

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**Навчально - науковий інститут транспорту і будівництва
Кафедра логістичного управління та безпеки руху на транспорті**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної випускної роботи**


освітній ступінь - магістр
спеціальність - 273 - «Залізничний транспорт»
спеціалізація «Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті»

на тему: «ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВЕДЕННЯ РЕЙКОВОГО ГОСПОДАРСТВА ШЛЯХОМ РОЗРОБКИ МОДЕЛІ ОЦІНКИ СТАНУ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК»


Виконав
Здобувач вищої освіти
групи ІБЗТ-19зм


(підпис) Плисак Р.В.

Керівник:


(підпис) ст. викл. Мірошникова М.В.

Завідувач кафедри:


(підпис) проф. Чернецька-Білецька Н.Б.

Рецензент:


(підпис) (ініціали і прізвище) Защоїко Є.В.

1. СУЧАСНІ ПОГЛЯДИ НА НАДІЙНІСТЬ РОБОТИ РЕЙОК У КОЛІЇ

1.1 Існуючі напрямки досліджень роботи рейок у колії, основані на теорії надійності

Залізнична колія є багатоелементна система, стан якої в процесі експлуатації постійно змінюється і залежить від сумісного впливу технічних, природних та експлуатаційних факторів на неї. Система технічного обслуговування повинна забезпечувати надійний технічний стан залізничної колії та її якісне функціонування. При цьому необхідна оцінка стану залізничної колії, яка може базуватись на різних підходах. Класичним можна відзначити підхід, що базується на закономірностях процесів взаємодії колії та рухомого склад та їх впливу на відмови колії. В даній роботі використовується підхід, оснований на показниках надійності.

Основним елементом залізничної колії є рейки. Надійність роботи рейок в системі „залізнична колія” займає основне місце, так як при їх відмові настає відмова і самої системи. В . роботі оцінюється стан залізничної колії з точки зору надійної роботи найважливішого її елемента – рейки.

Питання надійності роботи рейок, їх оцінка широко розглядається в працях багатьох вітчизняних та зарубіжних вчених. Історію розвитку цього питання можна віднести до другої половини ХХ ст., так як на цей момент інтенсивно почали розвиватись нові науки – теорія надійності, механіка руйнування, трибофатика.

Вагомий вклад в розвиток теорії надійності залізничної колії внесли наступні вітчизняні та зарубіжні вчені:

- у Московском институте инженеров транспорта (МИИТ) експериментальними дослідженнями рейок займались вчені та інженери під керівництвом д.т.н. Г. М. Шахунянца, д.т.н. Е. С. Спіридонов;
- у Всероссийском научно-исследовательском институте железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ) – д.т.н. В. Г. Альбрехт,

- д.т.н. М. Ф. Веріго, д.т.н. Б. Е. Глюзберг, д.т.н. О. Ф. Золотарский,
д.т.н. О. Я. Коган, д.т.н. В. О. Певзнер, д.т.н. В. Л. Порошин,
д.т.н. Е. А. Шур, к.т.н. А. Ю. Абдурашитов, к.т.н. Л. Г. Крисанов,
к.т.н. Л. В. Башкатова, к.т.н. А. В. Гавриленко, к.т.н. М. В. Клоков,
к.т.н. В. С. Лисюк, к.т.н. Л. П. Мелентьев, к.т.н. А. І. Скаков,
к.т.н. О. С. Скворцов, к.т.н. П. С. Соколов, к.т.н. П. П. Цуканов;
- у Російському відкритому державному університеті шляхів зв'язку (РОГУПС) – д.т.н. З. Л. Крейніс;
 - у Санкт-Петербурзькому державному університеті шляхів зв'язку (СПГУПС) – д.т.н. С. В. Амелін, д.т.н. Е. І. Даниленко, д.т.н. М. І. Смирнов, д.т.н. В. І. Тихоміров, д.т.н. В. Ф. Яковлев;
 - у Білоруському державному університеті транспорту (БелГУТ) – д.т.н. Л. А. Сосновський;
 - у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту (ДНУТ) – д.т.н. В. В. Рибкін, к.т.н. А. С. Васильев, к.т.н. П. В. Ковтун, к.т.н. О. М. Патласов;
 - в Українській державній академії залізничного транспорту (УкрДАЗТ) – к.т.н. О. О. Шехватов, к.т.н. В. П. Шраменко;
 - у Сибірському державному університеті шляхів зв'язку (СибГУПС) – д.т.н. В. О. Грищенко, д.т.н. М. І. Карпущенко, к.т.н. Г. І. Тарнопольський, к.т.н. Г. Г. Ядрошнікова;
 - у Всеросійському науково-дослідницькому інституті інформаційних технологій на залізничному транспорті, автоматизації та зв'язі (ВНІІАУП) – д.т.н. В. М. Філіппов;
 - Закордонні вчені: д.т.н. Х. Балух;
 - та інші.

Основні напрямки досліджень, що використовують підходи надійності можна класифікувати наступним чином:

1. Оцінка надійності залізничної колії на основі моделей її технічного стану.

2. Прогнозування зміни технічного стану залізничної колії.
3. Планування робіт з поточного утримання та ремонтів колії на основі моделей відмов її елементів.
4. Встановлення граничних допустимих напружень в елементах залізничної колії.
5. Діагностика залізничної колії.

Вибір основних напрямків досліджень в роботі потребує детального аналізу існуючих праць вітчизняних та закордонних вчених.

1.2 Аналіз існуючих моделей технічного стану залізничної колії та її елементів

На даний час розроблено багато моделей технічного стану залізничної колії або окремих її елементів в процесі експлуатації, в основу яких покладена теорія надійності.

У 1947 році вченими ВНИИЖТу під керівництвом О. Ф. Золотарського вперше були розроблені міжремонтні норми, що визначались пропущеним тоннажем. Ці норми були основані на експериментальних залежностях по відмовам рейок. При цьому строк служби рейок визначався тільки по зносу [2]. Тому що знос, на той час, був головним фактором, а інтенсивні відмови по зламам і дефектам відбувались тільки при значному зносі.

