальних рівнянь в матричній формі (у загальному вигляді)?
14. Від чого залежить розмір матриць M , B і J ?
15. Як враховується особливість незалежності збурення по лівій і правій рейці?
16. Що дозволяє досліджувати модель з двома ступенями свободи?
17. У чому полягає правило запису в матричну форму?
18. У якому випадку матриці B і J будуть пропорційними?

2.4. ЗМУШЕНІ КОЛИВАННЯ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

2.4.1. Поняття про збурений рух і методи дослідження змушених коливань

Динамічні моделі реальних локомотивів, з точки зору механіки, являють собою системи з великим числом ступенів свободи. Якщо зовнішній вплив являє собою процес кінцевої або нескінченної тривалості, то рух системи називають *змушеним*. При кінцевому часі зовнішнього впливу в лінійній системі відбуваються *несталі коливання* (рух по одиночній нерівності кінцевої довжини, рух в перехідній кривій, зрушення з місця і гальмування). При нескінченному часі дії збурень у механічній системі можуть виникати *сталі коливання* (під час безперервного руху протягом тривалого часу по колії з геометричними нерівностями). При розгляді сталих процесів руху в системі з демпфуванням вважається, що всі перехідні процеси, обумовлені вільними коливаннями, припинилися (затухли). Реакцію системи на вхідне збурення описують змушені коливання системи. Вони являють собою частинний розв'язок системи неоднорідних рівнянь (тобто з правою частиною), що перетворюють дану систему в тотожність

$$M \cdot \ddot{\vec{q}} + B \cdot \dot{\vec{q}} + \mathcal{J} \cdot \vec{q} = \vec{Q}. \quad (2.75)$$

Для знаходження \vec{q} (узагальнених координат) використовуються такі методи:

1) *аналітичне розв'язання*, тобто безпосередній підбір аналітичного виразу \vec{q} , що перетворює систему (2.1) в тотожність. Застосовується при $k \leq 2$;

2) *інтегрування системи* рівнянь (2.75) на ЕОМ. Використовують для лінійних і нелінійних систем при будь-якому k . При цьому генерують заданий вид збурення \vec{Q} і, інтегруючи систему (2.75), отримують графіки зміни всіх вихідних координат \vec{q} ;

3) **операторний метод**. Знаходять зображення реакції $q \rightarrow$ за передавальною функцією системи;

4) **частотний метод** використовується для дослідження сталих змушених коливань лінійних систем будь-якого порядку.

Так як локомотив являє собою систему з великим числом ступенів свободи, то найбільш прийнятними методами є безпосереднє інтегрування на ЕОМ і частотний метод.

2.4.2. Частотний метод дослідження змушених коливань

Як збурення розглядаються фактори, математичний опис яких може бути заданим з тим або іншим ступенем точності деякими певними функціями.

При дослідженні коливань частотним методом основним завданням є **отримання аналітичного виразу коливального процесу під час руху по колії з аналітично заданим збуренням**. Для визначення цього аналітичного виразу служать частотні характеристики динамічної системи, яка пов'язує заданий конкретний коливальний процес (переміщення z , швидкість \dot{z} , прискорення \ddot{z} і сили) з конкретно заданим збуренням.

Для отримання частотної характеристики необхідно мати рівняння коливань і перетворити їх таким чином, щоб ліва частина містила поліном, що описує власні коливання, а права – поліном, який описує збурюючі дії. Частотна характеристика системи буде являти собою відношення полінома правої частини до полінома лівої.

Розглянемо частотний метод в загальному вигляді для системи з k ступенями свободи. Розв'язок $q(t)$ системи рівнянь (2.75) знаходять, використовуючи частотні характеристики системи $W(j\omega)$. Їх отримують на основі розв'язання системи (2.75) при дії одиничного збурення

$$Q(t) = E \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}, \quad (2.76)$$

де E – матриця одиничного збурення;

ω – кругова частота, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$;

j – уявна одиниця, $j = \sqrt{-1}$.

Збурення називаються **одичними**, якщо на головній діагоналі матриці E стоять одиниці, тобто амплітуда дорівнює одиниці.

Під дією цього збурення виникнуть коливання і розв'язання системи рівнянь (2.75) можна подати в такому вигляді:

$$q(t) = W_{q-Q}(j\omega) \cdot e^{j\omega t}. \quad (2.77)$$

Знайдемо похідні (швидкість \dot{q} і прискорення \ddot{q}) виразу (2.77):

$$\dot{q}(t) = j \cdot \omega \cdot W_{q-Q}(j\omega) \cdot e^{j\omega t}; \quad (2.78)$$

$$\ddot{q}(t) = -\omega^2 \cdot W_{q-Q}(j\omega) \cdot e^{j\omega t}. \quad (2.79)$$

Підставляючи (2.76)-(2.79) в систему (2.75), отримаємо

$$(-M \cdot \omega^2 + j \cdot \omega \cdot B + \mathcal{K}) \cdot W_{q-Q}(j\omega) \cdot e^{j\omega t} = E \cdot e^{j\omega t}. \quad (2.80)$$

З даного виразу можна визначити $W_{q-Q}(j\omega)$ як

$$\begin{aligned} W_{q-Q}(j\omega) &= \frac{E}{-M \cdot \omega^2 + j \cdot \omega \cdot B + \mathcal{K}} = \\ &= (-M \cdot \omega^2 + j \cdot \omega \cdot B + \mathcal{K})^{-1}, \end{aligned} \quad (2.81)$$

де $W_{q-Q}(j\omega)$ – матриця частотної характеристики, що зв'язує збурення Q з узагальненою координатою z (переміщення) при одичному збуренні.

Елементи матриці $W_{q-Q}(j\omega)$ – комплексні числа. Дійсні її частини описують значення реакцій, що знаходяться у фазі зі збуренням, уявні – зміщені на $\frac{\pi}{2}$.

Таким чином, кожен елемент матриці $W_{q-Q}(j\omega)$ містить інформацію про амплітуду і фазу коливань, що відбуваються з даної узагальненої координати від відповідного збурення. Частотна характеристика показує, як система перетворює по амплітуді і фазі вхідне збурення Q в узагальнені координати $q(t)$.

2.4.3. Частотні характеристики моделі з одним ступенем свободи при кінематичному збуренні

Розглянемо як приклад отримання частотної характеристики для моделі з одним ступенем свободи. Для отримання частотної характеристики необхідно мати рівняння коливань, яке для даної моделі має такий вигляд:

$$m \cdot \ddot{z}(t) + \beta \cdot \dot{z}(t) + \mathcal{K} \cdot z(t) = \beta \cdot \dot{\eta}(t) + \mathcal{K} \cdot \eta(t). \quad (2.82)$$

Перетворимо рівняння в операторну форму. Для переходу з часової області в частотну використовуємо такі вирази:

$$z(t) = z(j\omega), \quad (2.83)$$

$$\dot{z}(t) = j \cdot \omega \cdot z(j\omega), \quad (2.84)$$

$$\ddot{z}(t) = -\omega^2 \cdot z(j\omega). \quad (2.85)$$

Відповідно до (2.83), (2.84) і (2.85) рівняння (2.82) набуде вигляду

$$\begin{aligned} -m \cdot \omega^2 \cdot z(j\omega) + j \cdot \omega \cdot \beta \cdot z(j\omega) + \mathcal{K} \cdot z(j\omega) = \\ = j \cdot \omega \cdot \beta \cdot \eta(j\omega) + \mathcal{K} \cdot \eta(j\omega). \end{aligned} \quad (2.86)$$

Виносимо за дужки постійні множники, отримаємо

$$(-m \cdot \omega^2 + j \cdot \omega \cdot \beta \cdot z + \mathcal{K}) \cdot z(j\omega) = (j \cdot \omega \cdot \beta + \mathcal{K}) \cdot \eta(j\omega). \quad (2.87)$$

Для отримання частотної характеристики необхідно многочлен правої частини розділити на многочлен лівої:

$$W_{\eta-z}(j\omega) = \frac{j \cdot \omega \cdot \beta + \mathcal{J}}{-m \cdot \omega^2 + j \cdot \omega \cdot \beta + \mathcal{J}}. \quad (2.88)$$

Вираз (2.88) являє собою частотну характеристику, що зв'язує збурення η з узагальненою координатою (вертикальне переміщення z).

З урахуванням (2.88) рівняння (2.87) набуде вигляду

$$z(j\omega) = W_{\eta-z}(j\omega) \cdot \eta(j\omega). \quad (2.89)$$

Частотну характеристику системи з одним ступенем свободи можна показати у вигляді функціональної схеми (рис. 2.14), звідки випливає, що частотна характеристика системи показує, яким чином динамічна система перетворює x_1 або вхідне збурення.

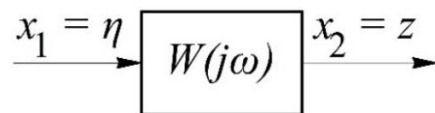


Рис. 2.14. Структурна схема коливань:
 x_1 – вхідна дія; x_2 – вихідна координата

У позначенні частотної характеристики наявні два індекси x_1 і $x_2 - W_{x_1-x_2}(j\omega)$. Як x_2 можуть бути прийняті абсолютні координати (переміщення z , швидкості \dot{z} , прискорення \ddot{z}), а також відносні координати (переміщення Δ , швидкості $\dot{\Delta}$, прискорення $\ddot{\Delta}$) і сили, що виникають в ресорному підвішуванні. Частотні характеристики для всіх зазначених вихідних координат отримують з використанням частотної характеристики зв'язків і раніше виведеної частотної характеристики $W_{\eta-z}(j\omega)$. Знайдемо відповідні частотні характеристики системи, що зв'язують абсолютне переміщення маси з її абсолютними швидкостями і прискореннями:

$$W_{z-\dot{z}}(j\omega) = \frac{\dot{z}(j\omega)}{z(j\omega)} = \frac{j \cdot \omega \cdot z(j\omega)}{z(j\omega)} = j \cdot \omega, \quad (2.90)$$

$$W_{z-\ddot{z}}(j\omega) = \frac{\ddot{z}(j\omega)}{z(j\omega)} = -\omega^2. \quad (2.91)$$

Для отримання частотних характеристик, що зв'язують вхідну координату η з вихідними \dot{z} і \ddot{z} , необхідно помножити частотні характеристики (2.88) на відповідну характеристику зв'язку, отримаємо

$$W_{\eta-\dot{z}}(j\omega) = W_{\eta-z}(j\omega) \cdot W_{z-\dot{z}}(j\omega) = \frac{(j \cdot \omega \cdot \beta + \mathcal{K}) \cdot j\omega}{-m \cdot \omega^2 + j\omega \cdot \beta + \mathcal{K}}, \quad (2.92)$$

$$W_{\eta-\ddot{z}}(j\omega) = W_{\eta-z}(j\omega) \cdot W_{z-\ddot{z}}(j\omega) = \frac{-\omega^2 \cdot (j\omega \cdot \beta + \mathcal{K})}{-m \cdot \omega^2 + j\omega \cdot \beta + \mathcal{K}}. \quad (2.93)$$

Для отримання частотних характеристик відносних координат (Δ , $\dot{\Delta}$ і $\ddot{\Delta}$) необхідно виразити відносно переміщення маси m через абсолютне переміщення і амплітуду нерівності

$$\Delta(j\omega) = z(j\omega) - \eta(j\omega). \quad (2.94)$$

Замінивши в цьому виразі $z(j\omega)$ виразом (2.89), одержимо

$$\Delta(j\omega) = W_{\eta-z}(j\omega) \cdot \eta(j\omega) - \eta(j\omega) = \eta(j\omega) \cdot [W_{\eta-z}(j\omega) - 1]. \quad (2.95)$$

Частотна характеристика, що зв'язує $\eta(j\omega)$ з вихідною координатою $\Delta(j\omega)$, має вигляд

$$W_{\eta-\Delta}(j\omega) = \frac{\Delta(j\omega)}{\eta(j\omega)} = W_{\eta-z}(j\omega) - 1 = \frac{m \cdot \omega^2}{-m \cdot \omega^2 + j\omega \cdot \beta + \mathcal{K}}. \quad (2.96)$$

Отримання частотних характеристик, що пов'язують вхідну координату η з вихідними $\dot{\Delta}$ і $\ddot{\Delta}$, виконується аналогічно, як і для

абсолютних координат. Для отримання частотної характеристики сили в ресорному підвішуванні необхідно подати вираз цієї сили. Сила в ресорному підвішуванні визначається сумою пружних і дисипативних складових

$$F(j\omega) = F_n(j\omega) + F_d(j\omega). \quad (2.97)$$

З урахуванням формул (2.1), (2.2) і (2.94) одержимо

$$\begin{aligned} F(j\omega) &= \mathcal{K} \cdot \Delta(j\omega) + j \cdot \omega \cdot \beta \cdot (j\omega) = \\ &= (\mathcal{K} + j\omega \cdot \beta) \cdot W_{\eta-\Delta}(j\omega) \cdot \eta(j\omega). \end{aligned} \quad (2.98)$$

Таким чином, вираз частотної характеристики для сили в ресорному підвішуванні при кінематичному збуренні має вигляд

$$W_{\eta-F}(j\omega) = (\mathcal{K} + j\omega \cdot \beta) \cdot W_{\eta-\Delta}(j\omega) = \frac{(\mathcal{K} + j\omega \cdot \beta) \cdot m \cdot \omega^2}{-m \cdot \omega^2 + j\omega \cdot \beta + \mathcal{K}}. \quad (2.99)$$

Отримані частотні характеристики дозволять досліджувати властивості динамічних систем, тобто отримати інформацію про амплітуду і фазу коливань.

2.4.4. Частотні характеристики динамічної системи при силовому збуренні

При розрахунку віброзахисту від силових збурень, пов'язаних з обертанням невірноважених частин, також можна використовувати модель з одним ступенем свободи.

Частотні характеристики переміщень в такій моделі отримуємо, використовуючи рівняння коливань (формула (2.25)) і переходячи з часової області в частотну

$$(-m \cdot \omega^2 + j\omega \cdot \beta \cdot z + \mathcal{K}) \cdot z(j\omega) = F_g(j\omega). \quad (2.100)$$

Порівнюючи отриманий вираз при силовому збуренні та аналогічний раніше отриманий при кінематичному збуренні (формула (2.87)), можна зробити висновок, що ліві частини цих виразів однакові, а праві різні. Тому динамічні властивості також будуть різні. Частотна характеристика буде мати такий вигляд:

$$W_{F_g-z}(j\omega) = \frac{1}{-m \cdot \omega^2 + j\omega \cdot \beta + \mathcal{J}}. \quad (2.101)$$

Вираз (2.100) можна записати як

$$z(j\omega) = W_{F_g-z}(j\omega) \cdot F_g(j\omega). \quad (2.102)$$

Для задач віброзахисту силового обладнання локомотивів (дизель-генераторні установки, мотор-компресори і т. п.) частота силового збурення зафіксована, як правило, в певному діапазоні. Тому, щоб уникнути резонансу, *жорсткості віброзахисних елементів в таких випадках вибирають великими*, так, щоб власна частота системи значно перевершувала робочі частоти. Тут вплив жорсткості на динамічні властивості протилежний її впливу в схемах з кінематичним характером збурення.

2.4.5. Перетворення частотних характеристик системи з одним ступенем свободи при кінематичному збуренні

Маючи вираз частотної характеристики в комплексній формі, можна в подальшому отримати формули для амплітудної частотної характеристики і фазової частотної характеристики динамічної системи. Для цього необхідно відокремити дійсні частини від уявних у виразах частотної характеристики.

Так як в отриманих раніше виразах частотних характеристик (формули (2.88), (2.92), (2.93), (2.96), (2.99)) знаменники однакові, а в чисельнику простежується наявність деяких аналогічних виразів, можна виконати перетворення, що призводять частотні характеристики до більш компактного вигляду.

Як приклад розглянемо перетворення виразу частотної характеристики динамічної моделі з одним ступенем свободи (формула (2.88)). Введемо два параметри, що характеризують коливальні властивості розглянутої системи, а саме – власну частоту недемпфрованої системи ω_e (формула (2.50)) і відносний коефіцієнт затухання n (формула (2.54)).

Перетворимо вираз частотної характеристики (формула (2.88)), розділивши чисельник і знаменник на жорсткість \mathcal{K} , та отримаємо

$$W_{\eta-z}(j\omega) = \frac{j\omega \cdot \frac{\beta}{\mathcal{K}} + 1}{\frac{-m \cdot \omega^2}{\mathcal{K}} + j\omega \cdot \frac{\beta}{\mathcal{K}} + 1}. \quad (2.103)$$

З виразу (2.54) висловимо $\beta = \beta_{кр} \cdot n = 2 \cdot \sqrt{m \cdot \mathcal{K} \cdot n}$ і підставимо в (2.103):

$$W_{\eta-z}(j\omega) = \frac{j\omega \cdot \frac{2 \cdot n \cdot \sqrt{m \cdot \mathcal{K}}}{\mathcal{K}} + 1}{\frac{-m \cdot \omega^2}{\mathcal{K}} + j\omega \cdot \frac{2 \cdot n \cdot \sqrt{m \cdot \mathcal{K}}}{\mathcal{K}} + 1}. \quad (2.104)$$

Введемо в цей вираз ω_e , після перетворення отримаємо

$$W_{\eta-z}(j\omega) = \frac{1 + j \cdot 2 \cdot n \cdot \frac{\omega}{\omega_e}}{1 + j \cdot 2 \cdot n \cdot \frac{\omega}{\omega_e} - \left(\frac{\omega}{\omega_e}\right)^2}. \quad (2.105)$$

Використовуючи отриманий спрощений вираз частотної характеристики для координати z , можна отримати спрощену частотну характеристику для решти координат (\dot{z} , \ddot{z} , Δ , $\dot{\Delta}$ і $\ddot{\Delta}$), застосовуючи при цьому відповідні частотним характеристикам зв'язки (формули (2.90), (2.91)).

Перетворені частотні характеристики використовуються для знаходження амплітудної частотної характеристики і фазової частотної характеристики динамічної системи, що дозволяють проаналізувати динамічні властивості.

2.4.6. Амплітудні частотні і фазові частотні характеристики системи з одним ступенем свободи

Побудову графіків частотних характеристик необхідно проводити на комплексній площині, що при $k \geq 2$ втрачає наочність. Тому для отримання амплітудної частотної характеристики і фазової частотної характеристики необхідно використовувати відповідну частотну характеристику, перетворивши її таким чином, щоб в чисельнику і знаменнику містилося по одному комплексному числу з явно вираженою дійсною і уявною частинами.

Відомо, що комплексну функцію $W(j\omega)$ можна подати в показовій формі

$$W(j\omega) = P(\omega) + j \cdot Q(\omega) = A(\omega) \cdot e^{j \cdot \varphi(\omega)}, \quad (2.106)$$

де $P(\omega)$ – дійсна частина частотної характеристики;

$Q(\omega)$ – уявна частина частотної характеристики;

$A(\omega)$ – модуль частотної характеристики, або амплітудна частотна характеристика;

$\varphi(\omega)$ – фазова частотна характеристика.

Функції $A(\omega)$ і $\varphi(\omega)$ розраховуються за формулами

$$A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}, \quad (2.107)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}. \quad (2.108)$$

Амплітудну частотну і фазову частотну характеристики можна побудувати в звичайних координатах і за побудованими графіками аналізувати динамічні властивості системи.

Розглянемо як приклад методику отримання амплітудної частотної і фазової частотної характеристик системи з одним ступенем свободи при кінематичному збуренні для вихідної координати z (вертикальне переміщення маси m). Перетворена частотна характеристика для цього випадку – формула (2.105). Для отримання амплітудної частотної і фазової частотної характеристик необхідно вираз (2.105) привести до вигляду:

$$W_{\eta-z}(j\omega) = \frac{a(\omega) + j \cdot b(\omega)}{c(\omega) + j \cdot d(\omega)}. \quad (2.109)$$

Для розглянутого випадку маємо дійсну частину

$$a(\omega) = 1, \quad (2.110)$$

$$c(\omega) = 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_g} \right)^2 \quad (2.111)$$

та уявну частину

$$b(\omega) = 2 \cdot n \cdot \frac{\omega}{\omega_g}, \quad (2.112)$$

$$d(\omega) = 2 \cdot n \cdot \frac{\omega}{\omega_g}. \quad (2.113)$$

Для амплітудної частотної характеристики з урахуванням формул (2.107) і (2.109) маємо

$$A_{\eta-z}(\omega) = \sqrt{\frac{a(\omega)^2 + b(\omega)^2}{c(\omega)^2 + d(\omega)^2}} = \sqrt{\frac{1 + \left(2 \cdot n \cdot \frac{\omega}{\omega_g} \right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_g} \right)^2 \right]^2 + \left(2 \cdot n \cdot \frac{\omega}{\omega_g} \right)^2}}. \quad (2.114)$$

Спростимо отриманий вираз амплітудної частотної характеристики, замінивши $\frac{\omega}{\omega_g}$ на μ :

$$A_{\eta-z}(\omega) = \sqrt{\frac{1 + 4 \cdot n^2 \cdot \mu^2}{(1 - \mu^2)^2 + 4 \cdot n^2 \cdot \mu^2}} = \mu_{\eta}, \quad (2.115)$$

де μ – безрозмірна частота;
 μ_{η} – динамічний коефіцієнт.

Амплітудна частотна характеристика показує, як динамічна система перетворює амплітуду вхідного впливу (збурення).

Для отримання фазової частотної характеристики використовуємо вирази (2.108) і (2.109). Знайдемо фазу чисельника виразу (2.109)

$$\varphi_{\eta-z}^{чис}(\omega) = \arctg \frac{b(\omega)}{a(\omega)} \quad (2.116)$$

і фазу знаменника

$$\varphi_{\eta-z}^{зн}(\omega) = \arctg \frac{d(\omega)}{c(\omega)}. \quad (2.117)$$

Фазова частотна характеристика матиме вигляд

$$\varphi_{\eta-z}(\omega) = \varphi_{\eta-z}^{чис}(\omega) - \varphi_{\eta-z}^{зн}(\omega). \quad (2.118)$$

Фазова частотна характеристика показує, як динамічна система перетворює фазу вхідного впливу.

Амплітудна частотна і фазова частотна характеристики мають розмірність. Розмірність амплітудної частотної характеристики визначається розмірністю вихідної координати. Фазова частотна характеристика вимірюється або в градусах, або в радіанах.

2.4.7. Модель з одним ступенем свободи

Розглянемо, як змінюється від частоти збурення амплітуда коливань моделі локомотива з одним ступенем свободи, тобто амплітудна частотна характеристика (формула (2.115)). Аналіз будемо виконувати, користуючись безрозмірною частотою $\mu = \frac{\omega}{\omega_0}$. Графіки амплітудно-частотної і фазо-частотної характеристик для переміщень наведені на рис. 2.15. При збільшенні частоти збурень ω або μ чисельник амплітудної частотної характеристики (формула (2.115)) зростає, а знаменник спочатку убуває і при $\mu = 1$ дорівнює $2 \cdot n$, а потім починає зростати.

Таким чином, амплітуда нерівності $\eta(t)$ буде передаватися на кузов збільшеною в μ_η раз. Амплітудна частотна характеристика так само залежить від відносного демпфірування n , співвідношення частот змушених і власних коливань і має максимум на частоті, близькій до $\mu = 1$ (резонанс), тобто до частоти власних коливань ω_0 .

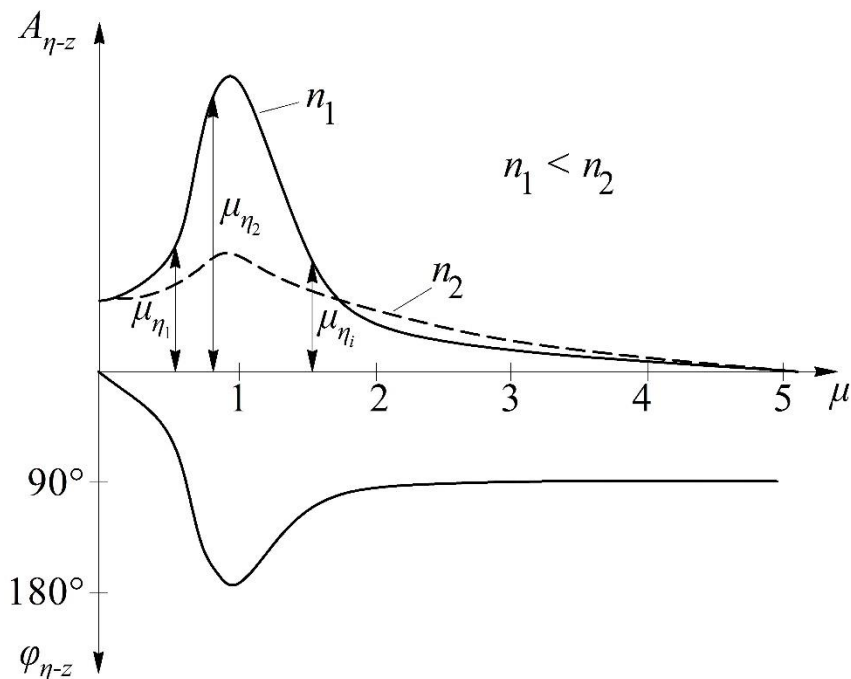


Рис. 2.15. Амплітудна частотна і фазова частотна характеристики вертикальних переміщень моделі з одним ступенем свободи

Резонанс – збіг частот змушених і власних коливань. Так як динамічні якості локомотива визначаються не тільки переміщеннями, а й прискореннями \ddot{z} і силами в ресорному F підвішуванні, то запишемо амплітудні частотні характеристики для прискорень і сил, використовуючи при цьому характеристики зв'язків:

$$A_{\eta-\ddot{z}}(\omega) = A_{\eta-z}(\omega) \cdot A_{z-\ddot{z}}(\omega) = \omega^2 \cdot \mu_{\eta}; \quad (2.119)$$

$$A_{\eta-F}(\omega) = m \cdot A_{\eta-\ddot{z}}(\omega) = m \cdot \omega^2 \cdot \mu_{\eta}. \quad (2.120)$$

Таким чином, амплітудні частотні характеристики переміщень, прискорень і сил однаково залежать від частоти μ_{η} і відрізняються тільки множниками. Перетворивши вирази (2.119) і (2.120), можна показати, що прискорення і сили будуть пропорційні жорсткості ресорного підвішування

$$A_{\eta-\ddot{z}}(\mu) = \frac{\mathcal{K}}{m} \cdot \mu^2 \cdot \mu_{\eta}; \quad (2.121)$$

$$A_{\eta-F}(\mu) = \mathcal{K} \cdot \mu^2 \cdot \mu_{\eta}. \quad (2.122)$$

Це відповідає усталеним уявленням, що **для поліпшення динамічних якостей локомотивів слід знижувати жорсткість ресорного підвішування.**

2.4.8. Одновісна модель з двома ступенями свободи

Для аналізу динамічних властивостей одновісної моделі з двома ступенями свободи (рис. 2.13) розглянемо амплітудно-частотні характеристики переміщень візків $A_{z_1-\eta}$ і кузова $A_{z_2-\eta}$ (рис. 2.16) при різному ступені демпфірування, отримані з використанням імітаційного моделювання при вихідних даних, що відповідають параметрам електровоза ВЛ80. У системах з декількома ступенями свободи відносно затухання для кожної

узагальненої координати знаходять як відношення головного коефіцієнта затухання до його критичного значення, що визначається для парціальної системи. *Парціальною* називається система, отримана з вихідної системи при закріпленні всіх узагальнених координат, крім однієї, частоту по цій координаті називають *парціальною частотою*.

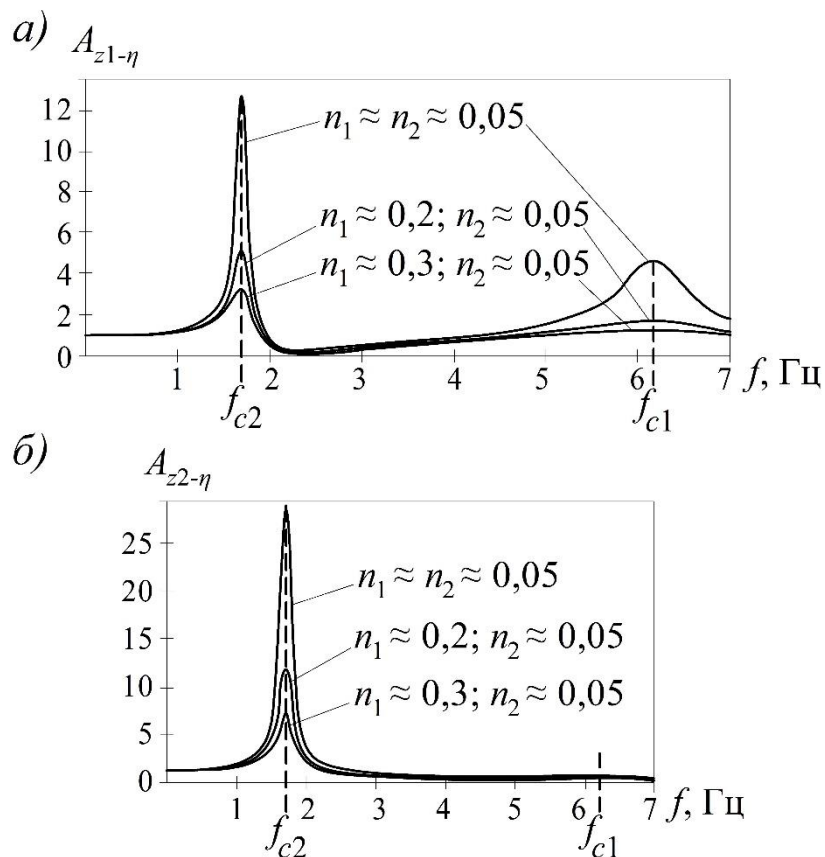


Рис. 2.16. Амплітудні частотні характеристики підстрибування візка (а) і кузова (б) одновісної моделі з двома ступенями свободи при різних значеннях n

У даному випадку $\beta_{1кр} = 2 \cdot \sqrt{m_1 \cdot (\mathcal{K}_1 + \mathcal{K}_2)}$ і $\beta_{2кр} = 2 \cdot \sqrt{m_2 \cdot \mathcal{K}_2}$.
Відповідно ступені демпфірування визначаються так:

- для буксового підвішування

$$n_1 = \frac{\beta_1 + \beta_2}{\beta_{1кр}}; \quad (2.123)$$

- для центрального підвішування

$$n_2 = \frac{\beta_2}{\beta_{2кр}}. \quad (2.124)$$

Криві на рис. 2.16 побудовані при трьох варіантах значень $n_1 - 0,05, 0,2$ і $0,3$ (значення n_2 не змінюється). Як видно, амплітуди коливань візка (рис. 2.16, а) мають два резонансних максимуми поблизу власних частот коливань: $f_{c2} = 1,7$ Гц, і $f_{c1} = 6,2$ Гц. Таким чином, вільні коливання підстрибування одновісної моделі з двома ступенями свободи відбуваються з двома власними частотами. На парціальній частоті коливань

кузова $f_{nc2} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{\mathcal{J}_2}{m_2}} = 2,25$ Гц ампліудна частотна

характеристика переміщень візка має мінімум, тобто при такій частоті кузов працює як віброгасник по відношенню до візка, і амплітуда коливань різко зменшується. Віброгасіння тим сильніше, чим менше n .

Резонансні амплітуди коливань візка зі збільшенням частки демпфірування n_1 в буксовому підвішуванні різко знижуються, особливо при коливаннях на вищій власній частоті f_{c1} , яка близька до парціальної частоти візка

$f_{nc1} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{\mathcal{J}_1 + \mathcal{J}_2}{m_1}} = 6,02$ Гц. Дані результати добре

ілюструють вплив демпфірування на динамічні властивості системи з двома ступенями свободи. При деяких рівнях демпфірування амплітудні частотні характеристики можуть не мати другого максимуму, вплив демпфірування великою мірою позначається на зміні вищої резонансної частоти. Амплітудні частотні характеристики коливання підстрибування кузова (рис. 2.16, б) при порівняно малому демпфіруванні також мають два максимуми на тих же резонансних частотах. Проте другий максимум на частоті, близькій до f_{c1} , приблизно в 40 разів менше, ніж перший, при $n_1 = n_2 = 0,05$. Таким чином, навіть при малій дисипації вплив переміщень візка на переміщення кузова незначний.

Разом з тим, як видно з амплітудних частотних характеристик прискорень візка та кузова (рис. 2.17), коливання

візка істотно позначаються на амплітудах прискорень кузова, а отже, і сил в кузовному підвішуванні. Прискорення візка (рис. 2.17, а) практично не залежать від коливань кузова (рис. 2.17, б). Однак сили в буксовому підвішуванні на власній частоті f_{c2} матимуть значний максимум, викликаний тим, що на його деформації помітно впливають коливання кузова.

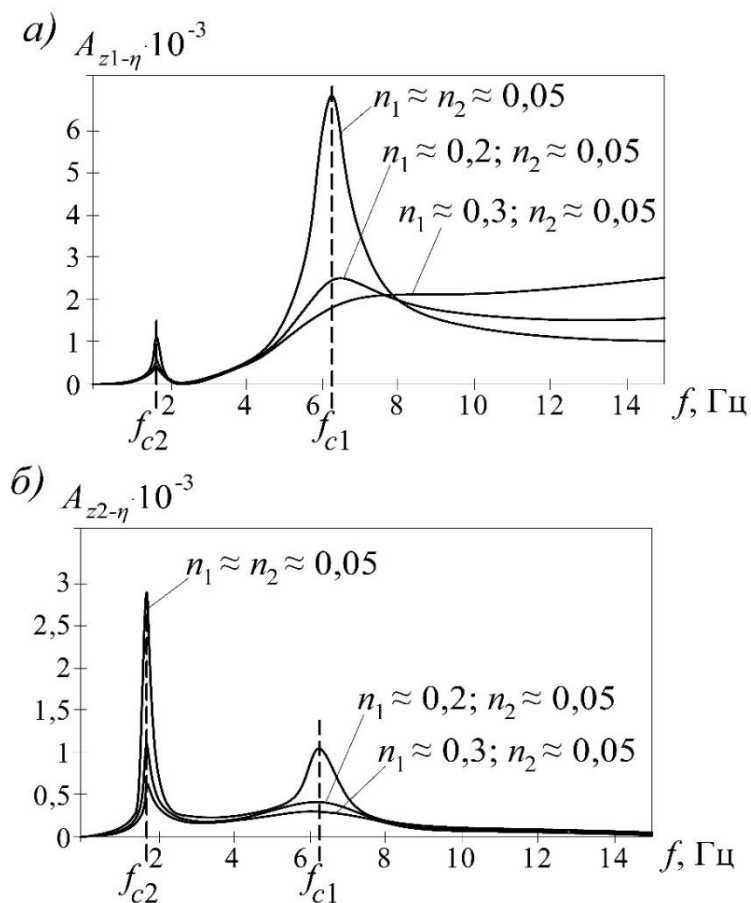


Рис. 2.17. Амплітудні частотні характеристики прискорень підстрибування візка (а) і кузова (б) одновісної моделі з двома ступенями свободи при різних значеннях n

Головне правило вибору параметрів з'єднань для віброзахисту при кінематичному способі збурення – знижувати (наскільки можливо) жорсткість елемента, який зв'язує коливальну масу з джерелом збурення. Відносно до вертикального ресорного підвішування це зводиться до зниження жорсткості, або, що те ж саме, до збільшення статичного прогину (до $250 \div 300$ мм), що забезпечує власні частоти коливань кузова в зоні $0,8 \div 1$ Гц. Обмеженнями для зниження вертикальної

жорсткості ресорного підвішування є зниження запасу поперечної стійкості і наближення власних частот коливань до границі $0,8 \div 1$ Гц, що характеризує початок зони розладу вестибулярного апарату людини (закачування).

Вибір ступеня демпфірування при кінематичному збуренні повинен бути заснований на компромісному підході. Відсутність демпфірування або його мала частка ($n < 0,01$) призводять до можливості виникнення значних резонансних коливань. Введення дисипації, що практично повністю заглушує резонанси ($n > 0,4$), призводить до різкого зростання прискорень через збільшення непружної складової збурюючих сил в зоні зарезонансних частот. Як відомо, вертикальні нерівності колії мають широкий діапазон довжин, чому відповідає безперервний і широкий спектр частот кінематичного збурення, що діє одночасно як в дорезонансній, так і в зарезонансній зоні. Тому вираш при виборі варіанта, для якого амплітудна частотна характеристика прискорень розташована низько в зоні резонансу, завжди дещо зменшується через те, що ця крива розташована більш високо в зарезонансній зоні. Звідси поряд з безумовною необхідністю деякої мінімальної дисипації для запобігання резонансу (зазвичай $n > 0,1 \div 0,15$) порівняно мала чутливість віброзахисних властивостей до величини n (діапазон $0,1 \div 0,4$). Зазвичай вибирають $n = 0,2 \div 0,3$, при цьому досить добре обмежуються резонанси і надмірно не ростуть збурюючі сили в зарезонансній зоні частот. Разом з тим для швидкісних поїздів з конструкційною швидкістю більше 200 км/год, що мають статичний прогин ресорного підвішування приблизно 250 мм, для яких спектр збурень характеризується високою часткою складових, що припадають на зарезонансну зону частот, приймають, як правило, $n = 0,14 \div 0,16$.

Питання для самоконтролю

1. Які методи використовують для знаходження узагальнених координат?
2. Яка основна мета частотного методу?
3. Яким чином знаходять частотні характеристики системи?
4. Що означають одиничні збурення?

5. Що показує частотна характеристика динамічної системи?
6. Як виконують перехід з тимчасової області в частотну?
7. Які параметри можуть бути прийняті як вихідна координата при частотному методі дослідження коливань?
8. Для чого використовуються частотні характеристики зв'язків і як їх знаходять?
9. Яким чином отримують частотну характеристику для сили в ресорному підвішуванні?
10. Як отримати частотну характеристику системи при силовому збуренні?
11. У чому основна відмінність частотних характеристик при силовому збуренні і кінематичному?
12. Як вибирають жорсткість віброзахисних елементів силового обладнання локомотива?
13. Як виконується перетворення частотної характеристики?
14. Як отримати амплітудну частотну і фазову частотну характеристики динамічної системи?
15. Що показують амплітудна частотна і фазова частотна характеристики?
16. У яких одиницях вимірюється амплітудна частотна і фазова частотна характеристики?
17. Що таке матриця динамічних жорсткостей?
18. Що таке матриця нерівностей?
19. Як знаходиться частотна характеристика динамічної системи при записі рівнянь в матричній формі?
20. Як змінюється амплітудна частотна характеристика при збільшенні частоти збурень?
21. Як впливає відносне демпфування на амплітудну частотну характеристику моделі з одним ступенем свободи?
22. Що називається резонансом?
23. Як впливає величина жорсткості на сили в ресорному підвішуванні?
24. Чому при зміні жорсткості значення амплітудної частотної характеристики змінюються не пропорційно?
25. Що називають парціальною системою?
26. Як впливає відносне демпфування на амплітудну частотну характеристику моделі з двома ступенями свободи?
27. Як залежать прискорення візка від коливань кузова?

2.5. КОЛИВАННЯ ПРИ ВИПАДКОВИХ ЗБУРЕННЯХ

2.5.1. Характеристики стаціонарних випадкових процесів

Збурення, що викликають коливання рухомого складу, є випадковими, оскільки коливання викликаються безліччю факторів в основному випадкового характеру (нерівності на поверхні рейок і бандажів, жорсткість рейкової колії). Аналіз фактичних записів нерівності рейкової колії показує, що вони носять випадковий і безперервний характер і аналітичний їх опис можливий лише за допомогою теорії випадкових процесів. **Випадковим процесом** називається нескінченна сукупність функцій часу, значення яких в довільний момент часу можуть бути будь-якими. Окрема функція часу з цієї сукупності являє собою **реалізацію** випадкового процесу (графічне зображення).

Розглянемо три реалізації випадкового процесу (рис. 2.18). Головна відмінність реалізацій полягає в тому, що при їх накладанні вони не збігаються. Велике значення при дослідженні випадкових коливань має правильний вибір довжини реалізації. Результати випробувань свідчать про те, що утримати постійну швидкість локомотива більше 30 с неможливо. Тому в розрахунках приймають час реалізації $t_p = 30$ с.

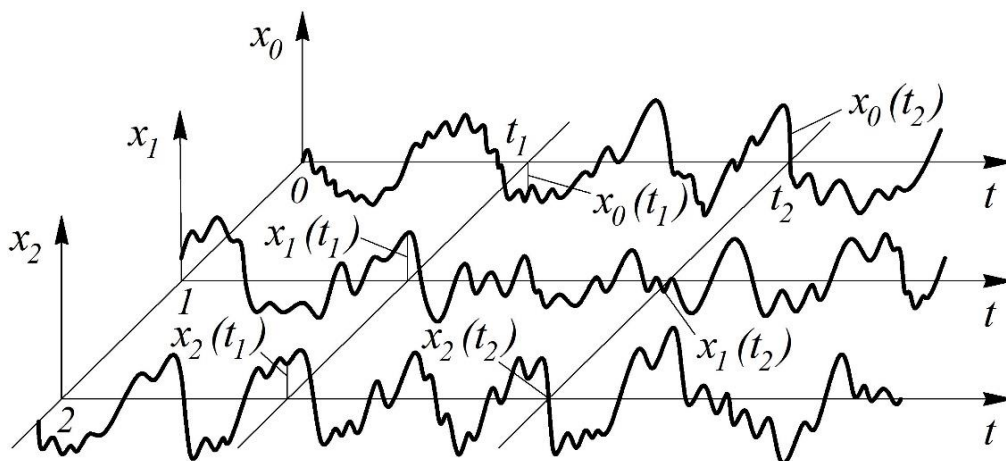


Рис. 2.18. Реалізації випадкового процесу

На практиці часто зустрічаються випадкові процеси, що протікають у часі приблизно однорідно і мають вигляд безперервних випадкових коливань навколо деякого середнього

значення, причому ні середня амплітуда, ні характер цих коливань не змінюється істотно з плином часу. Такі випадкові процеси називаються **стаціонарними**. У кожен момент часу t_1, t_2, \dots, t_n значення реалізацій можна розглядати як сукупність значень випадкових величин x . Для опису цих сукупностей використовуються наступні не випадкові функції.

1. **Математичне очікування** випадкової функції $x(t)$ – не випадкова функція $m_x(t)$, яка при кожному значенні аргументу дорівнює математичному очікуванню відповідного перетину сукупності випадкових функцій

$$m_x(t) = M[x(t)]. \quad (2.125)$$

За суттю математичне очікування випадкової функції є деяка середня функція, біля якої різним чином розташовуються конкретні реалізації випадкової функції.

2. **Дисперсія** випадкової функції $x(t)$ – це не випадкова функція $D_x(t)$, значення якої для кожного t дорівнює дисперсії відповідного перетину сукупності випадкових функцій

$$D_x(t) = D[x(t)]. \quad (2.126)$$

Дисперсія випадкової функції при кожному t характеризує розкид (розсіювання випадкової величини) можливих реалізацій випадкової функції щодо середнього, іншими словами, «ступеня випадковості» випадкової функції.

3. **Середньоквадратичне відхилення** випадкової функції $\sigma_x(t)$ – квадратний корінь з дисперсії

$$\sigma_x(t) = \sqrt{D_x(t)}. \quad (2.127)$$

4. **Кореляційна функція** – характеризує ступінь залежності між перетинами випадкової функції, що відносяться до різних моментів часу (рис. 2.19).