Проблема забезпечення потрібної надійності і довговічності рейок, як вважав П. П. Цуканов [3], повинна розв'язуватись сумісно зусиллями металургів та залізничників. У 1967 р. П. П. Цукановим запропонована розрахункова модель працездатності елемента (а під елементом він розуміє робоче відділення, рейка та ін.), яка вміщує три види відмов в залежності від періодів експлуатації. За основними положеннями теорії надійності в початковий період виникають припрацьовані відмови, в період нормальної експлуатації – раптові відмови, та в період прогресивного наростання інтенсивності відмов – раптові та зносіві відмови. На основі статистичних

даних про відмови, П. П. Цукановим припущено, що надійність елемента змінюється за експоненціальним законом. На основі даної моделі П. П. Цукановим запропоновано встановити умови гарантії надійності якості рейок, які повинні бути диференційовані в залежності від кривизни колії та осевого навантаження по пропущеному тонажі. Його модель реалізована для розрахунку нормативного строку служби рейок і умов гарантії, але через неможливість утримання параметрів нормального розподілу відмов зносу розрахунок виконаний з припущенням, що надійність рейок на протязі всього строку служби змінюється тільки за експоненціальним законом, а це в неповній мірі відображує результати дослідження.

В роботах [4,5] М. І. Карпущенко розроблено математичну модель зміни стану колії в процесі експлуатації. Надійність верхньої будови визначається як добуток ймовірностей безвідмовної роботи рейок, шпал, рейкової колії [5]. В якості вихідних параметрів системи розглядається накопичення відмов рейок, шпал, скріплень, рейкової колії. При цьому вихідний параметр системи описувався функцією, яка залежала тільки від пропущеного тоннажу. На основі експериментальних даних про відмови елементів колії розроблено стратегію планування ремонтів колії.

Широкий спектр питань роботи залізничної колії з точки зору теорії надійності відображена в працях В. С. Лисюка.

В роботі [6] В. С. Лисюком розроблена структурна схема основних станів колії:

1. Справний стан колії.
2. Несправний, але працездатний стан колії.
3. Несправний, але частково працездатний стан колії.
4. Непрацездатний, але неграничний стан колії.
5. Граничний стан колії.

Стани зв'язані між собою переходами: від кращого до гіршого – пошкодженнями, частковими та повними відмовами, та операціями часткового та повного відновлення.

В. С. Лисюком зроблено теоретичне обґрунтування граничних станів системи „залізнична колія”. В якості основного критерію призначення капітального ремонту колії він прийняв розмір поодиноких відмов рейок по дефектам в рік перед капітальним ремонтом. Запропонував оцінювати граничне значення поодиноких відмов п’ятьма критеріями: мінімум затримок поїздів, безпека руху поїздів, своєчасний пропуск всіх графікових поїздів, мінімум витрат на технічне обслуговування, збереження встановлених швидкостей руху. В результаті запропоновано п’ять математичних моделей теорії масового обслуговування. Розроблено графі станів систем на основі якого отримано потрібні характеристики.

В результаті моделювання всіх відмов рейок В. С. Лисюком отримано формулу для розрахунку міжремонтного ресурсу залізничної колії по допустимій кількості поодиноких відмов рейок. При цьому інтенсивність відмов визначена на основі експериментальних даних в залежності від пропущеного тоннажу та осьового навантаження.

Роботи В. С. Лисюка представляють собою значний інтерес. Їх можна назвати навіть консолідуючими в області теорії надійності залізничної колії. Вони охоплюють багато напрямків досліджень і являються основою для розвитку в подальшому поставлених задач досягнення міцної і надійної залізничної колії. Наприклад, визначення залежностей поодиноких відмов рейок від пропущеного тоннажу та осьового навантаження потребує удосконалень, таких як включення додаткових експлуатаційних факторів, прийняття інших апроксимуючих функцій та ін.

В роботі Л. В. Башкатової [7] розроблена модель прогнозування часткових відмов колії, яка основана на використанні фактичних статистичних матеріалах про часткові відмови колії (попередження про обмеження швидкості руху поїздів) і виявлені закономірності впливу на них різних експлуатаційних, конструктивних та технологічних факторів. Запропонована модель основана на попередженнях про обмеження швидкості руху поїздів, а в деякій мірі можна сказати, що фактичне обмеження швидкості руху – це суб’єктивна оцінка, так

як вона може бути встановлена з різних причин. Оцінка стану залізничної колії повинна бути об'єктивною, основою на технічних нормативах, пов'язаною з технічним фактичним станом колії на основі чого можна планувати роботи з поточного утримання колії.

В. О. Грищенко використав системний підхід при оцінці впливу відмов безстикової колії на якість і ефективність функціонування ділянки залізниці [8]. Якість функціонування технологічної системи він оцінював кількістю поїздо-годин знаходження поїздів на ділянці залізниці за визначений період часу, а ефективність – втратою поїздо-годин, внаслідок затримки поїздів через відмови технологічної системи. Для визначення цих показників склав математичну модель функціонування технологічної системи, яка вміщує майже всі можливі стани ділянки безстикової колії. В результаті отримано залежності затримок поїздів від пропущеного тоннажу та вантажонапруженості. При цьому роботи В. О. Грищенко все ж таки обмежені підходом тільки до безстикової колії.

В праці [9] В. В. Рибкіна розроблена математична модель оцінки надійності залізничної колії як системи взаємозалежних елементів, що обслуговуються. На основі аналізу нормативних документів розроблено граф станів залізничної колії, який вміщує інтенсивності накопичення різноманітних деформацій колії та інтенсивності виконання різноманітних колійних робіт. Складено систему диференційних рівнянь, яка описує систему утримання стрілочних переводів. Для даної моделі отримані результати ймовірності знаходження системи в різних станах, але розрахунки проведені тільки для стрілочних переводів.