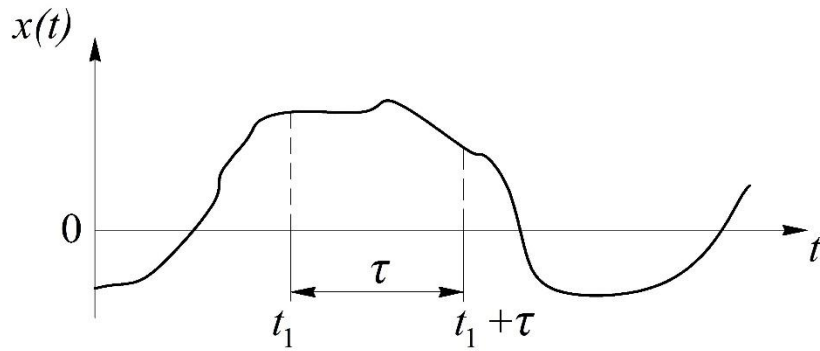


Рис. 2.19. Випадкова функція

Кореляційною функцією випадкової функції $x(t)$ називається не випадкова функція двох аргументів $K_x(t, t + \tau)$, яка при кожній парі значень $t, t + \tau$ дорівнює кореляційному моменту відповідних перетинів випадкової функції

$$K_x(t, t + \tau) = M[\dot{x}(t), \dot{x}(t + \tau)], \quad (2.128)$$

де \dot{x} – центрована випадкова функція, що визначається так:

$$\dot{x}(t) = x(t) - m_x(t); \quad (2.129)$$

$$\dot{x}(t + \tau) = x(t + \tau) - m_x(t + \tau). \quad (2.130)$$

При $\tau = 0$ кореляційна функція перетворюється в дисперсію випадкової функції, тобто

$$K_x(t, t) = M[(\dot{x}(t))^2] = D_x(t). \quad (2.131)$$

5. Спектр коливального процесу. Якщо який-небудь коливальний процес подається у вигляді суми гармонічних коливань різних частот (так званих «гармонік»), то функція, що описує розподіл амплітуд по різних частотах, називається **спектром коливального процесу**. Спектр показує, якого роду коливання переважають у даному процесі, яка його внутрішня структура. Абсолютно аналогічний спектральний опис можна дати і стаціонарному випадковому процесу, вся відмінність у тому, що для випадкового процесу амплітуди коливань будуть

випадковими величинами. Спектр стаціонарної функції буде описувати розподіл дисперсій по різних частотах. Розподіл такого роду називається **спектральним розкладанням** стаціонарної випадкової функції.

Характеристика, що описує частотний склад стаціонарного процесу, називається **спектральною щільністю** $S_x(\omega)$

$$S_x(\omega) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} K_x(\tau) \cdot \cos \omega \cdot \tau \cdot d\tau. \quad (2.132)$$

Розмірність спектральної щільності дорівнює квадрату розмірності випадкового процесу, помноженого на секунду. Відповідно до цього фізичний сенс спектральної щільності полягає в тому, що вона характеризує розподіл енергії випадкового процесу по частотах спектра.

Збурення, що виникають під час руху залізничного екіпажа по рейковій колії, є випадковими. Коливання підресорених мас екіпажа, що рухається по випадкових нерівностях рейкової колії, також являють собою стаціонарний випадковий процес. Статистичні характеристики цього процесу можуть бути встановлені за статистичними характеристиками вхідного збурення і амплітудними частотними характеристиками динамічної системи. **Спектральна щільність вихідних координат лінійної динамічної системи** визначається за формулою

$$S_z(\omega) = [A_{\eta-z}(\omega)]^2 \cdot S_{\eta}(\omega), \quad (2.133)$$

де $S_{\eta}(\omega)$ – спектральна щільність вхідного збурення;

$A_{\eta-z}(\omega)$ – амплітудна частотна характеристика динамічної системи, що пов'язує збурення і вихідні координати.

2.5.2. Статистичні характеристики випадкового збурення

Визначення характеристик коливань динамічної системи при випадковому збуренні належить до завдань змушених коливань.

Для дослідження змушених коливань необхідно мати характеристики нерівностей колії, що виступають у ролі збурення.

Численні роботи в галузі вивчення нерівностей колії показують, що вони носять складний характер і мають у своєму складі як періодичні складові, кратні за довжиною рейкової ланці, так і випадкові складові з широким спектром частот.

У зв'язку з цим непостійність властивостей колії за довжиною практично еквівалентна деякій випадковій геометричній нерівності. Все це дозволяє як збурюючу функцію прийняти деяку *еквівалентну геометричну нерівність*, яка наближено враховує всі причини, що викликають появи коливань рухомого складу.

До останнього часу як збурення використовували детерміновані усереднені геометричні нерівності, зумовлені осіданням стиків. На основі експериментів М.М. Кудрявцева ці нерівності підрозділяють на *одно-* і *двогорбі*, період яких визначається довжиною рейкової ланки, тобто 12,5 і 25 м. Найбільш часто при розрахунках застосовували одногорбу нерівність, описувану рівнянням

$$\eta(t) = \eta_0 \cdot [1 - \cos \omega \cdot t], \quad (2.134)$$

де η_0 – амплітуда нерівності ($\eta_0 = 3 \div 5$ мм – для колії в хорошому стані, $\eta_0 = 5 \div 10$ мм – для колії в задовільному стані);

$$\omega - \text{кругова частота, } \omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot \frac{V}{L_n};$$

V – швидкість руху;

L_n – довжина хвилі нерівності.

Однак моделі, що застосовуються для опису коливальних процесів в локомотиві, повинні забезпечувати можливість отримання достатньо точних результатів, тобто коливальні процеси, визначені в результаті розрахунку на моделях, повинні бути близькі до результатів експерименту на рухомому локомотиві. Тому статистичні характеристики еквівалентної геометричної нерівності отримують експериментально при записі

прискорень букс колісних пар або їх абсолютних переміщень (переміщень букс щодо землі).

Аналітичний вираз спектральної щільності для частотного діапазону від 0 до 10 Гц має вигляд

$$S_{\eta}(f) = \frac{b_i \cdot V^{\gamma_i - 1}}{f^{\gamma_i}} + \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi}} \sum_{j=1}^4 \frac{a_j}{c_j \cdot V} \cdot \exp\left[-\frac{(f - d_j \cdot V)^2}{4 \cdot c_j^2 \cdot V^2}\right], \quad (2.135)$$

де V – швидкість руху, м/с;

f – частота, Гц; $b_i, \gamma_i, a_j, c_j, d_j$ – параметри, значення яких наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Значення параметрів для швидкості $V = 1$ м/с

Номер складової i	Значення параметрів		Номер складової j	Значення параметрів		
	b	γ		$a, \text{мм}^2$	$d, \text{м}^{-1}$	$c, \text{м}^{-1}$
1	0,0055	3,1915	1	2,3816	0,0424	0,0031
2	9,9112	0,9892	2	2,2118	0,0822	0,0026
3	0,0125	4,1027	3	1,0591	0,1216	0,0052
–	–	–	4	0,4047	0,1658	0,0031

Номер складової i призначається відповідно до такої умови: якщо $f < f_1$, то $i = 1$; якщо $f_1 \leq f < f_2$, то $i = 2$; якщо $f \geq f_2$, то $i = 3$, де f_1 і f_2 визначаються за формулами

$$f_1 = \exp\left(\frac{\ln b_1 - \ln b_2}{\gamma_1 - \gamma_2} + \ln V\right), \quad (2.136)$$

$$f_2 = \exp\left(\frac{\ln b_2 - \ln b_3}{\gamma_2 - \gamma_3} + \ln V\right). \quad (2.137)$$

Відповідно до формули (2.135) спектр складається з монотонно спадної за гіперболічним законом складової, на яку накладено окремі піки (рис. 2.20).

Відповідно до фізичних уявлень ординати $S_\eta(f)$ різко зменшуються зі зростанням частоти $f = V/L_n$, так як нерівності більшої довжини L_n мають і велику амплітуду. На графіку (рис. 2.20) є кілька максимумів, обумовлених неоднорідністю властивостей колії в зоні стиків або в місцях зварювання рейок. Так, перший максимум відповідає частоті 0,04 Гц або нерівності $L_{n1} = V/f \approx 25$ м, тобто довжині рейкової ланки.

Два інших максимуми пояснюються специфічними процесами, які виникають в системі, при впливі на неї послідовно періодично повторюваних імпульсів. У даному випадку такі імпульси виникають при проходженні болтових або зварних стикових з'єднань. У механіці доведено, що на відміну від безперервно діючого збурення, при якому виникає один резонанс, вплив періодично повторюваних імпульсів викликає резонанси не тільки на основній частоті їх повторення, а й на кратних частотах. Цим явищем пояснюється наявність двох наступних максимумів на частотах 0,08 Гц і 0,12 Гц, що відповідають довжинам нерівності 12,5 і 8,3 м.

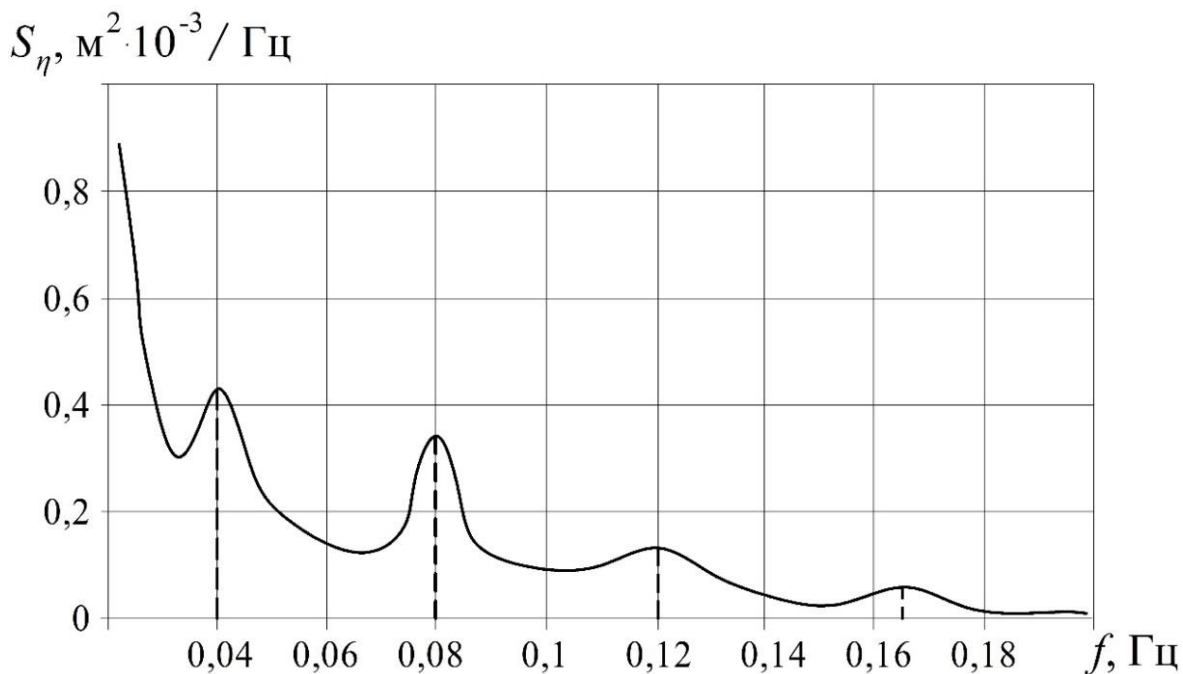


Рис. 2.20. Спектральна щільність еквівалентної геометричної нерівності при швидкості руху $V = 1$ м/с

Відзначимо ще дві особливості спектральної щільності збурення. Природно, що при $L_{n1} \rightarrow \infty$ амплітуда нерівності необмежено зростає, тобто графік $S_\eta(f)$ не можна будувати від нуля. Початкове значення f залежно від швидкості руху приймають відповідним L_n від 30 до 100 м.

Починаючи з частоти $f > 4$ Гц, амплітуда нерівності убуває майже за експоненціальним законом, тобто високочастотні нерівності роблять малий внесок у низькочастотні коливання підресорених частин локомотивів.

Для діапазону частот від 10 до 100 Гц спектральна щільність еквівалентної нерівності залежить від навантаження на вісь досліджуваного локомотива

$$S_\eta(f) = (6 \cdot V + 0,18 \cdot V^2) \cdot 10^{-4} \cdot f^{-4} + 0,23 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot \Pi \cdot f^{-2}, \quad (2.138)$$

де $2 \cdot \Pi$ – навантаження на вісь, кН.

Швидкість руху в формулу (2.138) підставляється в кілометрах за годину (км/год), а розмірність $S_\eta(f)$ виходить в сантиметрах в квадраті на герц (см²/Гц).

Використовуючи вирази (2.135), (2.138) і амплітудну частотну характеристику динамічної системи за формулою (2.133), можна знайти спектральну щільність вихідних координат лінійної динамічної системи (для даного прикладу – вертикального переміщення $S_z(\omega)$).

Відомо інший аналітичний опис функції спектральної щільності, м²/Гц, еквівалентної геометричній нерівності, який визначається таким виразом:

$$S_\eta(\omega) = \frac{S_\eta^2}{2 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{c_i \cdot V} \times \left\{ \exp \left[-\frac{(\omega - b_i \cdot V)^2}{4 \cdot c_i^2 \cdot V^2} \right] + \exp \left[-\frac{(\omega + b_i \cdot V)^2}{4 \cdot c_i^2 \cdot V^2} \right] \right\}, \quad (2.139)$$

де S_{η}^2 – дисперсія еквівалентної геометричної нерівності;

a_i – частка дисперсії випадкового процесу, яка припадає на i -й максимум спектральної щільності;

c_i – половина ширини i -го максимуму на половині його висоти;

b_i – частота i -го максимуму функції спектральної щільності;

V – швидкість руху, м/с;

$i = 1, 2 \dots n$ – кількість одновершинних складових функцій спектральної щільності ($n = 8$);

ω – кругова частота, яка визначається як $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$.

Параметри аналітичного виразу функції спектральної щільності для швидкості $V = 1$ м/с наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Параметри аналітичного виразу функції спектральної щільності для швидкості $V = 1$ м/с

Номер складової i	Значення параметрів функції спектральної щільності		
	c_i	b_i	a_i
1	0,05	0,247	0,558
2	0,05	0,498	0,384
3	0,12	1,315	0,045
4	0,12	2,096	0,00372
5	0,15	3,165	0,000472
6	0,15	4,48	0,00329
7	0,15	5,097	0,003988
8	0,2	6,412	0,00153

Величина дисперсії S_{η}^2 приймається рівною $25 \cdot 10^{-6}$ м. Для отримання $S_{\eta}(\omega)$ при різних швидкостях руху c_i і b_i множаться на відповідні значення швидкості V , м/с.

2.5.3. Розрахунок показників динамічних якостей екіпажної частини

Завдання оцінки раціональності обраної конструктивної схеми і рекомендованих параметрів пружно-дисипативних зв'язків системи підвішування є одним з найважливіших при проектуванні залізничних екіпажів.

Екіпаж може бути охарактеризований з різних точок зору. Якщо оцінювати його як об'єкт виготовлення, то основними критеріями якості будуть конструктивні, технологічні та економічні чинники; якщо як об'єкт експлуатації, то тут потрібно враховувати надійність роботи, ремонтпридатність, вплив на колію і т. д.

Оцінити конструкцію з усіх точок зору складно і ще складніше створити екіпаж, що відповідає всім вимогам. Для оцінки динамічних якостей локомотивів зазвичай розраховують: *максимальні переміщення і прискорення кузова, коефіцієнти динаміки першого і другого ступенів ресорного підвішування, коефіцієнти плавності ходу.*

Оскільки коливання локомотива носять випадковий характер, то і показники динамічних якостей локомотива будуть випадковими процесами.

Максимальні значення випадкових процесів показників динамічних якостей можна визначати двома способами:

1) як *потроєне значення середньоквадратичного відхилення:*

спектральна щільність характеризує розподіл амплітуд коливального процесу по частотах і може розглядатися як щільність дисперсії, тобто площа, обмежена функцією $S(\omega)$ і віссю частот, рівна дисперсії випадкового процесу:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} S(\omega) \cdot d\omega. \quad (2.140)$$

Якщо припустити, що розподіл величин динамічних показників екіпажа підпорядковується нормальному закону, то максимальні значення цих показників з імовірністю $P = 0,997$ можна визначити за правилом «*трьох сигм*».

Динамічні показники виражаються через функції спектральної щільності вихідних координат (переміщень $S_q(\omega)$ або прискорень $S_{\ddot{q}}(\omega)$) локомотива таким чином:

- *максимальні переміщення або прискорення:*

$$q_{\max} = 3 \cdot \sigma_q = 3 \cdot \sqrt{\int_0^{\infty} S_q(\omega) \cdot d\omega} = 3 \cdot \sqrt{\int_0^{\infty} [A_{\eta-q}(\omega)]^2 \cdot S_{\eta}(\omega) \cdot d\omega}, \quad (2.141)$$

де σ_q – середньоквадратичне відхилення переміщень або прискорень;

$A_{\eta-q}(\omega)$ – амплітудна частотна характеристика, що зв'язує вихідну узагальнену координату (переміщення z або прискорення \ddot{z}) зі збуренням (нерівністю);

- *коефіцієнти вертикальної динаміки i -го комплекту системи ресорного підвішування*

$$K_{\max_i}^{\delta} = \frac{F_i^{\delta}}{F_i^{cm}} = \frac{3 \cdot \sigma_{F^{\delta}}}{F_i^{cm}} = \frac{3 \cdot \sqrt{\int_0^{\infty} [A_{\eta-F_i^{\delta}}(\omega)]^2 \cdot S_{\eta}(\omega) \cdot d\omega}}{F_i^{cm}}, \quad (2.142)$$

де $\sigma_{F^{\delta}}$ – середньоквадратичне відхилення динамічного зусилля;

$A_{\eta-F_i^{\delta}}(\omega)$ – амплітудна частотна характеристика, що зв'язує динамічне зусилля зі збуренням (нерівністю);

F_i^{cm} – статична сила в i -му комплекті системи ресорного підвішування;

- *коефіцієнт плавності ходу за Шперлінгом (ступінь впливу коливань на організм людини)*

$$C_i = 1,23 \cdot \sqrt[6,67]{\int_0^{\infty} \omega^{3,33} \cdot A_{\phi}^{6,67}(\omega) \cdot [A_{\eta-z_i}(\omega)]^2 \cdot S_{\eta}(\omega) \cdot d\omega}, \quad (2.143)$$

де A_{ϕ} – фізіологічний коефіцієнт, що характеризує чутливість організму людини до коливань;

$A_{\eta-z_i}(\omega)$ – амплітудна частотна характеристика, що зв’язує вертикальне переміщення підлоги кузова зі збуренням (нерівністю).

Як видно з виразів (2.141)-(2.143), для визначення показників динамічних якостей екіпажа необхідно знати амплітудні частотні характеристики, що зв’язують переміщення, прискорення або сили з нерівністю;

2) як середнє значення абсолютного максимуму

під **абсолютним максимумом** розуміється найбільше значення випадкового процесу за реалізацію тривалістю t_p . Розподіл абсолютних максимумів випадкових процесів залежить від середньоквадратичного відхилення σ_q , ефективної частоти f_e і довжини реалізації t_p . Для стаціонарних випадкових процесів середнє значення абсолютного максимуму може бути визначене за наближеною формулою, запропонованою академіком В. В. Болотіним:

$$\bar{H} = \sigma_q \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \ln(f_e \cdot t_p)} + \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \ln(f_e \cdot t_p)}} \right), \quad (2.144)$$

де t_p – тривалість реалізації (приймають $t_p = 30$ с);

f_e – ефективна частота випадкового процесу.

Під **ефективною частотою** випадкового процесу розуміється така частота детермінованого процесу, який еквівалентний за середньою потужністю випадковому процесу, що розглядається. Частота f_e визначається відношенням першої похідної середньоквадратичного відхилення показників динамічної якості до середньоквадратичного відхилення показників динамічної якості, тобто

$$f_e = \frac{\sigma_{\dot{q}}}{\sigma_q} = \frac{\sqrt{\int_0^{\infty} f^2 \cdot S(f) \cdot df}}{\sigma^2}. \quad (2.145)$$

Значення σ_q і f_e , необхідні для розрахунку \bar{N} , обчислюють за спектральними щільностями показників динамічної якості, знайденими за заданою спектральною щільністю збурення $S_\eta(f)$.

Обчислені значення показників динамічних якостей порівнюють з допустимими величинами. Якщо вони не перевищують допустиму величину, робиться висновок, що екіпаж можна експлуатувати у всьому діапазоні швидкостей аж до конструктивної.

Питання для самоконтролю

1. Що називається випадковим процесом?
2. Що таке реалізація випадкового процесу?
3. Що таке випадковий стаціонарний процес?
4. Що називається математичним очікуванням випадкової функції?
5. Що називається дисперсією випадкової функції?
6. Що називається середньоквадратичним відхиленням випадкової функції?
7. Що характеризує кореляційна функція?
8. Сформулюйте поняття спектра коливального процесу. Що він показує?
9. Що означає спектральне розкладання стаціонарної функції?
10. Який фізичний сенс має спектральна щільність?
11. Як визначається спектральна щільність вихідних координат?
12. Дайте поняття еквівалентної геометричної нерівності.
13. Чим пояснити появу піків на рис. 2.19?
14. Які параметри прийняті як оцінки динамічних якостей локомотивів?
15. Які способи є для визначення показників динамічних якостей?
16. Що називається ефективною частотою випадкового процесу?
17. Що називається абсолютними максимумами випадкового процесу?
18. На підставі чого робиться висновок, що екіпаж можна експлуатувати у всьому діапазоні швидкостей аж до конструктивної?

2.6. БІЧНІ КОЛИВАННЯ ЛОКОМОТИВІВ

2.6.1. Загальні положення

Відомо, що поверхні кочення бандажів виконують конусними. Внаслідок цього процес кочення колісної пари по рейках при зміщенні щодо осі колії супроводжується звивистим рухом, що складається з коливань *віднесення* y і *виляння* φ_z . Цей процес кінематично може здійснюватися двома способами: *чистим коченням* (кочення без проковзування в точках контакту колеса і рейки) і *коченням з ковзанням* уздовж і впоперек колії.

Умови, за яких виникає один із цих видів руху, залежать від сил, прикладених до колісної пари, її інерційних характеристик і фізичних явищ в точці контакту коліс з рейками. Розглянемо спочатку кінематичні залежності, які характеризують обидва види руху.

Колісна пара, що знаходиться в початковий момент в середньому положенні, при якому радіуси кіл кочення обох коліс однакові, отримавши початкову швидкість V уздовж колії, буде котитися прямолінійно з кутовою швидкістю $\omega = \frac{V}{r}$, так як миттєвий центр швидкостей колеса розташований в точці контакту з рейкою (рис. 2.21).