В. М. Філіппов розробив імовірнісну модель втомленого руйнування підшви рейки, яка дозволяє кількісно оцінити вплив амплітуди температурних напружень розтягу, швидкості руху на ділянці і структури вантажопотоку на характеристики її надійності [10].

З. Л. Крейнис в роботі [11] для визначення раціональних нормативів на устрій і утримання рейкової колії також застосував надійнісний підхід.

оснований на методі імітаційного моделювання системи функціонування залізничної колії [12].

П. С. Соколов відмічав, що оцінка живучості рейок повинна здійснюватись комплексно – і за стандартними механічними випробуваннями металу, і за експлуатаційними дослідженнями на дослідному кільці, а також повинні бути експерименти в реальних умовах експлуатації на основі показників надійності [13].

Значний вклад в розвиток питань діагностики верхньої будови колії вніс польський вчений Х. Балух. Одним з напрямків його робіт є оцінка стану верхньої будови залізничної колії на основі показників надійності. Х. Балух запропонував схему технічного дослідження станів надійності залізничної колії, на основі якої верхня будова колії як імовірнісна система може знаходитись в трьох станах: повної працездатності $E^{(1)}$, обмеженої працездатності $E^{(2)}$ та непрацездатності $E^{(0)}$ [14]. Автором приведені переходи верхньої будови колії із стану повної працездатності в стан непрацездатності. Стосовно рейок запропоновано процес нормальної зміни їх строку служби, який приведено на рис. 1.1.

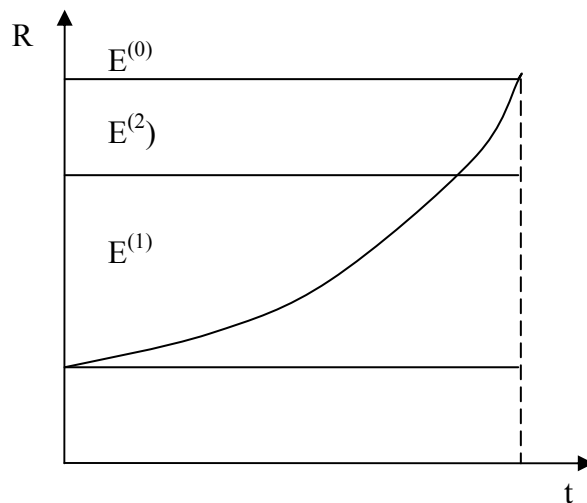


Рис. 1.1 – Зміна параметрів працездатності рейок на протязі терміну служби рейок

Модель експлуатаційної надійності верхньої будови колії застосована для оцінки впливу пошкоджень рейок на основі перешкод руху. На рис.1.1 прийняті

позначення R – ймовірність безвідмовної роботи, t – час, протягом якого експлуатується колія.

Дослідженням надійності роботи елементів стрілочних переводів, наприклад, хрестовин присвячені праці Б. Е. Глюзберга [15], А. С. Васильєва [16, 17]. Робота [18] П. В. Ковтуна присвячена надійності стабільної роботи рейкової колії в границях стрілочних переводів.

1.3 Аналіз існуючих моделей відмов рейок

У НИИЖТі в 1964-1967 рр. Г. І. Тарнопольским розроблено методіку розрахунків втомленої довговічності залізничних рейок імовірнісними методами. В основу цих розрахунків покладена феноменологічна модель накопичення втомлених пошкоджень, в якій руйнування відбувається в момент, коли сума накопичення пошкоджень досягає деякої випадкової границі, що характеризується запасом втомленої довговічності. По даним поодиноких відмов в роботах [19, 20] побудовані імовірнісні криві довговічності для дослідних ділянок з різним осьовим навантаженням. Влив інших експлуатаційних факторів не враховувався.

О. Я. Коган запропонував математичну модель оцінки поодиноких відмов рейок по контактено-втомлених дефектах [21, 22]. В даній моделі максимальні дотичні напруження були прийняті в якості міри оцінки напруженого стану металу головки рейки. В результаті отримана залежність сумарних поодиноких відмов рейок в залежності від пропущеного тоннажу при обертанні по ділянці різнотипного рухомого складу.

„Основными средствами количественного определения и сравнительной оценки эксплуатационной надежности работы рельсов есть теория вероятности, а основными методиками исследования - статистический метод” – переконані інженери ВНИИЖТу під керівництвом к.т.н. О. С. Скворцова [23]. Для прогнозування строку служби рейок і визначення кількісних показників їх експлуатаційної стійкості вони використали закон розподілу Вейбулла. При

цьому аналізувались дефекти контактної-втомленої походження. В моделі розподілу Вейбулла технічний ресурс рейок, тобто розрахунковий строк їх служби залежить від таких експлуатаційних факторів як вантажна напруженість, сила тяги, осьові навантаження, швидкості руху.

В роботах Л. А. Сосновського [24] висловлена нова концепція відносно зносового та втомленої пошкодження системи колесо-рейка, а саме показано, що має місце так зване комплексне зносовтомлене пошкодження. При цьому границя витривалості в великій ступені залежить від умов тертя та зносу (прямий ефект), а зносостійкість в значній мірі визначається рівнем циклічних напружень (зворотній ефект). Така нова концепція використана для аналізу граничного стану силової системи колесо-рейка. Критерієм досягнення силової системи граничного стану є досягнення критичної величини енергії, в порівнянні з сумою ефективних складових енергії при силі фрикційній та термічній дії. Такий енергетичний критерій дозволяє прогнозувати переходи силової системи колесо-рейка в граничний стан, та розв'язувати задачі оптимального управління її довговічністю.

Дослідження надійності роботи рейок типу Р65 проводилась також А. В. Гавриленковим та Л. Г. Крисановим [25]. В своїх роботах вони визначили вплив способу обробки рейок, пропущеного тоннажу та вантажна напруженості на наступні показники надійності рейок: накопичення інтенсивності відмов рейок, інтенсивність відмов рейок, щільність розподілу відмов та інші. Для опису щільності відмов рейок прийнято закон розподілу Вейбулла. За порівнянням показників надійності встановлено, що термозміцненні рейки значно кращі за незагартовані у всіх діапазонах вантажна напруженості.

Встановленням кількісного впливу основних факторів, а саме вантажна напруженості, плану лінії, середнього осьового навантаження, кліматичної зони на інтенсивність відмов рейок, а також визначенням раціонального рівня одиночного зняття рейок займався М. В. Клоков [26]. При цьому допустимий рівень одиночного зняття рейок визначений по критерію

мінімуму сумарних витрат і диференційований по інтервалам вантажонапруженості.

Математична модель відмов рейок за дефектами контактено-втомленого походження отримана В. В. Рибкіним і О. М. Патласовим [27]. На основі статистичної обробки даних про відмови рейок авторами отримано рівняння функції потоку інтенсивності відмов рейок, яке ґрунтується на законі розподілу Гауса. Функція потоку інтенсивності відмов рейок визначена в залежності від пропущеного тоннажу, плану лінії та осьового навантаження.

А. Ю. Абдурашитовим на основі закономірностей розвитку дефектів контактено-втомленого походження запропоновано нормативи по заміні гостродефектних рейок [28]. Автором визначені залежності критичних розмірів тріщин від якості рейкової сталі, рівня сил взаємодії колії і рухомого складу, напружень в елементах колії та від змін умов експлуатації: швидкості руху поїздів, навантажень на вісь, плану лінії, температури рейок.

Праця [29] Г. Г. Ядрошнікової присвячена визначенню інтенсивності зносу рейок в кривих при рекуперативному гальмуванні. В даній роботі оцінено вплив таких факторів на інтенсивність зносу рейок, як маса поїзда, осьове навантаження, план і профіль колії, режим руху та визначено строки служби рейок в конкретних умовах експлуатації.

А. І. Скаковим розроблена методика дослідження залізничних рейок, в основу якої входять статистичні методи [30]. Використовуючи статистичний підхід він зробив аналіз масового виробництва рейок і дослідив їх в експлуатації. На основі статистичних даних дослідив вплив експлуатаційних факторів на відмови рейок. Головними факторами, від яких найбільше залежать відмови рейок відзначив пропущений тоннаж та осьове навантаження. При цьому відмітив, що план, конструкція верхньої будови, кліматичні умови також суттєво впливають на відмови рейок. Також А. І. Скаковим детально розглянуті причини і заходи з попередження окремих видів дефектів.

В роботах Л. П. Мелентьева та В. Л. Порошина детально розглянуті питання утримання та ремонту рейок [31, 32]. Відзначено, що строк служби

рейок в першу чергу залежить від їх якості, і в конкретних умовах експлуатації він може змінюватись під дією таких факторів, як вантажонапруженість, осьове навантаження, швидкість руху, режим ведення поїзду, план та профіль лінії, загальний стан колії, конструктивні особливості верхньої будови, кліматичні умови. Л. П. Мелентьев на основі статистичної обробки даних про поодинокі відмови рейок встановив середньомережеву диференціальну залежність наростання відмов нетермозміцнених рейок Р65 в залежності від пропущеного тоннажу. Для середньомережевих умов встановив базове напрацювання рейок, яке відповідає періоду прогресуючого зростання відмов, а саме 2 шт/км. Обчислення строку служби рейок для різних умов враховується використанням поправочних коефіцієнтів відносно базового строку служби. В роботі [33] В. Л. Порошина досліджено зміну міцності рейок в процесі експлуатації, а саме встановлено, що статична, втомлена та копрова міцність рейок знижується, особливо при розвитку в них дефектів.

Для планування капітального ремонту колії Е. С. Спіридонов орієнтується на критерії надійності колії і вважає, щоб забезпечити працездатність колії потрібно спиратись на основну характеристику її надійності – відмови елементів колії [34]. На його думку інтегральна оцінка надійності верхньої будови колії може бути визначена з умови порушення граничного стану колії по відмовам рейок, шпал, рейкової колії.

В роботі В. О. Певзнера [35] оцінка стану залізничної колії розглядалась як з точки зору безпеки руху, так і для планування виправних робіт і базується на показниках взаємодії колії та рухомого складу та напруженнях в елементах верхньої будови колії. В праці розглядались зміни геометричних параметрів в залежності від умов експлуатації і прийняття рішень щодо виконання ремонтів. В статті [36] В. О. Певзнера відзначено, що можна диференціювати ділянки колії з різними умовами експлуатації (швидкість руху, осьове навантаження, конструкція колії) по критерію ідентичності напружень і деформацій в елементах верхньої будови колії і планувати ремонти колії. Дане твердження є

важливим в питанні встановлення допустимих напружень в елементах верхньої будови колії, що розглядається в наступному розділі.

Перш за все потрібно відмітити, що вищезазначені моделі відмов рейок спираються на статистичні методи дослідження, використовуючи при цьому методи теорії надійності. Цей напрям на сьогоднішній день є прогресивним і широко розвивається у всіх галузях науки. В своїх працях дослідники показали, що він адекватно описує процес відмов рейок у колії. Теоретично всі приведені моделі мають право на життя. Проте треба зазначити, що деякі з них розроблялись ще в 60-их роках минулого століття і втратили на сьогоднішній день свою практичну цінність. Імовірнісні криві відмов рейок при цьому охоплювали і інші експлуатаційні умови та інші за якістю рейки. Практично у всіх математичних моделях відмов рейок вплив експлуатаційних факторів обмежувався визначенням пропущеного тоннажу, тільки деякі автори в своїх дослідженнях враховували більшу їх кількість (в межах трьох величин). На основі цього аналізу можна зробити висновок, що дослідження відмов рейок в сучасних умовах повинні йти в напрямку, який був закладений попередниками. При цьому потрібно в нові математичні моделі, на основі сучасних статистичних досліджень вміщувати додаткові експлуатаційні фактори. Це дозволить ефективно застосувати їх в задачах колійного господарства, які виникають в сучасних умовах господарювання.