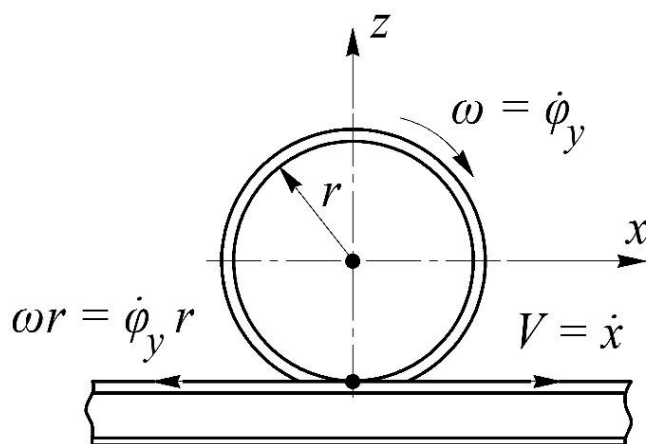


Рис. 2.21. Швидкості в точці контакту колеса і рейки

У цьому випадку рівняння кінематичного зв'язку, що встановлює умову чистого кочення, має вигляд

$$\omega \cdot r - V = \dot{\varphi}_y \cdot r - \dot{x} = 0. \quad (2.146)$$

Воно виражає рівність нулю абсолютної швидкості точки контакту колеса і рейки.

2.6.2. Кочення колісної пари без ковзання

Особливість руху колісної пари в режимі кочення без проковзування полягає в тому, що її звивистий рух виникає не під дією відновлювальних сил, а внаслідок властивостей накладених кінематичних зв'язків.

Якщо разом із заданням швидкості V і кутової швидкості ω надати колісній парі малого збурення – поперечного y і (або) кутового φ_z , зберігши при цьому умову кочення без ковзання, то колісна пара буде котитися по рейках, одночасно здійснюючи звивистий рух, внаслідок того, що при відхиленні поперек осі колії радіуси коліс стануть різними (рис. 2.22, *a*). Радіуси коліс визначаються так:

$$r_{B,D} = r \mp \Delta r, \quad (2.147)$$

де Δr – величина зміни радіуса за рахунок конусності (рис. 2.22, *b*), яка визначається за формулою

$$\Delta r = y \cdot \operatorname{tg} \beta = y \cdot i, \quad (2.148)$$

де y – величина поперечного зміщення колісної пари;

i – ухил (конусність) конічної частини бандажа.

У цьому випадку умова кочення без ковзання виконується, якщо припустити, що колісна пара обертається навколо осі z з кутовою швидкістю $\dot{\varphi}_z$ так, що в точці дотику B швидкість $S \cdot \dot{\varphi}_z$ спрямована проти швидкості V , а в точці D – у напрямку V (рис. 2.23).

Умови малості кута φ_z будуть мати вигляд

$$\cos \varphi_z = 1; \quad \sin \varphi_z = \varphi_z; \quad \operatorname{tg} \varphi_z = \sin \varphi_z = \varphi_z. \quad (2.149)$$

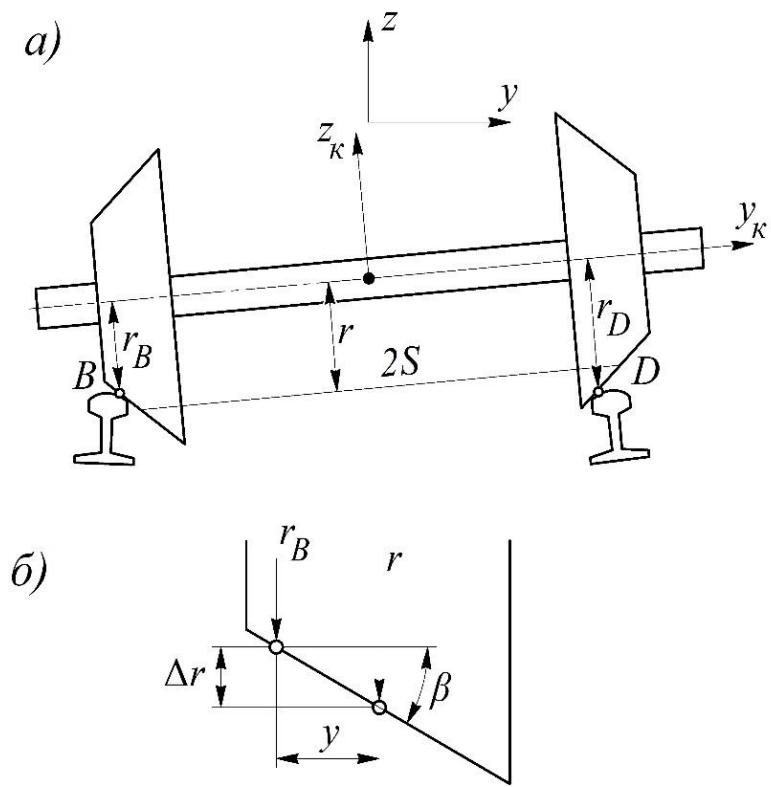


Рис. 2.22. Зміна радіуса кола кочення коліс при звивистому русі

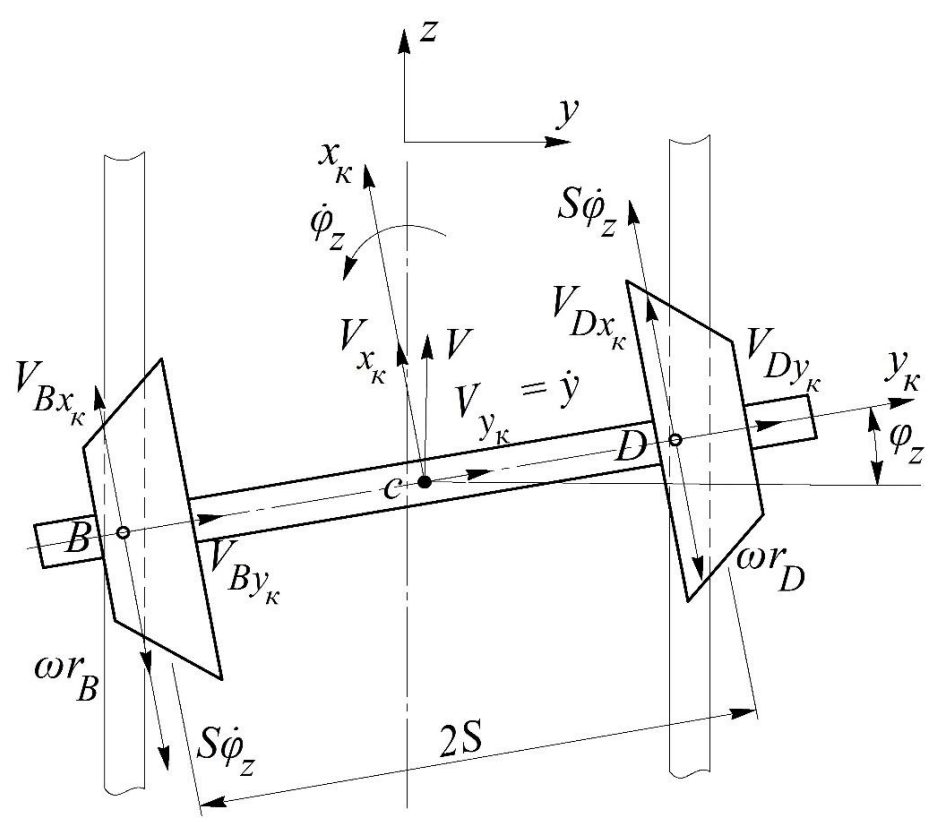


Рис. 2.23. Проекції швидкостей в точках контакту колес і рейок:
 $2 \cdot S$ – відстань між колами кочення коліс колісної пари

Умову кочення без ковзання запишемо в такому вигляді:

$$\bar{V}_B = 0; \quad \bar{V}_D = 0. \quad (2.150)$$

Виразимо абсолютну швидкість у точці B у напрямку, перпендикулярному осі колісної пари (осі x_k), і прирівняємо її до нуля:

$$\bar{V}_{B_x} = V \cdot \cos \varphi_z - \omega \cdot r_B - S \cdot \dot{\varphi}_z = 0. \quad (2.151)$$

З урахуванням формул (2.147)-(2.149) вираз набуде такого вигляду:

$$\bar{V}_{B_x} = V - \omega \cdot r + \omega \cdot i \cdot y - S \cdot \dot{\varphi}_z = 0. \quad (2.152)$$

Остаточно отримаємо

$$\bar{V}_{B_x} = \frac{V}{r} \cdot i \cdot y - S \cdot \dot{\varphi}_z = 0. \quad (2.153)$$

Умова кочення без ковзання в точці D призводить до аналогічних результатів, але зі знаком «мінус»:

$$\bar{V}_{D_x} = -\bar{V}_{B_x} = S \cdot \dot{\varphi}_z - \frac{V}{r} \cdot i \cdot y = 0. \quad (2.154)$$

Запишемо вираз для проєкцій швидкостей тих же точок на вісь y_k колісної пари. Ці проєкції будуть однакові для будь-якої точки колісної пари і визначаються за формулою

$$\bar{V}_{B_y} = \bar{V}_{D_y} = \dot{y} + V \cdot \sin \varphi_z = \dot{y} + V \cdot \varphi_z = 0. \quad (2.155)$$

Таким чином, при коченні колісної пари по рейках без ковзання її узагальнені координати і швидкості ($y, \dot{y}, \varphi_z, \dot{\varphi}_z$), крім рівняння (2.146), повинні задовольняти ще два рівняння зв'язку

$$\begin{cases} S \cdot \dot{\varphi}_z - \frac{V}{r} \cdot i \cdot y = 0; \\ \dot{y} + V \cdot \varphi_z = 0. \end{cases} \quad (2.156)$$

Знайдемо рішення цих рівнянь, для цього продиференціюємо друге рівняння в системі (2.156) і підставимо в нього $\dot{\varphi}_z$ з першого рівняння:

$$\ddot{y} + V^2 \cdot \frac{i}{r \cdot S} \cdot y = 0. \quad (2.157)$$

Це рівняння описує гармонічні коливання з частотою $\omega_g = V \cdot \sqrt{\frac{i}{r \cdot S}}$. Період коливань визначається так:

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_g} = \frac{2 \cdot \pi}{V} \cdot \sqrt{\frac{r \cdot S}{i}}. \quad (2.158)$$

Тобто при відхиленні колісна пара робить гармонічні коливання віднесення від середнього положення. Одночасно з цим, згідно з другим рівнянням системи (2.156), відбуваються коливання виляння

$$\varphi_z = -\frac{1}{V} \cdot \dot{y}. \quad (2.159)$$

Рішення рівняння (2.157) (закон коливань віднесення) має вигляд

$$y = y_0 \cdot \cos \omega_g \cdot t. \quad (2.160)$$

Закон коливань виляння, згідно з рівнянням (2.159):

$$\begin{aligned} \varphi_z &= \frac{1}{V} \cdot \omega_g \cdot y_0 \cdot \sin \omega_g \cdot t = \frac{1}{V} \cdot V \cdot \sqrt{\frac{i}{r \cdot S}} \cdot y_0 \cdot \sin \omega_g \cdot t = \\ &= \sqrt{\frac{i}{r \cdot S}} \cdot y_0 \cdot \sin \omega_g \cdot t. \end{aligned} \quad (2.161)$$

Порівнявши вирази (2.160) і (2.161), бачимо, що при чистому коченні уздовж колії колісна пара здійснює звивистий рух віднесення і виляння з однаковою частотою ω_g та зі зсувом по фазі на 90° . Довжина хвилі віднесення або виляння визначається за формулою

$$L_g = T \cdot V = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_g} \cdot V = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{r \cdot S}{i}}. \quad (2.162)$$

З отриманого виразу видно, що L_g не залежить від швидкості V , а залежить тільки від параметрів колісної пари і колії (r , i та S).

Для незношеного конусного бандажа $i = 1/20 = 0,05$, приймаючи $S = 0,8$ м, отримаємо $L_g = 25,12 \cdot \sqrt{r}$ м. Для колеса електровоза ВЛ80 з $r = 0,625$ м маємо $L_g = 19,86$ м.

Режим кочення без ковзання, при якому швидкості точок контакту колеса і рейки однакові, можливий лише за умови абсолютної твердості контактуючих тіл.

Якщо розглядати реальну колісну пару і рейку, то в місці контакту завжди виникають деформації. Однак оскільки ці деформації малі, то деякі характеристики руху під дією збурень при обліку деформацій можуть бути близькі до аналогічних без деформацій, тобто при невеликих швидкостях руху.

2.6.3. Кочення колісної пари з ковзанням

При коченні колісної пари з ковзанням узагальнені координати y і φ_z не обов'язково змінюються за гармонічним законом, швидкості в точках B і D контакту коліс з рейками не рівні нулю і швидкості проковзування на основі раніше отриманих співвідношень визначаються за формулами

$$\bar{V}_{Bx} = -\bar{V}_{Dx} = \frac{V}{r} \cdot i \cdot y - S \cdot \dot{\varphi}_z; \quad (2.163)$$

$$\bar{V}_{By} = \bar{V}_{Dy} = \dot{y} + V \cdot \varphi_z. \quad (2.164)$$

Результати теоретичних досліджень показують, що сили взаємодії коліс і рейок, які деформуються, можуть бути виражені через відносні швидкості проковзування, які знаходять як частку від ділення швидкостей проковзування на швидкість руху. Відносні швидкості проковзування визначаються виразами

$$\frac{\bar{V}_{Bx}}{V} = \frac{-\bar{V}_{Dx}}{V} = \frac{i}{r} \cdot y - \frac{S}{V} \cdot \dot{\varphi}_z; \quad (2.165)$$

$$\frac{\bar{V}_{By}}{V} = \frac{\bar{V}_{Dy}}{V} = \frac{1}{V} \cdot \dot{y} + \dot{\varphi}_z. \quad (2.166)$$

2.6.4. Диференціальні рівняння руху колісної пари, пов'язаної пружно з візком

Стійкість – це прагнення системи повернутися у вихідний стан після того, як вона була з нього виведена, або властивість системи залишатися поблизу цього вихідного стану.

За стійкістю або нестійкістю руху одиночної колісної пари не можна судити про характеристики бічних коливань локомотива, так як колісна пара пов'язана з візком, а останній – з кузовом локомотива.

Оскільки рух одиночної колісної пари нестійкий, то амплітуди віднесення і виляння через деякий час можуть стати рівними половині зазора в колії, тобто процес звивистого руху буде супроводжуватися **набіганням** гребеня бандажа на рейку. Набігання гребеня пов'язано з появою додаткових реакцій (крім сил крипу). Значення цих реакцій залежать від форми профілю бандажа і рейки, жорсткості колії в поперечному напрямку. При набіганні гребеня бандажа на рейку різко зростають сили взаємодії колісної пари і колії. У цьому випадку можуть бути перевищені допустимі значення показників безпеки руху.

При дослідженні бічних коливань обов'язково повинна виконуватися перевірка на стійкість (вертикальні коливання завжди стійкі). Дослідження показують, що практично у всіх локомотивів існує так звана **критична швидкість** $V_{кр}$, при якій відбувається втрата стійкості прямолінійного рівномірного руху,

і значення окремих координат починають зростати. Наростання амплітуд коливань обмежується гребенями бандажів. Амплітуди коливань колісних пар визначаються поперечним зазором в рейковій колії. **Поперечним зазором в рейковій колії** називається сумарний зазор між бічною гранню рейки і гребенем бандажа правого колеса і лівого. В цьому випадку коливання будуть мати однакову амплітуду (амплітуда обмежується зазором в колії) і частоту. Такі коливання називаються **автоколиваннями**. Автоколивання небезпечні тим, що викликані ними сили інтенсивно наростають зі збільшенням швидкості руху локомотива, внаслідок чого знижується безпека руху.

Як вказувалося, рух одиничної колісної пари нестійкий при будь-якій швидкості. Для забезпечення стійкості необхідно закріпити колісну пару у візку за допомогою поздовжніх і поперечних зв'язків (повідків). Розглянемо, як впливає швидкість на стійкість колісної пари (рис. 2.24), пов'язаної з візком за допомогою пружних поздовжніх зв'язків з жорсткістю \mathcal{J}_x (жорсткість сайлент-блоків повідків) і поперечних – з жорсткістю \mathcal{J}_y (жорсткість торцевих шайб).

У розрахунку контакт гребеня колеса з рейкою не враховується, тому всі формули справедливі тільки до моменту, поки не обраний поперечний зазор в колії. При віднесенні колісної пари по напрямку осі y_k і кутовому зсуві щодо осі z_k , крім сил для одиночної колісної пари, додатково виникають пружна сила F_n , спрямована проти зміщення колісної пари, і момент пружних сил M_n , спрямований проти обертання колісної пари. Сила пружності в поперечному зв'язку колісної пари з рамою візка визначається так:

$$F_n = \mathcal{J}_y \cdot y. \quad (2.167)$$

Момент пружних поздовжніх сил визначається за формулою

$$M_n = 2 \cdot F_x \cdot S = 2 \cdot \mathcal{J}_x \cdot S^2 \cdot \varphi_z. \quad (2.168)$$

Рівняння бічного віднесення пов'язаної колісної пари має вигляд

$$F_{in} + F_{ky}^B + F_{ky}^D + 2 \cdot F_n = 0. \quad (2.169)$$

Рівняння коливання виляння з урахуванням моменту пружності

$$M_{in} + S \cdot F_{kx}^B - S \cdot F_{kx}^D + M_n = 0. \quad (2.170)$$

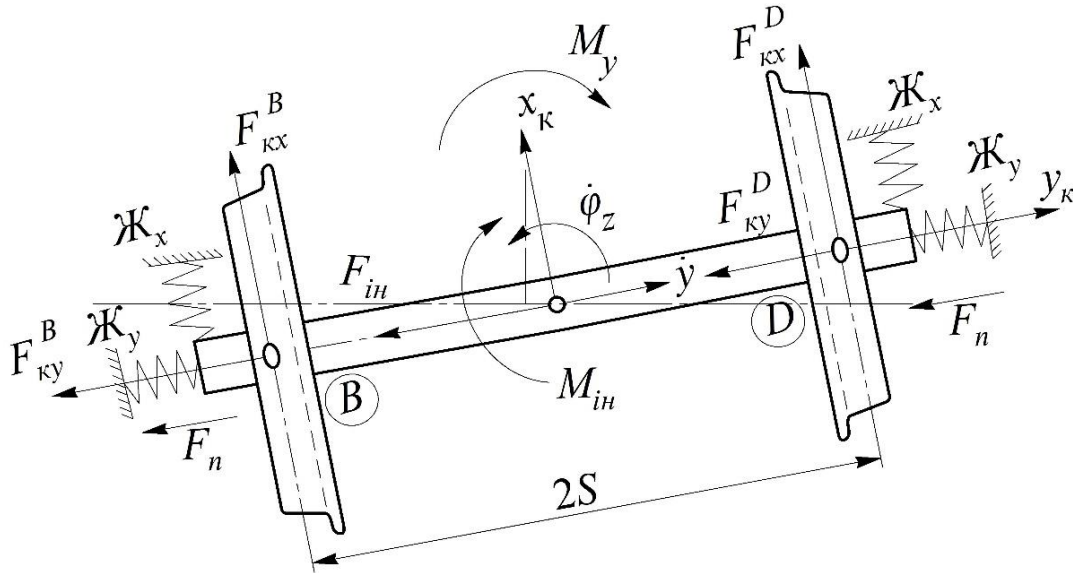


Рис. 2.24. Сили, що діють на колісну пару, пов'язану з візком пружними зв'язками

Остаточні рівняння руху колісної пари, пов'язаної з візком пружними зв'язками, мають такий вигляд:

$$m_{kn} \cdot \ddot{y} + 2 \cdot k \cdot \left(\frac{1}{V} \cdot \dot{y} + \phi_z \right) + 2 \cdot \mathcal{J}_y \cdot y = 0; \quad (2.171)$$

$$j_{kn}^z \cdot \ddot{\phi}_z + 2 \cdot k \cdot S \cdot \left(\frac{S}{V} \cdot \phi_z - \frac{i}{r} \cdot y \right) + 2 \cdot \mathcal{J}_x \cdot S^2 \cdot \phi_z = 0. \quad (2.172)$$

Критична швидкість залежить від конусності бандажів, а також від інерційних, пружних, дисипативних і геометричних параметрів локомотивів.

Впливають на стійкість також характеристики та параметри зв'язків візків з кузовом. Тому визначати критичну швидкість

необхідно для екіпажа в цілому. Величини цих параметрів вибирають таким чином, щоб $V_{кр}$ перебувала поза діапазоном швидкостей руху, прийнятих в експлуатації. При дослідженні стійкості задають початкові умови на віднесення першої колісної пари, і змінюючи швидкість руху, аналізують процес коливань віднесення і виляння.

Критичному значенню швидкості локомотива відповідає певний характер втрат його стійкості з переважним зростанням амплітуд по одній з узагальнених координат: віднесення колісної пари, візка кузова; виляння колісної пари, візка, кузова.

В реальних умовах основну небезпеку становить втрата стійкості руху колісних пар і візка.

2.6.5. Визначення критичної швидкості за стійкістю

Розглянемо визначення критичної швидкості для колісної пари, пов'язаної пружно з візком (рис. 2.24). Дослідження стійкості руху може бути зведене до дослідження нульового розв'язання системи рівнянь так званого збуреного руху. А. М. Ляпунов показав, що в багатьох випадках стійкість може бути досліджена за лінеаризованим рівнянням руху. У завданнях малих коливань, описуваних системою лінійних диференціальних рівнянь (2.171) і (2.172), перевірка стійкості розв'язань зводиться до перевірки обмежень значень узагальнених координат в будь-який момент часу. Для цього характеристичні показники (корені або власні значення), знайдені з рівняння, повинні задовольняти умови:

1) якщо дійсні частини всіх коренів характеристичного рівняння негативні, то невимушений рух стійко незалежний від членів вище першого порядку малості;

2) якщо серед коренів характеристичного рівняння знайдеться хоча б один з позитивною дійсною частиною, то невимушений рух нестійкий незалежно від членів вище першого порядку малості;

3) якщо один або декілька коренів мають нульові дійсні (рос. «вещественные») частини, то про стійкість вихідної системи не можна судити за лінійним наближенням.