1.4 Історія визначення оціночних критеріїв міцності колії

Розрахунки колії на міцність на протязі всього існування постійно вдосконалювались, шукались нові напрямки методів розрахунку, способів оцінки розрахунків, поштовхом яких є розвиток інфраструктури транспорту, виникнення нових наук, таких як механіка руйнування, трибофатика, теорія надійності та ін. Та основна задача розрахунків залишається незмінною: правила розрахунку колії на міцність повинні давати можливість вибрати

оптимальну конструкцію колії, з усіх можливих варіантів, що задовольняє заданим умовам експлуатації.

Важливим розділом розрахунків колії на міцність є встановлення граничних станів її елементів. Можна відзначити наступні підходи до розрахунку колії на міцність:

1. Розрахунки на міцність по критерію опору руйнуванню при одноразовому навантаженні.
2. Розрахунки характеристик опору втоми при багатоциклічному навантаженні.
3. Розрахунки на витривалість при багатоциклічному навантаженні.
4. Розрахунки на міцність, які визначенні з умови забезпечення надійності колії.

Допустимі напруження в рейках встановлювались на основі розрахунків наступних п'яти видів їх несучої здатності [37]:

- 1) статичної при недопущенні пластичних деформацій в підшві;
- 2) циклічної при змінних напруженнях і недопущення утворення тріщин втоми в підшві та шийці рейки;
- 3) з врахуванням наявності тріщин при недопущенні повного крихкого руйнування всього перерізу;
- 4) статичної контактної при недопущенні (чи регламентації) місцевих пластичних деформацій в зоні контакту головки з колесом;
- 5) циклічної контактної при недопущенні в границях ресурсу (чи регламентації ймовірності) утворення тріщин контактної втоми в голівці.

Методика розрахунку верхньої будови залізничної колії на міцність розроблена в колієвипробувальній лабораторії ВНИИЖТу в 1954 році колективом в складі: М. Ф. Веріго, О. П. Ершкова, А. Х. Ветченко, С. Н. Попова, Б. Д. Хействера під керівництвом Е. М. Бромберга і прийнята в правилах розрахунку верхньої будови колії на міцність [38]. Допустимі напруження в елементах верхньої будови колії в Правилах 1954 р. [38]

встановлені з умови традиційного інженерного розрахунку колії на міцність при одноразовому навантаженні. Основний показник, який характеризує дію рухомого складу на колію – крайкові напруження в підшві рейки. Допустима величина цих напружень встановлена з умови недопущення пластичних деформацій в підшві рейки при дії нормальних сумарних напружень згину і кручення рейки під рухомим навантаженням і від повздовжніх деформацій при зміні температури. При цьому допустима величина напружень в крайці підшви рейки визначалась за формулою:

$$[\sigma_{\kappa}] = \frac{[\sigma_{0.2}^p]}{k_3} - \sigma_t, \quad (1.1)$$

де $[\sigma_{0.2}^p]$ - мінімальна умовна границя текучості рейкової сталі в *МПа*, що визначена при розтягу стандартних взірців як напруження, при якому залишкове подовження взірця досягає 0,2%;

σ_t - максимальні температурні напруження в рейках, які не включені в розрахунок в *МПа*;

k_3 - коефіцієнт запасу, прийнято 1,3.

З усіх напружень, що виникають під навантаженням, у якості критерію оцінки допустимих на рейки навантажень приймають так звані основні нормальні напруження, що виникають від згину та кручення рейок під рухомим навантаженням і від повздовжніх деформацій при змінах температури. Даний критерій не охоплює міцність рейки у всіх її частинах і врахування цієї обставини при встановленні величин допустимих напружень набуло введення коефіцієнту запасу k_3 по відношенню до умовної границі текучості рейкової сталі. Вибір в якості оціночної характеристики рейкової сталі границі текучості було основане на попередженні в рейках залишкових деформацій та недопущенні утворення в них поперечних зламів [39].

Правилами [38] встановлені наступні величини допустимих напружень для рейок:

- нових типів Р43, Р50 і Р65 довжиною до 12,5 м – $[\sigma_k] = 240 \text{ МПа}$, при цьому умовна границя текучості дорівнює $[\sigma_{0,2}^p] = 350 \text{ МПа}$;
- старих типів довжиною до 12,5 м – $[\sigma_k] = 200 \text{ МПа}$, при цьому умовна границя текучості дорівнює $[\sigma_{0,2}^p] = 300 \text{ МПа}$.

Значення механічних характеристик рейок, що приведені в [30], визначені на стандартних взірцях. В період з 1930 по 1950 роки механічні характеристики рейкової сталі значно підвищились порівняно з попередніми роками і по даним [30] мали умовну границю текучості від 355 до 535 МПа. На основі приведених даних і були встановлені величини допустимих напружень в [38].

В 1956 році в роботі Е. М. Бромберга [39] приведена методика розрахунку колії на циклічне навантаження. В ній приводяться ідеї розрахунку колії на міцність з використанням не тільки прийнятої умови міцності в Правилах 1954 року, але й додаткової умови. Додаткова умова заключає в собі, що найбільші напруження за весь строк служби повинні бути менші за тривалу границю витривалості рейкової сталі. На той час питання вивчення властивостей матеріалів по відношенню опору змінним навантаженням не були ще достатньо вивчені і використання додаткової умови не було здійснено.

В 1962 році проведені [40] дослідження показують неможливість встановлення допустимих напружень в рейках по ознаці недопущення залишкових згинів в окремих перерізах рейки. Причиною цього є визначення границі текучості рейкової сталі на натурних взірцях, що суттєво нижча і може доходити до 50 МПа через виникнення в них залишкових напружень.

Наступний важливий етап у встановленні допустимих напружень в рейках є відмова нормування напружень по границі текучості рейкової сталі. В роботах М. Ф. Веріго, С. С. Крепкогорського [40, 41, 42] проведені спеціальні дослідження по вибору допустимих напружень в рейках. В основу нормування напружень запропонована умова неперевищення границі витривалості рейкової сталі, так як рейки працюють в умовах знакозмінного навантаження. Для оцінки характеристик міцності рейок були використані результати досліджень

на витривалість натурних взірців рейок Р50, що були проведені в ВНИИЖТі в 1961 р. Л. М. Школьніком [43]. На основі даних досліджень побудована границя витривалості рейок типу Р50 від рівня постійних напружень. Авторами отриманні найбільші сумарні постійні напруження для різних умов експлуатації. Так як в колії діють різні величини змінних напружень, то було визначено рівень допустимих максимальних розрахункових напружень при невстановленому режимі навантаження рейки. В якості вихідного матеріалу для встановлення допустимих напружень згину та кручення в рейках взято результати їх досліджень циклічними навантаженнями еквівалентними напруженнями з постійною амплітудою. В якості значень допустимих напружень в рейках прийняті такі максимальні значення розрахункових напружень, при яких в експлуатації колії ще не виникають або виникають із заданою інтенсивністю дефекти втоми, а залишкові деформації мають допустиму інтенсивність. Визначенням механічних характеристик рейок Р65 займались вчені МІИТу під керівництвом Г. М. Шахунянца. В роботі [44, 45] приведені результати дослідження тривалої і обмеженої границі витривалості рейок Р65 як нових, так і після проходження 130 та 210 млн. т. В якості допустимих напружень прийнято тривалу границю витривалості рейкової сталі, виходячи з умови, що найбільші діючі напруження не виходили, із заданим рівнем ймовірності, за границю тривалої границі витривалості в межах заданого терміну служби. На основі приведених досліджень були визначені і прийняті наступні значення допустимих напружень згину та кручення в крайках підосви рейки, виходячи з мінімального значення тривалої границі витривалості згину та кручення натуральних взірців рейок при одночасній дії на рейку розрахункових зусиль розтягу із трьохкратним запасом міцності [46]:

- для ланкової колії $[\sigma_p^n] = 240 \text{ МПа}$;
- для безстикової $[\sigma_p^n] = 200 \text{ МПа}$.

Хоча в роботі [40] пропонувались різні значення допустимих напружень в рейках для локомотивів та вагонів. Приведені пропозиції 1972 року були внесені в правила розрахунку колії на міцність.

Нормативним документом СНиП-II-23-81 [47] затверджено розрахунок елементів сталених конструкцій на витривалість, які сприймають багатократні рухомі навантаження з кількістю циклів 10^5 та більше. При цьому розрахунок на витривалість виконується за формулою:

$$\sigma_{\max} \leq \alpha R_v \gamma_v, \quad (1.2)$$

де R_v - розрахунковий опір втоми, який залежить від тимчасового опору сталі та групи елементів конструкції;

α - коефіцієнт, що враховує кількість навантажень n , при $n \geq 3,9 \cdot 10^6$,
 $\alpha = 0,77$;

γ_v - коефіцієнт, який залежить від виду напруженого стану і коефіцієнту асиметрії напружень.

Розрахунки рейок на витривалість, згідно СНиП-II-23-81 [47], приведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Розрахунки рейок на витривалість

Розрахункові характеристики	Умовні позначення	Тип рейок	
		P65 тз	P65 нтз
1	2	3	4
Кількість циклів навантажень	n	50000000	
Коефіцієнт, що враховує кількість циклів навантажень	a	0.77	
Коефіцієнт асиметрії навантажень	r	-0.208	
Коефіцієнт що залежить від виду напруженого стану і коефіцієнта асиметрії навантажень (розтяг)	γ_v	1.46	
Коефіцієнт що залежить від виду напруженого стану і коефіцієнту асиметрії навантажень (стиск)	γ_v	1.66	
Тимчасовий опір рейкової сталі	R_{un}	1180 МПа	900 МПа

Розрахунковий опір рейкової сталі	R_v	275 МПа	190 МПа
Границя витривалості рейкової сталі (при розтягу)	y_{max}	310 МПа	214 МПа
Границя витривалості рейкової сталі (при стиску)	y_{max}	351 МПа	242 МПа

Приведений розрахунок рейок на витривалість згідно [47] можна сказати придатний для середніх умов експлуатації. В роботах [50, 51] проводились експериментальні дослідження характеристик опору рейок типу Р65, в яких зроблено висновок, що поняття тривалої границі витривалості є умовним, так як в розрахунках не враховано ряд процесів, які реально протікають в колії, та відсутність в розрахунках фактора часу, що робить самі розрахунки наближеними.

Але остаточне коригування допустимих напружень на цьому не завершилось. Пропонувались різноманітні ідеї стосовно встановлення значень допустимих напружень в елементах верхньої будови колії.

В роботі Е. А. Шура [37] в 1977 році зроблено аналіз існуючих методів розрахунку допустимих напружень в рейках і відзначено, що розрахунок статичної несучої здатності рейки доцільно проводити у випадку епізодичного пропуску великих навантажень, проведення натурних досліджень повнопрофільних відрізків рейок на циклічний згин дає можливість отримати деяку числову характеристику, яка може бути використана тільки для порівняння міцності втомі різних рейок, але непридатна для розрахунку на міцність. В свою чергу він запропонував визначати допустимі напруження в рейках з врахуванням наявності тріщин при недопущенні повного крихкого руйнування. Автором відзначено, що з розвитком механіки руйнування появилася можливість проведення розрахунків рейок і на останній стадії розвитку в них тріщин втомі при досягненні ними критичних розмірів і переходу до крихкого руйнування. При цьому центральне місце займає в'язкість руйнування, тобто критичний коефіцієнт інтенсивності напружень в умовах плоскої деформації при об'ємному напруженому стані. Автором визначені мінімальні значення в'язкості руйнування для різних типів рейок.