Розглянемо визначення характеристичних показників для виразів (2.171) і (2.172). Рішення системи рівнянь (2.171) і (2.172) будемо шукати, використовуючи формули

$$y = D_1 \cdot e^{pt}; \quad (2.173)$$

$$\varphi_z = D_2 \cdot e^{pt}. \quad (2.174)$$

Після підстановки цих виразів в систему рівнянь (2.171) і (2.172) отримаємо систему алгебраїчних рівнянь для визначення характеристичних показників з умови рівності нулю визначника системи:

$$\begin{vmatrix} m_{kn} \cdot p^2 + 2 \cdot \frac{k}{V} \cdot p + 2 \cdot \mathcal{J}_y & 2 \cdot k \\ -2 \cdot k \cdot S \cdot \frac{i}{r} & J_{kn}^z \cdot p^2 + 2 \cdot k \cdot \frac{S^2}{V} \cdot p + 2 \cdot \mathcal{J}_x \cdot S^2 \end{vmatrix} = 0. \quad (2.175)$$

Розкривши цей визначник, отримаємо характеристичне рівняння

$$\begin{aligned} & m_{kn} \cdot J_{kn}^z \cdot p^4 + 2 \cdot \frac{k}{V} \cdot (S^2 \cdot m_{kn}^2 + J_{kn}^z) \cdot p^3 + \\ & + 2 \cdot \left(2 \cdot \frac{k^2 \cdot S^2}{V^2} + m_{kn} \cdot \mathcal{J}_x \cdot S^2 + J_{kn}^z \cdot \mathcal{J}_y \right) \cdot p^2 + \\ & + 4 \cdot \frac{k \cdot S^2}{V} \cdot (\mathcal{J}_x + \mathcal{J}_y) \cdot p + 4 \cdot \mathcal{J}_x \cdot \mathcal{J}_y \cdot S^2 + 4 \cdot k^2 \cdot S \cdot \frac{i}{r} = 0. \quad (2.176) \end{aligned}$$

Як показують випробування високошвидкісних поїздів, критична швидкість за впливанням залежить від маси візка, його бази, характеристик буксових зв'язків, ступеня зносу бандажа і рейки, а також поперечного зазора в колії. Вона тим нижче, чим більше маса візка, менше його база, нижче навантаження на вісь, менше зазор в колії і більш зношені бандаж і рейки. Особливо велику роль відіграють характеристики поздовжніх і поперечних

буксових зв'язків – якщо зв'язки жорсткі або з зазором (це типово зокрема для вантажних візків), критична швидкість може знизитися до рівня експлуатаційних швидкостей, що різко збільшує поперечний вплив візка на колію.

Таким чином, для режиму руху в прямих ділянках колії і кривих великого радіуса найважливішим резервом зниження поперечного впливу на колію є створення рухомого складу з візками, що мають критичну швидкість за вилянням вище експлуатаційної при будь-якому ступені зносу бандажа і рейки, який зустрічається в експлуатації. Режим руху в крутих кривих характеризується великим кутом набігання напрямних колісних пар на рейку і відповідно так званим фактором зносу гребеня бандажа і рейки.

Питання для самоконтролю

1. Які види коливань спостерігаються під час руху одиночної колісної пари по колії?
2. Якими способами може відбуватися процес кочення колісної пари?
3. Від чого залежить умова кочення колісної пари з ковзанням?
4. У чому полягає умова чистого кочення колісної пари?
5. У чому полягає особливість руху колісної пари в режимі кочення без проковзування?
6. Як визначається величина зміни радіуса бандажа при поперечному зсуві колісної пари щодо осі колії?
7. Від чого залежить довжина хвилі віднесення або виляння?
8. Як можна знизити інтенсивність звивистого руху колісної пари?
9. При якому допущенні можливий режим кочення колісної пари без проковзування?
10. Що таке відносна швидкість проковзування?
11. Що називається стійкістю руху?
12. Чому рух одиничної колісної пари нестійкий при будь-якій швидкості?
13. Що таке набігання гребеня бандажа на рейку, і за яких умов воно відбувається?

14. Чим небезпечна втрата стійкості?
15. Яка швидкість називається критичною?
16. Поясніть, що таке поперечний зазор в рейковій колії?
17. Що називають автоколиваннями?
18. Від яких параметрів залежить критична швидкість?
19. Що роблять для забезпечення стійкості руху?
20. Які сили діють на колісну пару, пов'язану пружно з рамою візка?
21. У чому полягає сутність методу А. М. Ляпунова?
22. Як визначається критична швидкість руху візка за умовою стійкості?
23. Яка умова повинна виконуватися при розрахунку стійкості для реальних локомотивів?

2.7. РУХ КОЛІСНОЇ ПАРИ З УРАХУВАННЯМ ДЕФОРМАЦІЇ БАНДАЖА І РЕЙКИ. СИЛИ КРИПУ

2.7.1. Пружне проковзування

При передачі вертикальної сили від колеса на рейку виникає мала зона контакту з великими питомими тисками – *контактна пляма*. У цій контактній плямі відбуваються пружні деформації. Якщо до колеса не прикладені крутний момент або горизонтальна сила (рис. 2.25), то пляма (зона контакту) симетрична щодо вертикальної осі z . Зону контакту визначають на основі теорії пружності (задача Герца). Площа контакту являє собою еліпс. Піввісі еліпса (розмір еліпса) залежать від радіусів кривини контактуючих тіл; нормального тиску в зоні контакту; пружних сталей цих тіл (модуля пружності і коефіцієнтів Пуассона). При прикладанні вертикального навантаження Π до колеса об'ємна епюра нормального тиску на рейку являє напівеліпсоїд, причому найбільший тиск знаходиться в геометричному центрі контактної плями (рис. 2.25, в).

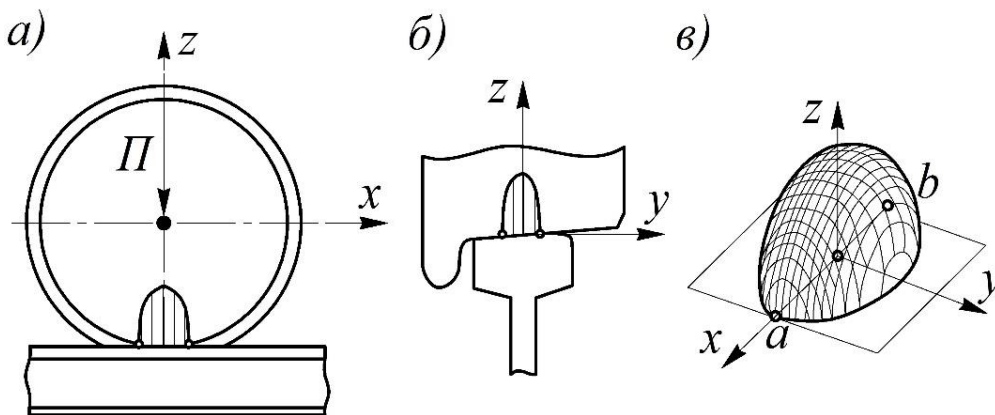


Рис. 2.25. Деформація колеса в зоні контакту при дії вертикальної сили на колесо:
 a – в площині xz ; b – в площині yz ;
 v – об'ємна епюра нормальних тисків

Розглянемо процеси, що відбуваються в зоні контакту під час руху колеса під дією крутного моменту (рис. 2.26). У цьому випадку дотичні контактні поверхні колеса і рейки прагнуть зрушити одна відносно одної (проповзти). При цьому сили

міжмолекулярного тяжіння викликають в них дотичні напруження, а останні викликають пружні або пружно-пластичні поверхневі деформації.

На рис. 2.26 дотичні напруження в контактній плямі ab призводять до подовження (розтягування) робочої поверхні рейки, внаслідок чого точка a переміщається в положення a_1 , а її місце займає точка a_0 . З іншого боку, під впливом дотичних деформацій в колесі волокно oa , яке було раніше прямолінійним, набуло криволінійного обрису oa_1 . Таким чином, під дією обертального моменту M точка на колі кочення перейшла з положення n_0 в положення n , колесо повернулося на кут α , причому геометричний центр колеса o не отримав поступального переміщення. Поверхневі дотичні напруження визначаються елементарними силами тертя, що лежать в площинах, відповідних контактним плямам. Ці сили, підсумовуючись, утворюють силу зчеплення, прикладену до контактної плями колеса (спрямовану в бік руху), і протилежно спрямовану їй силу, прикладену до рейки.

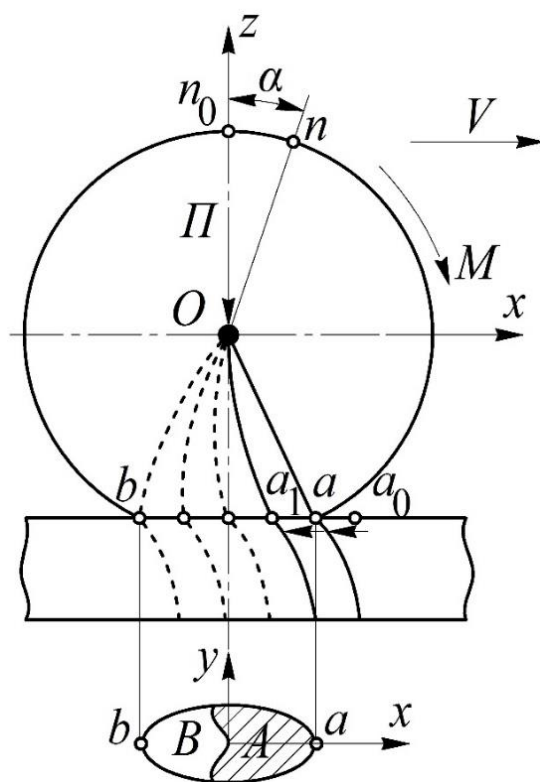


Рис. 2.26. Зсув волокон колеса і рейки при утворенні контактної плями

Зона контакту ділиться на дві області (рис. 2.26). В області *A* зберігається зчеплення і відбуваються пружні деформації волокон, що викликають утворення сили зчеплення (в режимі тяги матеріал бандажа стискається, а рейки – розтягується). В області *B* відбувається явище ковзання, тобто колеса котяться по волокнах рейки, не розвиваючи сил тертя (аналогічно буксуванню).

Внаслідок відмінності деформацій колеса і рейки в зоні контакту шлях, пройдений геометричним центром колеса, менше шляху, підрахованого за кутової швидкості обертання колеса в припущенні кочення без ковзання (або за один оборот колесо проходить відстань, меншу розгорнутої довжини кола кочення). В дотичних поверхнях колеса і рейки відбувається безперервне переміщення волокон назустріч одне одному, при цьому волокна колеса ***«проповзають»*** по волокнах рейки. Таке явище з кінематичної точки зору розглядають як відносно проковзування, але враховуючи причину його виникнення, таке проковзування називають ***пружним, псевдоковзанням*** або ***крипом***. Термін «крип» англійського походження (creep або creeping) позначає проповзування або сповзання. Розрізняють ***поздовжній*** (по напрямку осі *x*), ***поперечний крип*** (у напрямку осі *y*) і обертання колеса щодо вертикальної осі *z* – ***поворотний крип***, що називається ***спіном***.

На рис. 2.26 розглянуто явище поздовжнього крипу, для поперечного крипу і спіну сутність процесів аналогічна.

2.7.2. Сили крипу

Дотичні сили по майданчику контакту, що діють на колесо, мають проекцію на горизонтальну вісь колії, спрямовану в бік руху. Рівнодіючу цих зовнішніх сил називають ***силою крипу*** (в теорії тяги поїздів – ***силою зчеплення***).

Для точного аналізу явищ, що відбуваються в зоні контакту під час руху колеса, необхідно використовувати спеціальні методи теорії пружності, пластичності. У 1926 р. Ф. Картером зроблено висновок, що поздовжні і поперечні сили крипу пропорційні відносним швидкостям ковзання.

Проекції дотичних сил крипу визначаються виразами

$$F_{kx} = -k_x \cdot \varepsilon_x; \quad (2.177)$$

$$F_{ky} = -k_y \cdot \varepsilon_y, \quad (2.178)$$

де ε_x , ε_y – відносні швидкості ковзання в напрямку осі X і Y відповідно, які для точок B і D (рис. 2.23) визначаються такими виразами:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{xB} = -\varepsilon_{xD} = \frac{\bar{V}_{Bx}}{V} = -\frac{\bar{V}_{Dx}}{V}; \quad (2.179)$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{yB} = \varepsilon_{yD} = \frac{\bar{V}_{By}}{V} = \frac{\bar{V}_{Dy}}{V}, \quad (2.180)$$

де \bar{V}_{Bx} , \bar{V}_{By} – проекції швидкостей проковзування на осі X і Y для точки B , що визначаються за формулами (2.163) і (2.164).

З урахуванням формул (2.148), (2.149), (2.163) і (2.164) вирази для дотичних сил крипу набудуть такого вигляду:

$$F_{kx} = -k_x \cdot \left(\frac{i}{r} \cdot y - \frac{S}{V} \cdot \dot{\varphi}_z \right); \quad (2.181)$$

$$F_{ky} = -k_y \cdot \left(\frac{1}{V} \cdot \dot{y} + \varphi_z \right), \quad (2.182)$$

де k_x , k_y – коефіцієнти крипу, які залежать від вертикальної сили, що передається від колеса на рейку, діаметра колеса, радіуса головки рейки, пружних сталей. Знак « \rightarrow » (мінус) означає, що сили крипу спрямовані проти швидкостей проковзування. У найпростішому випадку коефіцієнти крипу визначаються за формулою

$$k_x = k_y = k = \chi \cdot \sqrt{P \cdot r}, \quad (2.183)$$

де χ – коефіцієнт, що враховує вплив випадкових факторів.

Дані експериментів показують, що сили крипу мають великий діапазон. Причиною цього є вібрації, забруднення поверхонь кочення, температура, вологість і т. д. Тому значення коефіцієнта крипу k можуть змінюватися в широких межах.

На основі лабораторних дослідів встановлено, що для верхньої оцінки коефіцієнта крипу можна використовувати таку формулу:

$$k_{\max} = 8000 \cdot \sqrt{P \cdot r \cdot 10^{-1}}. \quad (2.184)$$

Наприклад, для електровозів ВЛ80 при $P = 115$ кН і $r = 0,625$ м $k_{\max} = 21440$ кН.

Нижню межу коефіцієнта крипу можна визначати за формулою

$$k_{\min} = P \cdot (235 - 2,4 \cdot P + 10^{-2} \cdot P^2). \quad (2.185)$$

Для того ж електровоза $k_{\min} = 10465$ кН.

У загальному випадку, крім сил P , поздовжньої F_{kx} і поперечної F_{ky} можуть бути всі шість реакцій (три сили і три моменти). Вважається, що моменти M_{kx} і M_{ky} малі і їх зазвичай не враховують.

Відома теорія взаємодії колеса і рейки, розроблена Калкером. Відповідно до цієї теорії в міру того, як частки матеріалу потрапляють в область контакту, вони вступають у взаємодію на передньому краї плями контакту. У цей момент вони не відчують тяги.

Потім частинки проникають в область контакту вздовж лінії, паралельної напрямку кочення, і внаслідок відсутності проковзування або наявності зчеплення починає розвиватися зусилля тяги. Частинки залишають область контакту, і зусилля тяги падає до нуля.

Крім того, в цій теорії додатково враховується пружний момент «обертання» (поворотний крип) колісної пари щодо вертикальної осі, який називається *спін* M_{kz} .

Відповідно до цієї теорії сили крипу і момент спіну визначаються як добуток крипів в точці контакту колеса і рейки на коефіцієнти крипів:

$$F_{kx} = -k_x \cdot \varepsilon_x; \quad (2.186)$$

$$F_{ky} = -k_y \cdot \varepsilon_y - k_{y\omega} \cdot \varepsilon_\omega; \quad (2.187)$$

$$M_{kz} = -k_\omega \cdot \varepsilon_\omega - k_{y\omega} \cdot \varepsilon_y, \quad (2.188)$$

де k_ω – коефіцієнт спіну;

$k_{y\omega}$ – коефіцієнт крипу, що характеризує взаємний вплив поперечного крипу k_y і спіну k_ω ;

ε_ω – спін, який визначається як відношення кутової швидкості повороту колеса щодо центру плями контакту ω_z до поступальної швидкості.

Коефіцієнти k_ω , $k_{y\omega}$, k_x і k_y визначаються залежно від пружних властивостей матеріалів колеса і рейки, радіуса колеса і навантаження від колеса на рейку.

Наприклад, для електровозів ВЛ80 $k_x = 19190$ кН, $k_y = 13990$ кН, $k_{y\omega} = 60,9$ кН, $k_\omega = 0,18$ кН. Як видно, k_ω набагато менше інших коефіцієнтів. Однак його необхідно враховувати, так як доданок, що входить в $M_{kz} - k_\omega \cdot \varepsilon_\omega$, при великих швидкостях значно впливає на стійкість руху колісної пари. Крім того, $k_{y\omega}$ набагато менше k_x і k_y , проте доданок $k_{y\omega} \cdot \varepsilon_y$ співмірний з $k_y \cdot \varepsilon_y$.

Сили крипу можна вважати лінійно залежними від відносних швидкостей проковзування лише в обмеженому діапазоні останніх (рис. 2.27).

Однак зі зростанням швидкості пружного ковзання відбувається відхилення цієї залежності від прямолінійної. У міру

наближення до максимуму подальше збільшення ковзання вже не викликає зростання сили крипу (сили тяги). Тому, як тільки швидкість пружної деформації волокон матеріалу бандажа при передачі обертового моменту тягового двигуна перевищить певну величину, що залежить при інших рівних умовах від властивостей матеріалу бандажа і рейки, порушиться пропорційність між силами і деформаціями, і на пружне ковзання накладеться дійсне ковзання колеса по рейці. При цьому сила крипу (сила тяги) перевищить силу зчеплення, внаслідок чого настане буксування колеса, і сила буде спадати з ростом відносної швидкості.

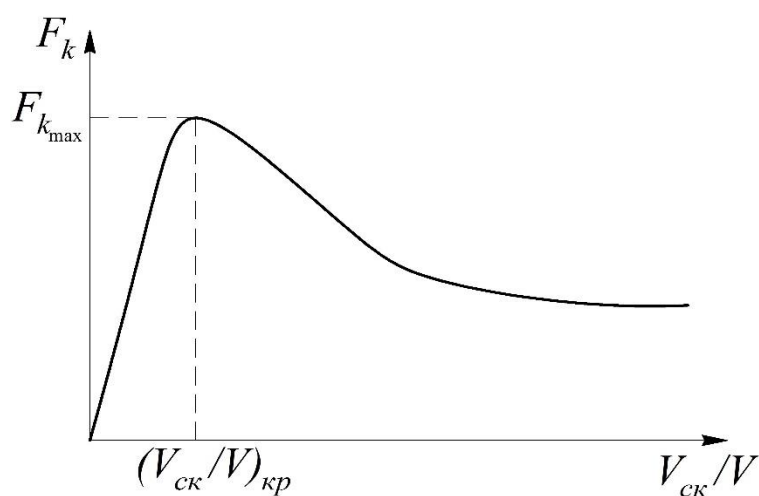


Рис. 2.27. Залежність сили крипу від відносної швидкості проковзування

Дослідним шляхом встановлено, що найбільші значення відношення $(V_{ск}/V)_{кр}$, що визначають коефіцієнт зчеплення в момент початку буксування, не перевищують значення $(V_{ск}/V)_{кр} = 0,25 \div 2,5 \%$ ($0,0025 \div 0,025$).

Величина $(V_{ск}/V)_{кр}$ за результатами експериментів визначається для різних станів поверхонь рейок (сухі, вологі, замаслені, з піском, вода з піском і т. д.). На рис. 2.27 показана залежність сили крипу (тяги) від відносної швидкості проковзування. Такий же характер матиме залежність коефіцієнта зчеплення електровоза від швидкості ковзання, так як сила тяги визначається цим коефіцієнтом.

В області швидкостей ковзання, менших $(V_{ск}/V)_{кр}$, існує пружне ковзання і явного буксування немає. Коефіцієнт зчеплення зростає пропорційно швидкості пружного ковзання. При збільшенні крутного моменту тягового двигуна у міру наближення до критичного ковзання залежність коефіцієнта зчеплення від ковзання стає внаслідок збільшення пластичних деформацій все більш нелінійною.

При швидкостях ковзання, більших $(V_{ск}/V)_{кр}$, через значні зсуви бандажа і рейки настає зрив зчеплення і відбувається буксування колісної пари.

Коефіцієнти крипу, розраховані за формулами (2.184) і (2.185), отримані в результаті лабораторних дослідів при невеликих величинах відносного проковзування (до 0,1 % або 0,001). У реальних умовах цей коефіцієнт залежить не тільки від навантаження на колесо, але і від стану контактуючих поверхонь колеса і рейки, зокрема від того, подається чи ні пісок під колеса локомотива для попередження буксування.

Зважаючи на це становить інтерес зіставлення величини коефіцієнта k з коефіцієнтом зчеплення ψ , пов'язаних співвідношенням

$$\psi = \frac{k \cdot (V_{ск}/V)}{N}. \quad (2.189)$$

За дослідними даними, для електровоза ВЛ80 коефіцієнт ψ при годинному режимі дорівнює 0,28, а при максимальній силі тяги – 0,4. З формули (2.189) випливає, що для гранично допустимого значення $(V_{ск}/V)_{кр} = 0,025$, при $\psi = 0,4$ коефіцієнт k має дорівнювати $16 \cdot N$, а для $(V_{ск}/V)_{кр} = 0,01$, при $\psi = 0,4$ коефіцієнт $k = 40 \cdot N$. Тому для коефіцієнта пружного прослизання k встановимо інтервал зміни

$$12 \cdot N \leq k \leq 36 \cdot N. \quad (2.190)$$

2.7.3. Диференціальні рівняння руху колісної пари без контакту гребеня з рейкою

Розглянемо рух одиночної колісної пари локомотива, що передає вертикальну силу $2 \cdot \Pi$ на рейки (рис. 2.28). Нормальні реакції рейок N_B і N_D в середньому положенні колісної пари в рейковій колії (при рівності радіусів кіл кочення двох коліс) рівні. При переміщенні колісної пари поперек колії на відстань y її поздовжня вісь y_K повернеться на кут φ_x , так як кола кочення стають різними, і займе положення y'_K . Кутом β на рис. 2.28 позначений кут між поверхнею бандажа і поздовжньою віссю колісної пари. Враховуючи малість кутів β і φ_x , можна вважати, що $\sin(\beta + \varphi_x) = \beta + \varphi_x$ і $\sin(\beta - \varphi_x) = \beta - \varphi_x$, відповідно косинуси цих кутів дорівнюють одиниці.

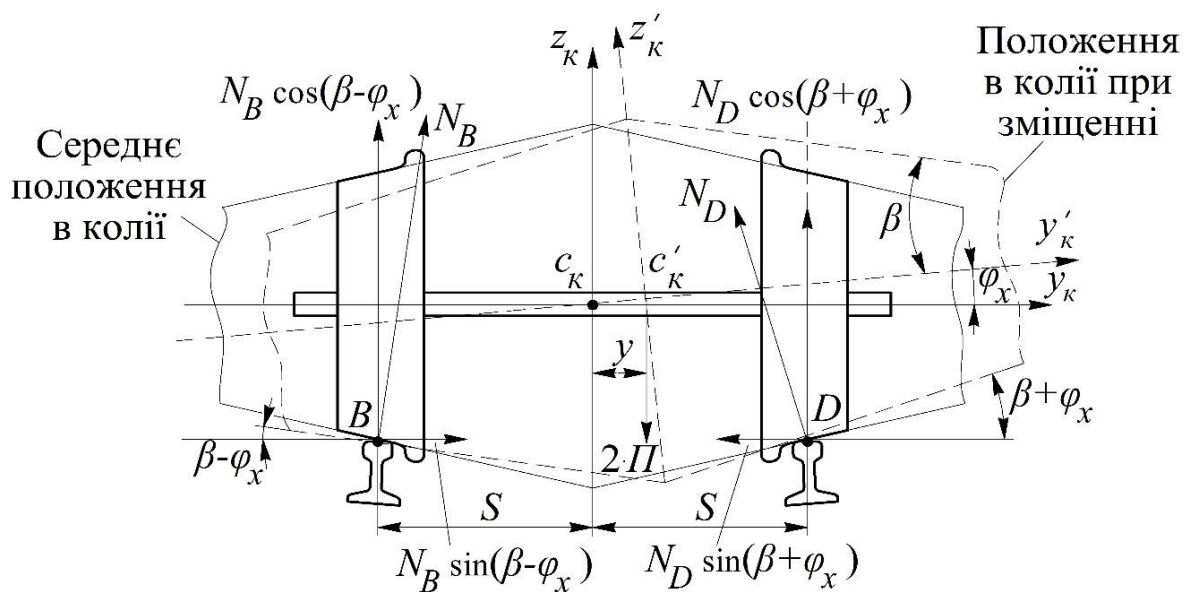


Рис. 2.28. Сили, що діють на колісну пару під час звивистого руху

Враховуючи зазначені допущення, реакцію рейок, прикладену до кожного колеса, можна розкласти в перпендикулярній до осі колії площині на складові – вертикальні N_B , N_D і горизонтальні поперечні $N_B \cdot (\beta - \varphi_x)$, $N_D \cdot (\beta + \varphi_x)$. Вертикальні складові N_B і N_D визначаються силою $2 \cdot \Pi$. Горизонтальні складові залежать від тиску колеса на рейку, кута

нахилу поверхні кочення β і величини кута φ_x , який залежить від величини поперечного зміщення y . Поперечні складові реакцій кожної рейки спрямовані до осі колії. Для нової колісної пари з конічними колесами вони наближено врівноважуються при всіх відхиленнях її від середнього положення, поки не відбудеться торкання гребенем рейки.

Розглянемо тепер рух колісної пари з урахуванням горизонтальної взаємодії її з рейковою колією (рис. 2.29).

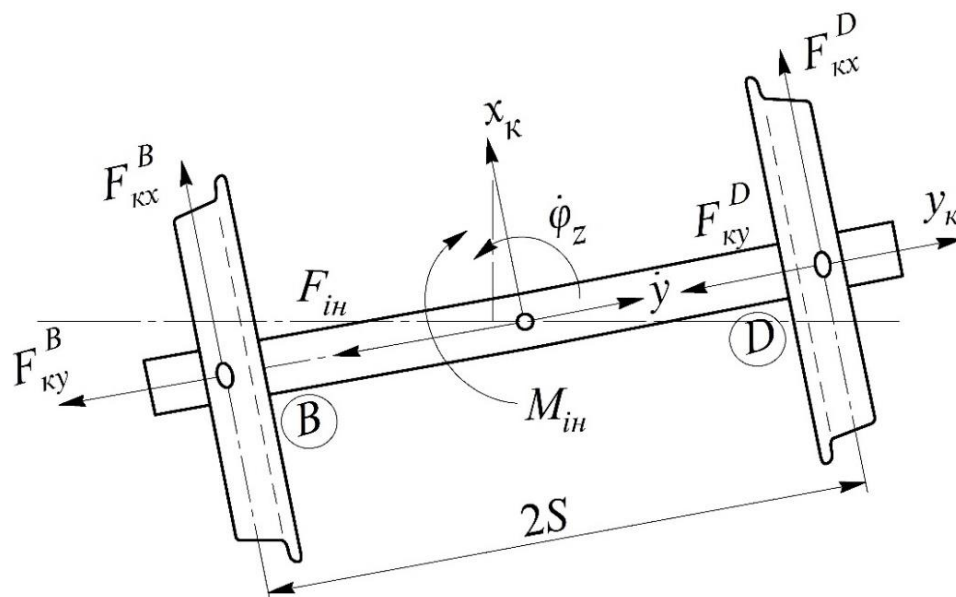


Рис. 2.29. Сили, що діють на колісну пару під час звивистого руху

При бічному віднесенні колісної пари по напрямку осі y_k і кутовому зсуві щодо осі z_k (проти годинникової стрілки) виникають відповідно сила інерції F_{in} , спрямована проти прискорення, і момент інерції M_{in} , спрямований проти обертання колісної пари. Сила і момент інерції визначаються як

$$F_{in} = m_{кп} \cdot \ddot{y}, \quad (2.191)$$

$$M_{in} = J_{кп}^z \cdot \ddot{\varphi}_z, \quad (2.192)$$

де $m_{кп}$ – маса колісної пари;

$J_{кп}^z$ – момент інерції колісної пари щодо осі z_k .

Крім інерційних сил і моментів, на колісну пару діють проекції сил в точках контакту бандажів з рейками (сили крипу). Проекції поперечних сил в точках B і D F_{ky}^B , F_{ky}^D (рис. 2.29) спрямовані проти зсуву колісної пари. Проекції поздовжніх сил F_{kx}^B , F_{kx}^D спрямовані по напрямку руху колісної пари. Проекції сил крипу визначаються виразами (2.177) і (2.178). У формулі (2.178) знак « \leftarrow » («мінус») врахований напрямком сил F_{ky}^B і F_{ky}^D на рис. 2.28.

Диференціальні рівняння звивистого руху колісної пари при використанні лінійної теорії крипу (теорії Картера) отримують з використанням принципу Даламбера. Рівняння бічного віднесення має вигляд

$$F_{in} + F_{ky}^B + F_{ky}^D = 0. \quad (2.193)$$

Рівняння коливання виляння має вигляд

$$M_{in} + S \cdot F_{kx}^B - S \cdot F_{kx}^D = 0. \quad (2.194)$$

Підставляючи в отримані рівняння інерційні характеристики за формулами (2.191), (2.192), а також сили крипу (2.177) і (2.178) з урахуванням відносних швидкостей проковзування (крипів), отримаємо рівняння руху одиночної колісної пари:

$$m_{kn} \cdot \ddot{y} + 2 \cdot k \cdot \left(\frac{1}{V} \cdot \dot{y} + \varphi_z \right) = 0; \quad (2.195)$$

$$J_{kn}^z \cdot \ddot{\varphi}_z + 2 \cdot k \cdot S \cdot \left(\frac{S}{V} \cdot \dot{\varphi}_z - \frac{i}{r} \cdot y \right) = 0. \quad (2.196)$$

Ці рівняння описують рух колісної пари, що супроводжується її бічним віднесенням і вилянням (звивистий рух).

Питання для самоконтролю

1. Що називають контактною плямою і що являє собою зона контакту?
2. Що означає пружне проковзування, або крип?
3. Що називають силою крипу?
4. Як визначаються дотичні сили крипу?
5. Від яких параметрів і факторів залежать сили крипу?
6. Що таке коефіцієнт крипу і від чого він залежить?
7. У чому відмінність теорій щодо визначення сил крипу Картера і Калкера?
8. Що називають спіном і чому його необхідно враховувати в розрахунках?
9. Як називається відносна швидкість проковзування, при якій відбувається зрив зчеплення?
10. Чим пояснюється розкид $(V_{ск} / V)_{кр} = 0,25 \div 2,5 \%$?
11. Якими видами коливань характеризується рух одиночної колісної пари?
12. Які сили діють на одиночну колісну пару під час руху по прямій ділянці колії?
13. Як впливає швидкість руху одиночної колісної пари на її коливання?
14. Як впливає величина коефіцієнта крипу на коливання колісної пари?
15. Як впливає величина конусності поверхні кочення колеса на коливання одиночної колісної пари?

2.8. ПОКАЗНИКИ ДИНАМІЧНИХ ЯКОСТЕЙ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ЛОКОМОТИВІВ

2.8.1. Поняття про якість механічної частини локомотивів

Локомотиви в цілому і зокрема їх механічна частина повинні задовольняти певні вимоги експлуатації, які подають у вигляді сукупності показників якості.

Поняття «*якість*» охоплює властивості об'єкта, які обумовлюють його придатність задовольняти певні вимоги відповідно до призначення об'єктів.

Кількісну характеристику такої придатності об'єктів описують за допомогою *показників якості*, вибір яких залежить від призначення об'єкта.

Для об'єктів багатоцільового призначення, таких, наприклад, як ЕРС, може бути значна кількість показників як безрозмірних, так і виражених в різних одиницях, наприклад в кілометрах за годину, годинах і т. д.

Показники якості підрозділяються на *11 основних груп*: призначення; безпеки; економічного використання сировини, матеріалів, палива, енергії; надійності; ергономічні; естетичні; технологічні; транспортабельності; стандартизації та уніфікації; патентно-правові; екологічні.

Кожна з цих груп у свою чергу ділиться на підгрупи: наприклад, *показники призначення* – класифікаційні, функціональні та технічної ефективності, конструктивні, складу і структури; *показники безпеки* – фізичні, хімічні, біологічні, психофізіологічні; *показники надійності* – безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності, зберігання; *показники ергономічні* – гігієнічні, антропометричні, фізіологічні, психофізіологічні, психологічні.

Стосовно до механічної частини показники якості ділять на два великі класи:

- *перший* – загальні для механічної частини і локомотива в цілому як єдиного технічного засобу;
- *другий* – специфічні для механічної частини, що враховують її основні особливості, що відрізняють механічну частину від інших складових частин локомотива.

До *специфічних* відносять показники, які характеризують поведінку локомотива як механічної системи під час руху по рейковій колії. Оскільки визначальну роль при цьому відіграють коливальні процеси, ці показники прийнято називати *показниками динамічних якостей*. До них відносять показники:

- *віброзахисту*, що визначають ступінь захисту обладнання локомотива, а також шляхи захисту від вібрацій, які виникають під час руху локомотива;

- *безпеки руху*, що характеризують ступінь забезпечення безаварійності руху по рейковій колії;

- *плавності ходу*, що відносяться до підгрупи гігієнічних показників і характеризують ступінь впливу вібрацій локомотива на організм людини.

Проектування, виготовлення, експлуатація та ремонт рухомого складу виконуються таким чином, щоб забезпечувався допустимий рівень показників динамічних якостей протягом усього терміну його служби.

З усіх загальних показників якості локомотивів обмежимося розглядом основних груп: показників призначення та безпеки.

Показники призначення. Ці показники в свою чергу діляться на чотири підгрупи. До підгрупи *класифікаційних показників* належить призначення локомотива – вантажний, пасажирський, маневровий, високошвидкісний; для електропоїздів – приміський, міжміський і т. д.

У підгрупу *функціональних показників і показників технічної ефективності* входять продуктивність, енергоємність, економічність, потужність, сила тяги, швидкість і т. д. *Конструктивними показниками* є рід струму і напруга, тип енергетичної або перетворювальної установки, ступінь автоматизації керування, тип тягового приводу і клас тягової передачі, схема ресорного підвішування, масогабаритні показники і т. д. До *показників складу і структури* відносять осьову характеристику і «составність», тобто кількість секцій локомотива, кількість причіпних і моторних вагонів електропоїзда і т. д.

З конструктивних показників розглянемо докладніше *масогабаритні* показники, які стосовно механічної частини локомотива включають в себе:

- **повну масу** (масу брутто) – масу в навантаженому стані; для вагонів електропоїздів та метрополітену враховується повне завантаження кузова пасажирами (середню масу пасажирів приймають 70 кг);

- **зчіпну вагу**, тобто вагу, що припадає на рухомі осі локомотива (для тепловозів з урахуванням 1/3 запасу піску і палива). Зчіпна вага повинна бути рівномірно розподілена між рухомими осями. Це досягається взаємним відповідним розташуванням обладнання в кузові і опор кузова на візок, визначеним спеціальним розрахунком розваження екіпажа. Зчіпна вага локомотива визначає силу статичного натиснення рушійної колісної пари локомотива на рейки ($2 \cdot P$);

- **службову масу** – масу екіпірованого локомотива (при 2/3 запасу піску і палива);

- **власну масу** (масу нетто) – масу в порожньому стані без пасажирів, піску і палива;

- **питому масу** (матеріаломісткість) – масу, віднесену до одиниці потужності або до кількості пасажирів; для сучасних електровозів питома маса становить $19 \div 20$ кг/кВт;

- **місткість кузова** (для вагонів електропоїздів та метрополітену), яка визначається кількістю сидячих і стоячих пасажирів з розрахунку 7 люд на 1 м^2 вільної площі салонів і тамбурів;

- **планування кузова**, обумовлене його розмірами і розміщенням основного обладнання;

- **габаритні обмеження**, які визначаються будівельним обрисом локомотива.

Будівельний обрис – контур, що лежить в площині, перпендикулярній осі колії, в межах якого повинні бути розміщені всі елементи проектованого рухомого складу.

Цей контур будують по одному з габаритів рухомого складу Т, 1-Т, 0-Т, 01-Т, 02-Т або 03-Т, зменшуючи його розміри на максимальні зміщення механічної частини, що виникають в результаті бічних переміщень, осадки ресор, прогину рами і зносів ходової частини.

Не враховуються зміщення локомотива, викликані станом окремих елементів колії і коливаннями на ресорному підвішуванні.

Зміни натиснення колісних пар на рейки $\Delta\Pi$, що виникають з різних причин, оцінюють за допомогою **коефіцієнта використання зчипної ваги**

$$\eta_v = \frac{2\Pi - \Delta\Pi}{2\Pi}. \quad (2.197)$$

Для сучасних візкових локомотивів середнє значення η_v знаходиться в діапазоні $0,86 \div 0,94$ відповідно для пасажирських і вантажних локомотивів.

Показники безпеки для обслуговуючого персоналу і ергономічні показники якості локомотивів. Показники впливають на конструкцію і компонування основних вузлів локомотивів, їх кузовів та особливо кабін машиніста. Нормуються вимоги до конструкції і параметрів пристроїв сигналізації та зв'язку, гальмівних і ударно-тягових пристроїв, до протипожежного обладнання, знаків безпеки, маркування і забарвлення. Регламентуються методи контролю за виконанням вимог безпеки та ергономіки, а також випробувань локомотивів на відповідність цим вимогам.

2.8.2. Показники, що оцінюють віброзахисні властивості механічної частини

До показників віброзахисту належать:

- **максимальні прискорення кузова**, що характеризують динамічні сили, які діють на обладнання локомотива;

- **максимальні переміщення кінців кузова**, які визначаються габаритними обмеженнями та умовами роботи автозчеплення;

- **коефіцієнти вертикальної $K_{Д}^B$ і горизонтальної $K_{Д}^Г$ динаміки**, які можна визначити виходячи з прогинів Δ так:

$$K_{ДП}^B = \frac{\Delta_{Д}^B}{\Delta_{СТ}}, \quad (2.198)$$

$$K_{DF}^{\Gamma} = \frac{\Delta_D^{\Gamma}}{\Delta_{CT}}, \quad (2.199)$$

або виходячи з сил F , що виникають в окремому комплекті ресорного підвішування:

$$K_{DF}^B = \frac{F_D^B}{F_{CT}}, \quad (2.200)$$

$$K_{DF}^{\Gamma} = \frac{F_D^{\Gamma}}{F_{CT}}. \quad (2.201)$$

Тут показникам динаміки відповідає нижній індекс «Д», статички – «СТ»; вертикальні прогини, сили і напруження мають верхній індекс «В», горизонтальні – «Г». Статичні прогини і сили обумовлені вагою кузова, тягових двигунів, рам візків і т. д. Слід зазначити, що коефіцієнти горизонтальної динаміки мають умовний характер, так як при їх визначенні знаходять відношення горизонтальних динамічних прогинів і сил до відповідних вертикальних статичних. Коефіцієнт K_{DF}^{Γ} обчислюється як відношення горизонтальної рамної сили Y_p до статичної сили Π , що передається від колеса на рейку, тобто

$$K_{DF}^{\Gamma} = \frac{Y_p}{\Pi}. \quad (2.202)$$

Цей коефіцієнт, по суті, близький до запасу стійкості колеса проти сходу з рейок (буде розглянуто нижче);

- **коефіцієнт запасу конструктивного прогину пружин** оцінює неможливість посадки витка пружини на виток і визначається за формулою

$$K_{КП} = \frac{h_{CT} - n_p \cdot d}{\Delta_D}, \quad (2.203)$$

де h_{CT} – висота пружини під статичним навантаженням;

n_p – число робочих витків пружини;

d – діаметр прутка пружини.

В експлуатації локомотивів за певних умов може відбуватися змикання витків пружини, такий випадок називається **пробоєм підвіски**. Допустимі значення максимальних прискорень $[\ddot{q}]$ і коефіцієнтів динаміки $[K_D]$ рекомендовано відділенням комплексних дослідів Всесоюзного науково-дослідного інституту залізничного транспорту та наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Допустимі значення показників динамічних якостей віброзахисту

Вид рухомого складу	Значення показників	
	$[q]$, частки g	$[K_D]$
Локомотиви	0,4/0,35	0,35/0,3÷0,4
Вагони електропоїздів і метрополітену	0,35/0,3	0,35/0,3÷0,4

Примітка. У чисельнику – для вертикальних коливань, в знаменнику – для горизонтальних.

Тут значення $[K_D]$ вказані для буксового підвішування; для кузовного підвішування значення $[K_D]$ рекомендується приймати в 2 рази меншими.

Значення $[K_D] = 0,4$ для горизонтальних коливань відповідає ділянкам колії з щебневим баластом, а $[K_D] = 0,3$ – ділянкам колії з гравійним і піщаним баластом. Допустимі значення максимальних прискорень кузова вказані для діапазону частот від 0 до 4 Гц.

Допустимі значення коефіцієнта запасу конструктивного прогину пружин $[K_{KP}]$ становлять для обох ступенів підвішування локомотивів 1,8÷1,9, для буксового підвішування вагонів електропоїздів та метрополітену – 1,4÷1,5 і для їх кузовного підвішування – 1,6÷1,7. Для показників віброзахисних

властивостей рухомого складу залізниць повинні виконуватися такі умови:

$$\ddot{q}_{\max} \leq [\ddot{q}]; q_{\max} \leq [q]; K_{D_{\max}} \leq [K_D]; K_{KП_{\max}} \leq [K_{KП}]. \quad (2.204)$$

При невиконанні цих умов рухомий склад не можна експлуатувати або необхідно відповідно обмежити максимальну швидкість його руху.

2.8.3. Показники безпеки руху

Показники безпеки руху визначають умови нормального напрямку коліс рейковою колією, відсутність поперечних залишкових деформацій (зсуву) колії, запаси міцності рейок і деталей ходових частин.

До цих показників відносяться:

- стійкість колеса проти сходу з рейок;
- стійкість колії проти зсуву в плані;
- стійкість колії по ширині колії;
- поперечна стійкість екіпажа від перекидання в кривій;
- міцність рейок і ходових частин і т. д.

Розглянемо основні показники.

Стійкість колеса проти сходу з рейок. Передні колеса візків під час руху по прямих або кривих ділянках колії набігають своїми гребенями (рис. 2.30, а) на бічні грані головок рейок.

Кут набігання α в крутих кривих може досягати 0,01 рад і більше. Місце контакту гребеня з головкою рейки знаходиться попереду вертикалі, що проходить через центр осі, величина **попереднього торкання** $\varepsilon = r_k \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta$ (де r_k – радіус колеса, відповідний точці контакту колеса і рейки; β – кут нахилу твірної гребеня бандажа на рис. 2.30, а).

У точці контакту колеса і рейки виникає нормальна сила реакції рейки на тиск гребеня (сила тиску гребеня) N_z (рис. 2.30, б).

Її вертикальна складова V прагне змусити обертальне колесо переміщатися вгору по боковій поверхні рейки, а горизонтальна

складова Y_H (**напрямна сила**) направляє екіпаж по рейковій колії, причому $N = \frac{1}{\sin \beta} \cdot Y_H$; $V = \operatorname{ctg} \beta \cdot Y_H$.