Моделювання життєвого циклу рейок у колії

Безперебійний і безпечний пропуск поїздів з встановленою швидкістю – основні функції, котрі повинна забезпечувати залізнична колія. Надійність колії – це її властивість зберігати значення цих параметрів. Перспективною і об'єктивною оцінкою стану колії є оцінка стану колії за показниками надійності: показники безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності [72].

Залізнична колія – багатоелементний ремонтпридатний і відновлюваний об'єкт надійності. Основна вимога, яка повинна забезпечуватись – це безперервність роботи. Найважливішим елементом залізничної колії є рейки, тому що відмова однієї рейки приводить до відмови колії в цілому. Щоб забезпечити надійність залізничної колії перш за все потрібно змоделювати стан рейок у колії.

Розробкою моделей відмов рейок займались і займаються багато вчених ВНИИЖТу, МИИТу, НИИЖТу, ДШТу [6, 20, 21, 27, 73, 74]. Авторами запропоновані багато різноманітних моделей стану рейок, переважно це математичні моделі розрахунку контактної-втомленої довговічності рейок. В цих випадках дослідження ґрунтуються на плоскій моделі Веллера або гіпотезі Майнера. Протиріч між вказаними гіпотезами і моделями не має і кожна може бути використана для розв'язку тої часткової задачі, яка ставиться перед ними. Проте недоліком існуючих моделей є те, що надійність роботи рейок оцінюється за одним видом дефектів.

Необхідність розробки моделі життєвого циклу рейок ґрунтується на тому, що на сьогоднішній день ніякими нормативно-технічними документами не визначено показники надійності рейок. В наукових колах є різні думки навколо даної проблеми, наприклад В. С. Лисюк запропонував математичні моделі теорії масового обслуговування систем “бригада-колія”, “залізнична колія”, використовуючи п'ять основних критеріїв на основі яких оцінюється граничне значення кількості поодиноких відмов рейок [6], але вони не відображені в цих документах. Потрібно детально дослідити і розробити показники надійності на

основі яких можна буде змоделювати життєвий цикл рейок. Це дозволить визначити і прогнозувати стан рейок в будь-який момент часу і удосконалити систему утримання рейок.

Робота рейок у колії ґрунтується на системі їх утримання, яка сформована на залізницях України. В загальному дерево життя рейок охоплює такі стадії:

1. Виготовлення рейок (блок 1).
2. Робота рейок в головній колії різних категорій (блок 2, 3, 5).
3. Робота рейок в станційних коліях (приймально-відправних й беззупинкового руху поїздів), (блок 6).
4. Робота в інших станційних та під'їзних коліях (блок 7).
5. Металобрухт (блок 8).

Приведені стадії життя рейок зв'язані між собою інтенсивностями постачання, ремонту, переукладання або зняття рейок. Загальна модель експлуатації рейок базується на системі динамічних моделей, які її наповнюють і приведена на рис. 2.6. Блоки 2, 3, 5, 6, 7 являють собою окремі математичні моделі, які описують поточне утримання рейок у колії на відповідній стадії їх знаходження. Нові рейки вищої, I, II категорії якості та III категорії якості I групи постачаються металургійним заводом в головні колії вищої, I-IV категорії (інтенсивність постачання τ_{1-2} , τ_{1-3}). Після проведення модернізації, капітального ремонту чи суцільної заміни рейок на головних коліях I-IV категорії рейки зняті з колії сортуються (інтенсивності τ_{2-4} , τ_{3-4}). Рейки, які не придатні для застосування відправляють на металобрухт (інтенсивність зняття τ_{4-8}). Рейки, які призначені для повторного використання після виконання необхідного ремонту згідно з групами придатності направляються споживачам: інтенсивність τ_{4-3} , τ_{4-5} (рейки I групи придатності); інтенсивність τ_{4-6} (рейки I та II групи придатності); інтенсивність τ_{4-7} (рейки III групи придатності).

Інтенсивності τ_{5-4} , τ_{6-4} , τ_{7-4} показують зняття рейок з колії після проведення ремонтно-колійних робіт. Потім зняті рейки знову сортуються згідно циклу описаного вище.

Загальній моделі експлуатації рейок відповідає така система диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_1'(t) = -(\tau_{1-2} + \tau_{1-3})Y_1(t), \\ Y_2'(t) = -\tau_{2-4}Y_2(t) + \tau_{1-2}Y_1(t), \\ Y_3'(t) = -\tau_{3-4}Y_3(t) + \tau_{1-3}Y_1(t) + \tau_{4-3}Y_4(t), \\ Y_4'(t) = -(\tau_{4-3} + \tau_{4-5} + \tau_{4-6} + \tau_{4-7} + \tau_{4-8})Y_4(t) + \\ + \tau_{3-4}Y_3(t) + \tau_{5-4}Y_5(t) + \tau_{6-4}Y_6(t) + \tau_{7-4}Y_7(t) + \tau_{2-4}Y_2(t), \\ Y_5'(t) = -\tau_{5-4}Y_5(t) + \tau_{4-5}Y_4(t), \\ Y_6'(t) = -\tau_{6-4}Y_6(t) + \tau_{4-6}Y_4(t), \\ Y_7'(t) = -\tau_{7-4}Y_7(t) + \tau_{4-7}Y_4(t), \\ Y_8'(t) = \tau_{4-8}Y_4(t), \\ \sum_{i=1}^8 Y_i(t) = 1. \end{array} \right. \quad (2.8)$$

де $Y_i(t)$ – ймовірність знаходження системи в i -тому стані;

τ – інтенсивності постачання, сортування, переукладання та зняття;

t – пропущений тоннаж.