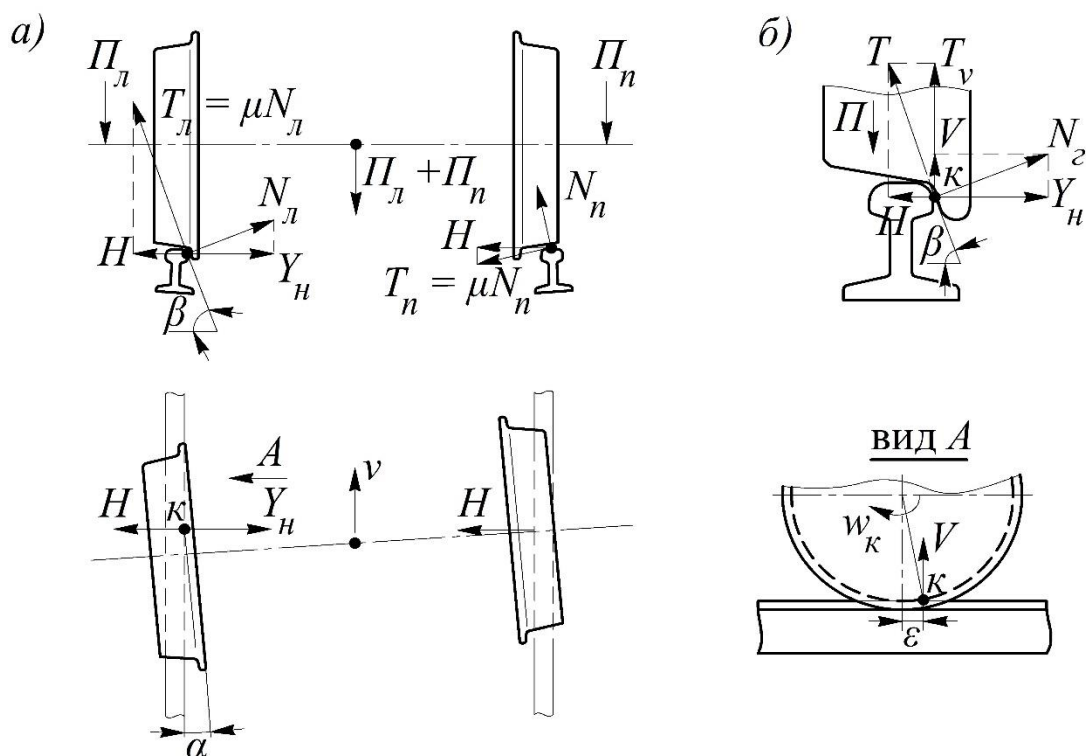


Рис. 2.30. До визначення запасу стійкості колеса проти сходу з рейок

Під дією сили Π_l ліве колесо прагне зісковзнути вниз, однак цьому перешкоджає сила тертя $T = \mu \cdot N$ (тут μ – коефіцієнт тертя). Складові сили тертя визначаються за формулами

$$T_v = T \cdot \sin \beta = \mu \cdot N \cdot \sin \beta = \mu \cdot \sin \beta \cdot \frac{1}{\sin \beta} \cdot Y_H = \mu \cdot Y_H; \quad (2.205)$$

$$H = T \cdot \cos \beta = \mu \cdot N \cdot \cos \beta = \mu \cdot \cos \beta \cdot \frac{1}{\sin \beta} \cdot Y_H = \mu \cdot \operatorname{ctg} \beta \cdot Y_H. \quad (2.206)$$

Крім напрямної сили Y_H , прикладеної до гребеня бандажа, на колісну пару діє ще реакція рами Y_P – **рамна сила**. Горизонтальну реакцію колеса на рейку називають **бічною силою** Y_B (сила, прикладена до бічної грані головки рейки).

Згідно з рис. 2.30, *a* при набіганні лівого колеса на рейку

$$Y_P = Y_H - 2 \cdot H; \quad Y_B = Y_H - H; \quad Y_P = Y_B - H. \quad (2.207)$$

Підставимо вираз (2.206) у формулу, що зв'язує бічну і напрямну сили:

$$Y_B = Y_H - H = Y_H - \mu \cdot \operatorname{ctg} \beta \cdot Y_H = Y_H \cdot (1 - \mu \cdot \operatorname{ctg} \beta); \quad (2.208)$$

звідси

$$Y_H = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta - \mu} \cdot Y_B. \quad (2.209)$$

Підставимо отриманий вираз для Y_H у формули для сил T_v і V :

$$T_v = \frac{\mu \cdot \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta - \mu} \cdot Y_B; \quad V = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta - \mu} \cdot \operatorname{ctg} \beta \cdot Y_B = \frac{1}{\operatorname{tg} \beta - \mu} \cdot Y_B. \quad (2.210)$$

Очевидно, що колесо не буде підніматися вгору по рейці, якщо сума сил $T_v + V$ менше Π . У зв'язку з цим вводять **коефіцієнт запасу стійкості колеса проти сходу з рейок**

$$\kappa_{c.k.} = \frac{\Pi}{T_v + V} = \frac{\operatorname{tg} \beta - \mu}{\mu \cdot \operatorname{tg} \beta + 1} \cdot \frac{\Pi}{Y_B} \geq [\kappa_{c.k.}]. \quad (2.211)$$

Допустиме значення коефіцієнта запасу складає $[\kappa_{c.k.}] = 1,4 \div 1,5$.

Вкочування гребеня колеса на рейку може відбутися тільки при позитивному куті набігання α колісної пари. Цей процес полягає в наступному. При коченні колеса по рейці миттєвий центр швидкостей розташовується в точці контакту колеса і рейки. Гребінь колеса, набігаючи на рейку точкою k (рис. 2.30), ковзає по ньому, сприймаючи нормальну реакцію N_c з боку рейки і силу тертя T , протилежну швидкості ковзання. Вертикальні складові цих сил V і T_v розвантажують поверхні кочення колеса і рейки і зменшують зчеплення між ними. При деякій бічній силі

Y_B поверхні кочення колеса і рейки розвантажуються, і зчеплення переходить в точку k , яка стає миттєвим центром швидкостей. В результаті колесо починає котитися поверхнею гребеня по кромці рейки, не зісковзуючи вниз, і якщо кут набігання залишається позитивним, а зміна сил, що діють на колесо, не викличе порушення зчеплення в новій точці контакту, то таке кочення призведе до вкочування гребеня колеса на поверхню рейки і подальшого сходу колісної пари.

Як видно з формули (2.211), підняття колеса залежить від величини сили Y_B , вертикального навантаження і параметрів бандажа β і коефіцієнта тертя μ .

Розглянемо характер залежності допустимої величини сили $[Y_B]$ при різних параметрах бандажа, прийнявши вертикальне навантаження на колесо $P = 115$ кН і допустиме значення коефіцієнта $\kappa_{с.к.} = 1,45$ (рис. 2.31).

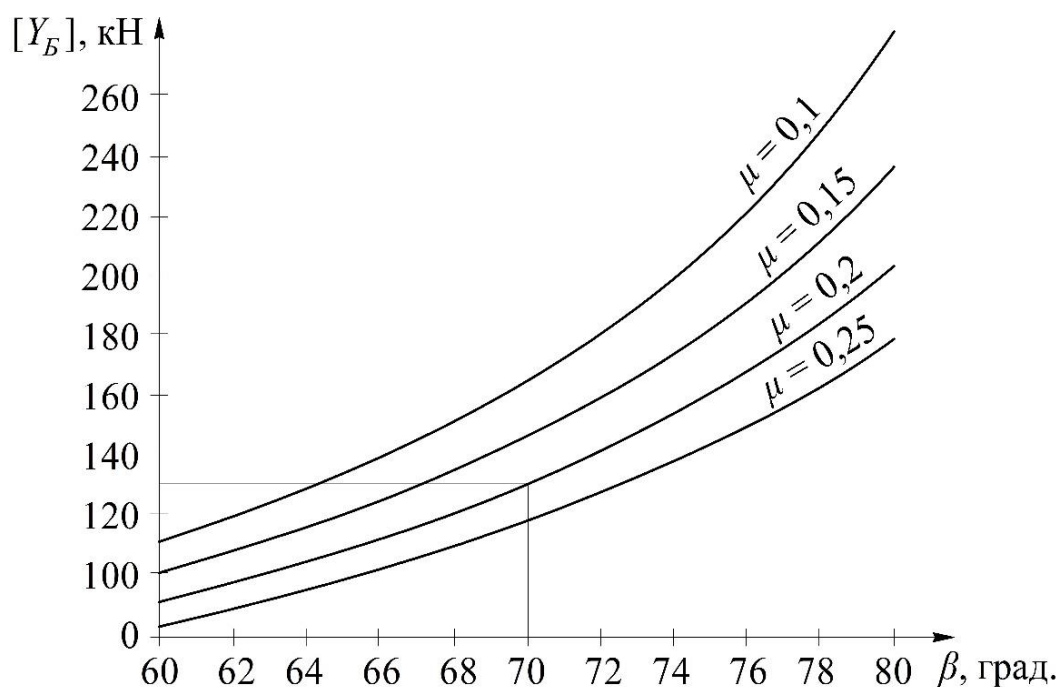


Рис. 2.31. Залежність допустимої сили $[Y_B]$ від кута β і коефіцієнта тертя μ

Як видно з графіка, допустима бічна сила істотно залежить від зазначених параметрів: вона збільшується (збільшується запас стійкості) зі зменшенням коефіцієнта тертя μ і зі збільшенням кута β . Так, для стандартного нового бандажа з кутом $\beta = 70^\circ$ і

$\mu = 0,2$ (сталь по сталі), якщо взяти $K_{c.к.} = 1,45$, то

$$Y_B = \frac{1,45}{1,65} \cdot P = 1,41 \cdot P.$$

Для прийнятого навантаження $P = 115$ кН допустиме значення бічної сили складе $[Y_B] = 1,14 \cdot 1,15 = 130$ кН. Таким чином, найбільша допустима бічна сила за умовою забезпечення стійкості колеса проти сходу з рейки $[Y_B] = 130$ кН при $2P = 230$ кН. Відповідне цьому значення рамної сили визначається так:

$$[Y_P] = [Y_B] - \mu \cdot P = 130 - 0,2 \cdot 115 = 107 \text{ кН.}$$

Діюча бічна сила Y_B визначається з розрахунку динамічної моделі локомотива і, як показують дослідження, вона істотно залежить від радіуса кривої ділянки колії і поздовжньої стискальної сили в поїзді (при гальмуванні). Тому зниження поздовжньої навантаженості рухомого складу є найбільш радикальним і перспективним напрямом підвищення стійкості проти сходу з рейок.

Стійкість колії проти зсуву в плані (поперечна стійкість колії). Рамні сили Y_P , що виникають під час руху локомотива, є зовнішніми по відношенню до колії силами, які прагнуть зсунути колію (рейки і шпали), що може також призводити до сходу рухомого складу з рейок.

Опір колії R_{Π} зсуву в плані (рис. 2.32, а) визначається двома факторами: опором баласту R_{δ} , що передається на торець шпали, і тертям підшви шпали по баласту $2P \cdot \mu_1$. Оскільки сила тертя залежить від навантаження на вісь, опір R_{Π} також залежить від неї (рис. 2.32, б):

$$R_{\Pi} = R_{\delta} + 2 \cdot P \cdot \mu_1. \quad (2.212)$$

Коефіцієнт запасу стійкості колії проти зсуву в плані являє собою відношення утримуючих сил (сили тертя підшви шпал об баласт $2P \cdot \mu_1$ і сили опору баласту R_{δ}) і зсувних (рамні сили Y_P).

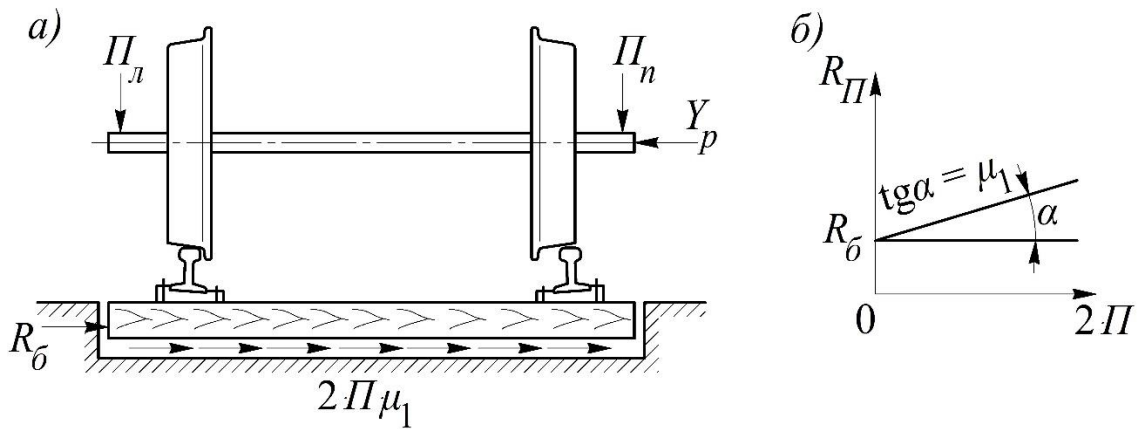


Рис. 2.32. До визначення запасу стійкості колії проти зсуву в плані:

а – схема для визначення опору зсуву колії; б – залежність опору колії зсуву від навантаження на вісь

Експерименти показують, що зсув колії може настати, якщо рамна сила Y_p перевищує 40 % осьового навантаження $2 \cdot \Pi$. У вітчизняній практиці прийнято оцінювати стійкість колії проти зсуву в плані таким співвідношенням:

$$k_{zc} = \frac{Y_p}{2 \cdot \Pi} \leq [k_{zc}]. \quad (2.213)$$

Допустиме значення коефіцієнта приймається $[k_{zc}] = 0,4 \div 0,7$.

Якщо прийняти $2\Pi = 230$ кН, то допустима рамна сила $[Y_p] = 92 \div 161$ кН або в середньому 126,5 кН. Відповідна цьому бічна сила $[Y_B] = 115 \div 184$ кН або в середньому 149,5 кН. Найменші значення цих сил обмежують бічне натиснення рухомого складу на рейку при нестабілізованому баластному шарі після виправлення колії: $[Y_{BM}] = 115$ кН і $[Y_{PM}] = 92$ кН.

Середні значення цих сил $[\bar{Y}_B] = 149,5$ кН і $[\bar{Y}_P] = 126,5$ кН обмежують бічне натиснення при нормальному стані баластного шару.

Умова стійкості колії проти зсуву в плані записується так:

$$Y_p \leq [Y_{PM}] \quad \text{або} \quad Y_B \leq [Y_{BM}]. \quad (2.214)$$

Величина допустимої бічної сили за умови забезпечення стійкості колії від зсуву в плані $[Y_{БМ}] = 115$ кН менше, ніж допустима бічна сила за умовою забезпечення стійкості колеса проти сходу з рейки, рівна 130 кН. Отже, спочатку відбудеться зсув колії в плані, тому розглянутий критерій, як правило, накладає більш жорстке обмеження на поперечні сили.

Стійкість колії за шириною колії. Цей показник характеризує якість кріплення рейки до шпали. Невиконання цієї умови викликає відрив рейки від шпали і, як наслідок, розширення (розшивку) рейкової колії. Умова стійкості записується у вигляді

$$Y_{ш} \leq [Y_{ш}], \quad (2.215)$$

де $[Y_{ш}]$ – допустимий бічний тиск рейки на шпали, рівний $40 \div 45$ кН.

Поперечна стійкість екіпажа від перекидання в кривій. Для опису явищ, що виникають під час перекидання локомотива в кривій радіусом R зі швидкістю V , зручно користуватися поняттям центробіжної сили, що діє на всі елементи рухомого складу. Ця сила для кузова локомотива (рис. 2.33) визначається так:

$$C_k = m \cdot \frac{V^2}{R}, \quad (2.216)$$

де m – маса кузова.

Для компенсації цієї сили зовнішню рейку в кривій укладають вище внутрішньої на величину h , яку називають **підвищенням** (рис. 2.33).

Максимальна величина підвищення зовнішньої рейки для залізниць становить 150 мм і її доцільно вибирати так, щоб горизонтальні проекції центробіжної сили $C_k \cdot \cos \alpha$ і ваги $m \cdot g \cdot \sin \alpha$, спрямовані паралельно площині колії, були однакові. Для кузова електровоза ця умова має вигляд

$$C_k \cdot \cos \alpha = m \cdot g \cdot \sin \alpha, \quad (2.217)$$

де α – кут підвищення.

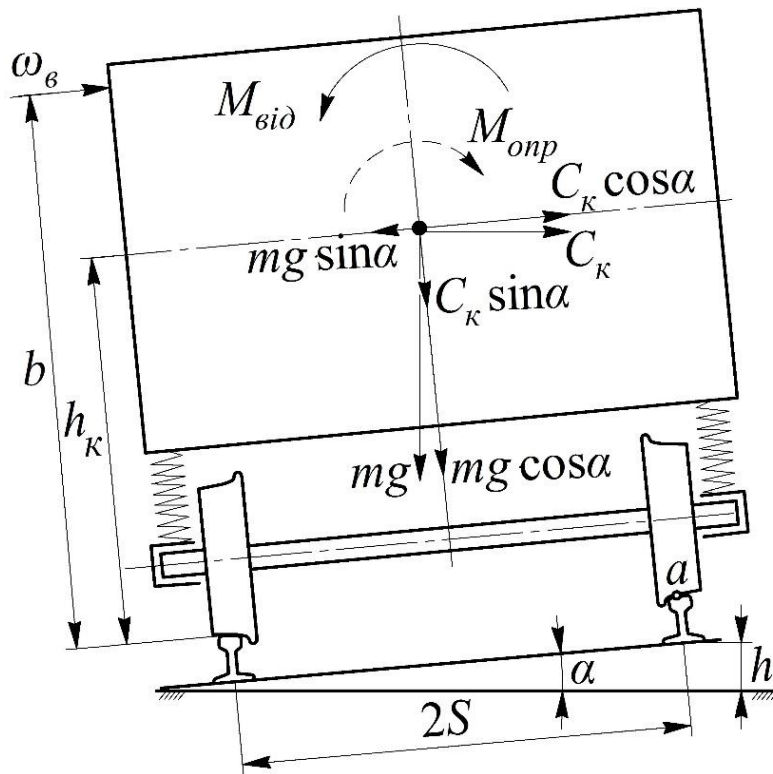


Рис. 2.33. Сили, що діють на кузов під час руху в кривій

У цьому випадку центробіжна сила повністю компенсована підвищенням зовнішньої рейки, така умова можлива лише при певній (рівноважній) швидкості руху в кривій.

При перевищенні швидкості руху і дії вітрового навантаження ω_v перекидання екіпажа може відбутися назовні кривої щодо зовнішньої рейки (точка a на рис. 2.33).

Коефіцієнт запасу від перекидання в кривій визначається відношенням відновлюючого M_{vid} і перекидного M_{onp} моментів відносно точки a :

$$K_{on} = \frac{M_{vid}}{M_{onp}} = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot h_k + m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot S + C_k \cdot \sin \alpha \cdot S}{C_k \cdot \cos \alpha \cdot h_k + \omega_v \cdot b} \geq [K_{on}]. \quad (2.218)$$

Допустиме значення коефіцієнта запасу від перекидання приймається $[K_{on}] = 1$.

2.8.4. Показники плавності ходу

Як вже зазначалося раніше, кузов локомотива під час руху здійснює складні просторові вертикальні і горизонтальні поперечні і поздовжні переміщення, що багато в чому залежать від випадкових нерівностей колії, параметрів конструкції ресорного підвішування і швидкості руху поїзда. Такі коливання надають шкідливі впливи на локомотивну бригаду і пасажирів (стомлення) і порушують комфорт їх поїздки (так званий показник плавності ходу).

Під *плавністю ходу* звичайно розуміють здатність системи ресорного підвішування екіпажа підтримувати коливання в діапазоні, що відповідає умовам людського комфорту, і в діапазоні, необхідному для забезпечення умов, за яких вантажу не буде завдано шкоди. Плавність ходу екіпажа залежить від переміщення, прискорення, швидкості зміни прискорення та інших факторів, таких як шум, запиленість, вологість і температура. Плавність ходу екіпажа оцінюється в *перехідних, квазісталих і сталих* режимах руху.

У *перехідних* режимах руху, таких як зрушення, гальмування, вхід і вихід з кривої, плавність ходу оцінюють за величиною третьої похідної узагальненої координати.

Неприємні відчуття у людини виникають при зміні сили в часі, тобто $\frac{dF}{dt} = \frac{d(m \cdot a)}{dt} = m \cdot \frac{da}{dt} = m \cdot \frac{d^3q}{dt^3}$. Таким чином, зміна прискорення в часі характеризує вплив на людину. Допустиме значення третьої похідної $\left[\frac{d^3q}{dt^3} \right] = 0,7 \div 1 \text{ м/с}^3$.

Тут більше значення відноситься до режимів зрушення і гальмування, менше – до режимів входу і виходу з кривої.

У *квазісталому* режимі руху локомотива в кривій постійного радіуса R зі швидкістю V можуть виникати неприємні відчуття у людей, викликані центробіжним прискоренням $a_{цс} = \frac{V^2}{R}$. Для опису цих явищ скористаємося рис. 2.33. Як вказувалося вище, для опису явищ, що виникають під час руху в кривій, зручно користуватися поняттям центробіжної сили C_k (формула (2.216)).

Підвищення зовнішньої рейки призначено для компенсації сили C_k тільки на одній швидкості руху, в цьому випадку повинна виконуватися умова (2.217). Так як швидкість екіпажа може бути різною, то деяка частина центробіжної сили залишається невідносною або горизонтальні проекції центробіжної сили $C_k \cdot \cos \alpha$ і ваги $m \cdot g \cdot \sin \alpha$, спрямовані паралельно площині колії, не рівні (рис. 2.33).

Невідносна центробіжна сила визначається так:

$$C_{кн} = C_k \cdot \cos \alpha - m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (2.219)$$

або з урахуванням невеликого кута підвищення α і формули (2.216)

$$C_{кн} = C_k - m \cdot g \cdot \operatorname{tg} \alpha = m \cdot \left[\frac{V^2}{R} - g \cdot \frac{h}{2 \cdot S} \right], \quad (2.220)$$

де $2 \cdot S$ – відстань між опорними точками коліс.

Множник, що стоїть в дужках в цьому виразі, являє собою **непогашене прискорення** (частина прискорення, яка не компенсувала підвищення зовнішньої рейки)

$$a_n = \frac{V^2}{R} - g \cdot \frac{h}{2 \cdot S}. \quad (2.221)$$

Допустимим вважається непогашене прискорення $[a_n] = 0,7 \text{ м/с}^2$. В інших країнах нормоване значення цього прискорення встановлено, наприклад в Японії, Італії, рівним $0,8 \text{ м/с}^2$, у Франції – 1 м/с^2 , у ФРН – $0,85 \text{ м/с}^2$.

Підставляючи значення $[a_n]$ у формулу (2.221), можна знайти допустиму швидкість руху в кривій

$$V = 3,6 \cdot \sqrt{R \cdot \left([a_n] + \frac{g \cdot h}{2 \cdot S} \right)}. \quad (2.222)$$

Непогашене прискорення a_n може бути направлено назовні кривої (має знак «плюс»), якщо перший член у формулі (2.221) більше другого, і навпаки, спрямоване всередину кривої (має знак «мінус»).

Приклад. Визначимо максимальну і мінімальну швидкості руху в кривій для умови $[a_n] = +0,7 \text{ м/с}^2$ і $[a_n] = -0,7 \text{ м/с}^2$. Підставляючи в формулу (2.222) $2 \cdot S = 1,6 \text{ м}$ і $h = 150 \text{ мм}$, отримаємо

$$V_{\max} = 4,6 \cdot \sqrt{R}; \quad V_{\min} = 1,7 \cdot \sqrt{R}. \quad (2.223)$$

Під час руху в кривій радіусом $R = 300 \text{ м}$ швидкість $V_{\max} = 80 \text{ км/год}$, а $V_{\min} = 30 \text{ км/год}$. Таким чином, для дотримання показника плавності ходу в квазісталому режимі в кривій екіпаж повинен рухатися зі швидкістю не вище максимальної і не нижче мінімальної.

У *сталому* режимі руху плавність ходу оцінюють, використовуючи метод німецького інженера Е. Шперлінга.

В основі методу лежать результати дослідів при впливі на людей синусоїдальних вертикальних і горизонтальних коливань різної частоти і з різними амплітудами прискорень. Ці досліді проводилися за допомогою спеціальної віброплатформи.

Під впливом вібрацій в організмі людини виникають фізіологічні зміни, які зі збільшенням часу дії вібрацій накопичуються і характеризують стомлюваність людини.

На підставі досліджень Е. Шперлінг прийшов до важливого висновку, що неприємні відчуття при впливі коливань на людей безпосередньо пов'язані і залежать від показника, який являє собою добуток двох величин: перша з цих величин – *найбільша енергія*, яку набуває при коливаннях одинична маса тіла пасажирів, а друга величина, яку він назвав «*поштовхом*», – *інтенсивність збільшення прискорення*, яке відчувається пасажиром.

Якщо коливальний процес гармонічний з амплітудою коливань z_0 , тобто вигляду $z = z_0 \cdot \sin \omega \cdot t$, де $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – кругова частота коливань, а f – частота коливань в секунду, Гц, то

найбільша енергія, що припадає на одиничну масу пасажера, визначається за формулою

$$E = z_0 \cdot P_i, \quad (2.224)$$

де P_i – сила інерції одиничної маси пасажера, яка визначається так:

$$P_i = 1 \cdot \ddot{z} = -z_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega \cdot t. \quad (2.225)$$

Звідси

$$E = -z_0^2 \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega \cdot t. \quad (2.226)$$

Максимальна енергія, що припадає на одиничну масу пасажера, визначається з виразу

$$E_{\max} = z_0^2 \cdot \omega^2. \quad (2.227)$$

«*Поштовх*», що виражає інтенсивність наростання прискорень, визначається як третя похідна від переміщення

$$T = \ddot{\ddot{z}} = z_0 \cdot \omega^3 \cdot \cos \omega \cdot t. \quad (2.228)$$

Максимальна величина третьої похідної

$$T_{\max} = z_0 \cdot \omega^3. \quad (2.229)$$

Таким чином, величина λ , що характеризує міру подразнення організму людини синусоїдальними коливаннями при необмеженому часі дії вібрацій, визначається за формулою

$$\lambda = E_{\max} \cdot T_{\max} = z_0^3 \cdot \omega^5. \quad (2.230)$$

Дослідами Е. Шперлінга встановлено, що показник плавності ходу визначається не прямо величиною λ , а рівністю

$$C = K_{\phi} \cdot \sqrt[10]{z_0^3 \cdot \omega^5}, \quad (2.231)$$

де K_{ϕ} – коефіцієнт, що враховує вплив частоти і напрямку (вертикальні або горизонтальні) коливань на самопочуття пасажирів.

Величина K_{ϕ} , згідно з дослідями, залежно від частоти приймається за графіком (рис. 2.34).

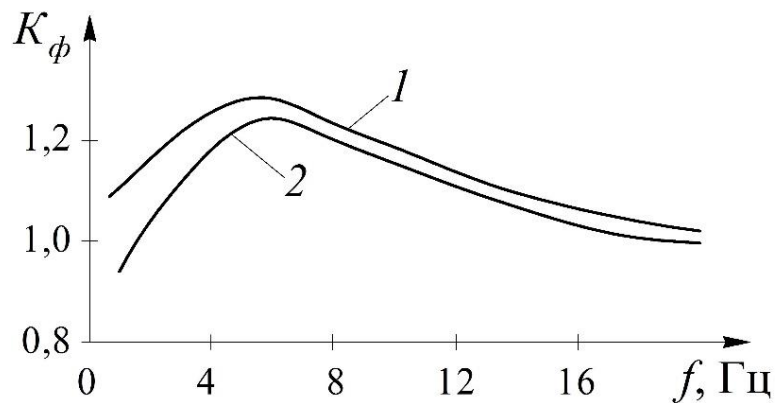


Рис. 2.34. Залежність коефіцієнта K_{ϕ} від частоти:

1 – в горизонтальній площині; 2 – у вертикальній площині

Судячи з графіка, організм людини по-різному сприймає коливання з різними частотами. Реакції на ці коливання проявляються у вигляді стомлення нервової системи і різних больових відчуттів.

Особливо несприятливі для людини коливання з частотами в межах 4÷6 Гц, які виявляються резонансними для людини як механічної системи.

Очевидно, що чим менше величина прискорень, які відчувають пасажирів, тобто чим плавність і ходовий комфорт краще, тим менше величина показника плавності ходу C .

Значення C нормовані. У вітчизняній практиці рекомендується приймати значення C , що відповідають задовільній якості ходу, рівними 3,75 для локомотивів і 3,25 для вагонів електропоїздів та метрополітену. Для вантажних вагонів допускається $C \leq 4,0$. Неприпустиме значення показника плавності ходу C більше 5.

Питання для самоконтролю

1. Сформулюйте поняття «якість». Які є основні групи показників якості?
2. Назвіть показники динамічних якостей.
3. Дайте поняття повної маси та зчіпної ваги локомотива.
4. Від чого залежить коефіцієнт використання зчіпної ваги?
5. Що відноситься до показників віброзахисту?
6. Що називають пробоем підвіски?
7. Що означає кут набігання колеса на рейку?
8. У чому відмінність напрямної сили, рамної і бічної?
9. Від яких основних параметрів залежить вкочування гребеня колеса на рейку і як вони впливають на коефіцієнт запасу стійкості колеса проти сходу з рейок?
10. Які основні фактори впливають на зсув колії в плані?
11. Поясніть термін «підвищення зовнішньої рейки» у кривій ділянці колії?
12. Від яких параметрів залежить коефіцієнт запасу від перекидання локомотива в кривій?
13. Поясніть термін «плавність ходу». Як її оцінюють?
14. Дайте поняття непогашеного прискорення.
15. Яке явище називають поштовхом?
16. У чому суть методу оцінки плавності ходу за Е. Шперлінгом?
17. Від чого залежить показник плавності ходу за Е. Шперлінгом?
18. Які частоти коливань найбільш шкідливі для організму людини?

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Электропоезда переменного тока [Текст]: учеб. пособие для ПТУ / М. М. Авдеев, В. А. Гут, В. И. Томчук [и др.]. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1985. – 368 с.
2. Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте [Текст]: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А. А. Устинский, Б. М. Степенский, Н. А. Цыбуля [и др.]. – М.: Транспорт, 1985. – 439 с.
3. Автосцепное устройство железнодорожного подвижного состава [Текст] / В. В. Коломийченко, Н. А. Костина, В. Д. Прохоренков [и др.]. – М.: Транспорт, 1991. – 232 с.
4. Айзинбуд, С. Я. Локомотивное хозяйство [Текст] / С. Я. Айзинбуд, В. А. Гутковский, П. И. Кельперис. – М.: Транспорт, 1986. – 263 с.
5. Айзинбуд, С. Я. Эксплуатация локомотивов [Текст] / С. Я. Айзинбуд, П. И. Кельперис. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1990. – 260 с.
6. Басов, Г. Г. Развитие электричного моторвагонного рухомого складу [Текст]: навч. посібник. Ч. 2 / Г. Г. Басов, С. І. Яцько. – Харків: Апекс+, 2005. – 248 с.
7. Блохин, Е. П. Динамика поезда [Текст] / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин. – М.: Транспорт, 1982. – 222 с.
8. Магистральные электровозы: общие характеристики. Механическая часть [Текст] / В. И. Бочаров, И. Ф. Кодинцев, А. И. Кравченко [и др.]. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.
9. Бочаров, В. И. Магистральные электровозы переменного тока [Текст] / В. И. Бочаров, В. И. Попов, Б. А. Тушканов. – М.: Транспорт, 1974. – 480 с.
10. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – М.: Транспорт, 1986. – 560 с.
11. Ветров, Ю. Н. Конструкция тягового подвижного состава [Текст] / Ю. Н. Ветров, М. В. Приставко; под ред. Ю. Н. Ветрова. – М.: Желдориздат, 2000 – 316 с.
12. Бартош, Е. Т. Газотурбовозы и турбопоезда [Текст] / Е. Т. Бартош. – М.: Транспорт, 1978. – 311 с.

13. Галкин, В. Г. Надёжность тягового подвижного состава [Текст]: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / В. Г. Галкин, В. П. Парамзин, В. А. Четвергов. – М.: Транспорт, 1981. – 184 с.

14. Деповской ремонт электровозов переменного тока [Текст] / А. Т. Головатый, Г. М. Коренко [и др.]. – М.: Транспорт, 1971. – 310 с.

15. Горошков, Ю. И. Контактная сеть [Текст]: учеб. для техникумов ж.-д. трансп. / Ю. И. Горошков, Н. А. Бондарев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1981. – 400 с.

16. Гуткин, Л. В. Электропоезд ЭР200 [Текст] / Л. В. Гуткин, Ю. Н. Дымант, И. А. Иванов. – М.: Транспорт, 1981. – 192 с.

17. Данилов, В. Н. Железнодорожный путь и его взаимодействие с подвижным составом [Текст] / В. Н. Данилов. – М.: Трансжелдориздат, 1961. – 112 с.

18. Данковцев, В. Т. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов [Текст]: учеб. для вузов ж.-д. трансп. под ред. В. А. Четвергова, В. И. Киселева. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 558 с.

19. Добровольская, Э. М. Электропоезда метрополитена [Текст]: учеб. для нач. проф. образования / Э. М. Добровольская. – М.: ИРПО: Издательский центр «Академия», 2003. – 320 с.

20. Дубровский, З. М. Грузовые электровозы переменного тока [Текст]: справочник / З. М. Дубровский, В. И. Попов, Б. А. Тушканов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1998. – 503 с.

21. Дубровский, З. М. Электровоз: управление и обслуживание [Текст] / З. М. Дубровский, В. А. Курчашова, Л. П. Томфельд. – М.: Транспорт, 1979. – 231 с.

22. Дубровский, З. М. Электровозы ВЛ60^К и ВЛ60^{ПК} [Текст]: руководство по эксплуатации / З. М. Дубровский, Л. М. Лорман. – М.: Транспорт, 1993. – 400 с.

23. Железные дороги. Общий курс [Текст]: учеб. для вузов / М. М. Филиппов, М. М. Уздин, Ю. И. Ефименко [и др.]; под ред. М. М. Уздина. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1991. – 295 с.

24. Дефектоскопия деталей подвижного состава железных дорог и метрополитенов [Текст] / В. А. Ильин, Г. И. Кожевников,

Ф. В. Левыкин [и др.]; под ред. В. А. Ильина. – М.: Транспорт, 1983. – 315 с.

25. Калинин, В. К. Общий курс железных дорог [Текст]: учеб. для сред. ПТУ. – 4-е изд., перераб. и доп. / В. К. Калинин, Н. К. Сологуб, А. А. Казаков. – М.: Высш. шк., 1986. – 304 с.

26. Калинин, В. К. Электровозы и электропоезда [Текст] / В. К. Калинин. – М.: Транспорт, 1991 – 480 с.

27. Калинин, В. П. Метрополитены [Текст] / В. П. Калинин. – М.: Транспорт, 1988. – 280 с.

28. Пассажирские электровозы ЧС4 и ЧС4^T [Текст] / В. А. Коптелкин, Ю. В. Колесин, И. П. Ильин [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1975. – 384 с.

29. Кобозев, В. М. Эксплуатация и ремонт подвижного состава городского электрического транспорта [Текст]: учеб. для вузов / В. М. Кобозев. – М.: Высш. шк., 1982. – 328 с.

30. Корнійчук, М. П. Технологія галузі і технічні засоби залізничного транспорту [Текст]. Ч. 1 (розділи 1-6): підручник / М. П. Корнійчук, Н. В. Липовець, Д. О. Шамрай. – 2-ге вид., випр. – К.: Дельта, 2008. – 504 с.

31. Корнійчук, М. П. Технологія галузі і технічні засоби залізничного транспорту [Текст]. Ч. 2 (розділи 7-14): підручник / М. П. Корнійчук, Н. В. Липовець, Д. О. Шамрай. – 2-ге вид., випр. – К.: Дельта, 2007. – 424 с.

32. Кужим, М. Ф. Электровоз ВЛ15 [Текст]: справочник для локомотивных и ремонтных бригад / М. Ф. Кужим, Н. В. Савичев. – СПб.: Астерион, 2002. – 380 с.

33. Лазарян, В. А. Динамика вагонов [Текст] / В. А. Лазарян. – М.: Транспорт, 1964. – 256 с.

34. Лазарян, В. А. Исследование устойчивости движения рельсовых экипажей [Текст] / В. А. Лазарян // Прикл. механика. – 1977. – № 10. – С. 80–86.

35. Лазарян, В. А. Колебания железнодорожного состава [Текст] / В. А. Лазарян // В кн.: Вибрации в технике. – М.: Машиностроение, 1980. – Т.3. – С. 398–433.

36. Лазарян, В. А. Устойчивость движения рельсовых экипажей [Текст] / В. А. Лазарян, Л. А. Длугач, М. Л. Коротенко. – К.: Наук. думка, 1972. – 199 с.

37. Магистральные электровозы: Механическая часть электровозов [Текст] / П. И. Аброскин, Д. Г. Белогорский, Б. Р. Бондаренко [и др.]. – М.: Машиностроение, 1967. – 436 с.

38. Медель, В. Б. Подвижной состав электрических железных дорог. Конструкция и динамика [Текст] / В. Б. Медель. – М.: Транспорт, 1974. – 232 с.

39. Механическая часть тягового подвижного состава [Текст]: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак [и др.]; под ред. И. В. Бирюкова. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с.

40. Находкин, В. М. Ремонт электроподвижного состава [Текст]: учеб. для техникумов ж.-д. трансп. / В. М. Находкин, Д. В. Яковлев, Р. Г. Черепашенец; под ред. В. М. Находкина. – М.: Транспорт, 1989. – 295 с.

41. Общий курс железных дорог [Текст]: учеб. для техникумов и колледжей ж. - д. трансп. / В. Н. Соколов, В. Ф. Жуковский, С. В. Котенкова, А. С. Наумов; под редакцией В. Н. Соколова. – М.: УМК МПС России, 2002. – 296 с.

42. Общий курс железных дорог [Текст]: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / Ю. И. Ефименко, М. М. Уздин, В. И. Ковалев [и др.]; под редакцией Ю. И. Ефименко. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 256 с.

43. Осипов, С. И. Основы тяги поездов [Текст]: учеб. для студентов техникумов и колледжей ж. – д. трансп. / С. И. Осипов, С. С. Осипов. – М.: УМК МПС России, 2000. – 592 с.

44. Основы электрического транспорта [Текст]: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / М. А. Слепцов, Г. П. Долаберидзе, А. В. Прокопович [и др.]; под общ. ред. М. А. Слепцова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 464 с.

45. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механических колебаний [Текст] / Я. Г. Пановко. – М.: Гл. ред. физ.-мат. лит-ры изд-ва «Наука», 1971. – 240 с.

46. Пассажирский электровоз ЧС2^Т [Текст] / А. Л. Лисицын, А. С. Никитин, Д. И. Моховиков [и др.]; под общ. ред. А. Л. Лисицына. – М.: Транспорт, 1979. – 288 с.

47. Петрушин, В. С. Влияние конструктивных параметров упругой поперечной связи кузова с тележками на боковые

колебания локомотива [Текст] / В. С. Петрушин // Труды БИТМ. – Вып. 23. – Брянск, 1971. – С. 177–190.

48. Попов, Ю. В. Конструкция электроподвижного состава [Текст]: учеб. пособие / Ю. В. Попов, Н. Н. Стрекалов, А. А. Баженов. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. – 271 с.

49. Правила технічної експлуатації залізниць України [Текст]. – К., 2002. – 132 с.

50. Просвирин, Б. К. Электропоезда постоянного тока с электрическим торможением [Текст]: учеб. пособие / Б. К. Просвирин. – М.: «ТРАНСИЗДАТ», 2000. – 328 с.

51. Раков, В. А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза (1966 – 1975 гг.) [Текст] / В. А. Раков. – М.: Транспорт, 1979. – 213 с.

52. Раков, В. А. Пассажирский электровоз ЧС2 [Текст] / В. А. Раков. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1976. – 320 с.

53. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями [Текст] / Н. А. Ротанов, А. С. Курбасов, Ю. Г. Быков [и др.]. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.

54. Северин, Ф. А. Электровоз ЧС7. Обслуживание локомотивной бригадой электровоза ЧС7 серии Е5, Е6, Е7, Е9 [Текст] / Ф. А. Северин. – М.: Транспорт, 2000. – 391 с.

55. Сементовский, Э. А. Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава метрополитенов [Текст] / Э. М. Сементовский, Н. С. Севастьянов, В. А. Иткинсон; под ред. Э. А. Сементовского. – М.: Транспорт, 1987. – 335 с.

56. Сидоров, Н. И. Как устроен и работает электровоз [Текст] / Н. И. Сидоров, Н. Н. Сидорова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1988. – 223 с.

57. Соколов, М. М. Гасители колебаний подвижного состава [Текст]: справочник / М. М. Соколов, В. И. Варава, Г. М. Левит. – М.: Транспорт, 1985. – 216 с.

58. Трофимович, В. В. Динамика электроподвижного состава [Текст]: учеб. пособие / В. В. Трофимович. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2007. – 120 с.

59. Электровоз ВЛ85 [Текст]: руководство по эксплуатации / Б. А. Тушканов, Н. Г. Пушкарёв, Л. А. Позднякова [и др.]. – М.: Транспорт, 1992. – 480 с.
60. Устройство и ремонт электропоездов метрополитена [Текст]: учеб. для ПТУ / Э. А. Сементовский, А. А. Богданов, В. С. Гусев [и др.]; под ред. Э. А. Сементовского. – М.: Транспорт, 1991. – 335 с.
61. ЦД-0058 Інструкція з руху поїздів і маневрової роботи на залізницях України [Текст]. – К., 2005. – 462 с.
62. Цукало, П. В. Электропоезда ЭР2 и ЭР2Р [Текст] / П. В. Цукало, Н. Г. Ерошкин. – М.: Транспорт, 1986. – 359 с.
63. Чиракадзе, Г. И. Электровоз ВЛ11 [Текст]: руководство по эксплуатации / Г. И. Чиракадзе, О. А. Кикнадзе. – М.: Транспорт, 1983. – 464 с.
64. Шамин, А. А. Механическая часть подвижного состава [Текст]: курс лекций: В 2-х ч. Ч. 1 / А. А. Шамин. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2001. – 116 с.
65. Электрические железные дороги [Текст]: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / под ред. А. В. Плакса и В. Н. Пупынина. – М.: Транспорт, 1993. – 280 с.
66. Электрические железные дороги [Текст]: учебник / под ред. профессоров В. П. Феоктистова, Ю. Е. Просвинова; Моск. ун-т путей сообщения; Самарская гос. акад. путей сообщения. – Самара: СамГАПС, 2006. – 312 с.
67. Электровоз ВЛ8 [Текст]: руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1982. – 320 с.
68. Электровоз ВЛ11^М [Текст]: руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1994. – 416 с.
69. Электровоз ВЛ22^М [Текст]: инструкционная книга. – М.: Транспорт, 1961. – 240 с.
70. Электровоз ВЛ23. Без рекуперации [Текст]. – М.: Транспорт, 1960. – 229 с.
71. Электровоз ВЛ80^К [Текст]: руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1978. – 432 с.
72. Электровоз ВЛ80^Р [Текст]: руководство по эксплуатации / под ред. Б. А. Тушканова. – М.: Транспорт, 1985. – 541 с.
73. Электровоз ВЛ80^С [Текст]: руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1982. – 622 с.

74. Электровоз ВЛ80^Г [Текст]: руководство по эксплуатации / под ред. Б. Р. Бондаренко. – М.: Транспорт, 1977. – 368 с.

75. Электровоз ДЭ1. Механическая часть. Силовая и пневматическая схемы. Неисправности в эксплуатации и методы их устранения [Текст]. – Красный лиман, 2007. – 76 с.

76. Электровозы ВЛ10 и ВЛ10^У [Текст]: руководство по эксплуатации / под ред. О. А. Кикнадзе. – М.: Транспорт, 1981. – 519 с.

77. Электроподвижной состав промышленного транспорта [Текст]: справочник / Л. В. Балон, В. А. Браташ, М. Л. Бичуч [и др.]; под ред. Л. В. Балона. – М.: Транспорт, 1987. – 296 с.

78. Электропоезд ЭР2 [Текст]: руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1971. – 248 с.

79. Электропоезд ЭР9М [Текст]: руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1978. – 328 с.

80. Электропоезда [Текст]: учебник / под общ. ред. З. М. Рубчинского – М.: Транспорт, 1983 – 415 с.

81. Электропоезда переменного тока ЭД9М, ЭД9Т и ЭР9П [Текст]: руководство по устройству электропоездов серии ЭД9М, ЭД9Т, ЭР9П. – М.: Центр Коммерческих Разработок, 2005. – 128 с.

82. Электропоезда постоянного тока ЭТ2, ЭТ2М, ЭР2Т, ЭД2Т [Текст]: руководство по устройству электропоездов серии ЭТ2, ЭР2Т, ЭД2Т, ЭТ2М. – М.: Центр Коммерческих Разработок, 2003. – 184 с.