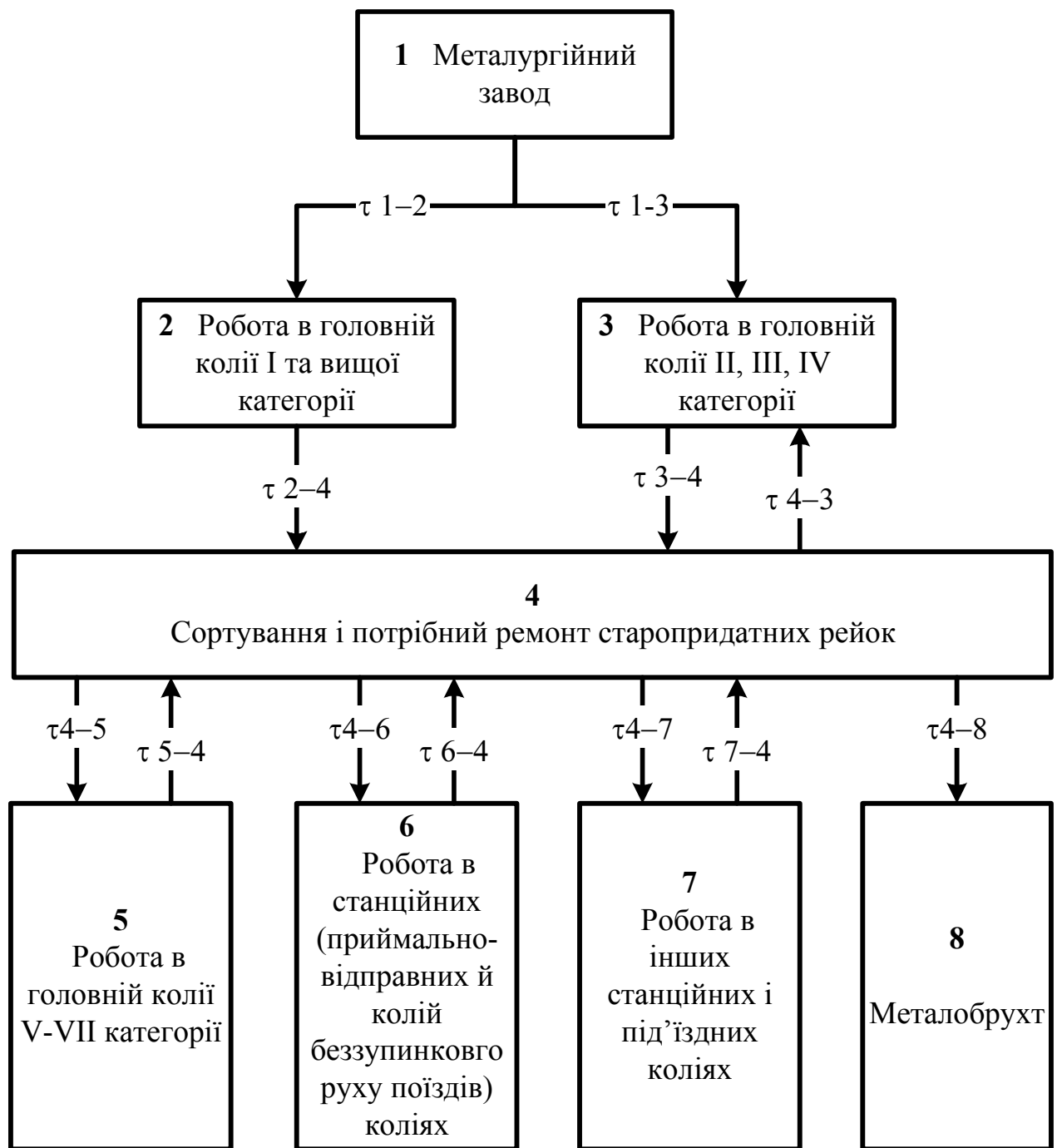


Рис. 2.6 – Загальна модель постачання та експлуатації рейок

Робота рейок в головній колії (блок 2 на рис. 2.6) описується математичною моделлю життєвого циклу рейок. Дана математична модель повинна включати всі види дефектів і систему технічного обслуговування рейок (поточне утримання колії і ремонти). Дефекти контактно-втомленого походження займають основне місце, але звертаючи увагу на статистику по

відмовах рейок за останні роки, також потрібно включати в модель інші дефекти.

В теорії надійності [75] та в теорії масового обслуговування [76] широке поширення отримали математичні моделі, в яких використовуються марковські процеси. В цьому випадку граф переходу є не тільки зручним описом процесу еволюції системи із стану в стан, але також і зручною формою запису формальної математичної постановки задачі. Побудова математичної моделі життєвого циклу рейок здійснюється із використанням моделі Маркова, з допомогою якої можливе кількісне дослідження системи.

При розробці моделі життєвого циклу рейок ставляться наступні передумови. Рейки, вкладені на конкретній ділянці, розглядаються як сукупність однакових елементів, кожний з яких характеризується випадково-закономірною невід'ємною величиною пропущеного тоннажу t .

На основі аналізу нормативно-технічної документації експлуатації рейок [67, 77] та з допомогою теорії графів [78, 79] розроблено модель життєвого циклу рейок у колії (рис. 2.7). Еволюцію станів рейки можна описати з допомогою орієнтованого графа переходу, в якому дуги показують можливі переходи в часі. На графі зображено всі можливі стани переходу рейок – від справного до граничного. Кожний прямокутник на рис.2.7 відтворює один із можливих станів рейки. Справний стан рейки для головних колій прийнято такий, при якому забезпечується швидкість пасажирських поїздів 140 км/год , а вантажних 90 км/год (стан 0 на рис. 2.7) Граничний стан рейок – є повною відмовою і рух по них заборонено. Повна відмова рейки вважається такою, коли вона знаходиться в станах 6, 13, 18, 23, 28, 32, 33, 34, 39-42, 45,59. При цьому в модель включено часткові відмови рейок, які вимагають обмеження швидкості руху поїздів.

Також в моделі враховано переходи утворення одного виду дефекту в інший, наприклад перехід дефекту 14 в дефект 24 та ін. Можливі переходи станів рейок зазначені стрілками, що являють собою інтенсивності відмов і відновлення рейок. Потоки відмов $\lambda_i(t)$ – це інтенсивність накопичення

дефектів і пошкоджень в рейках, а потоки відновлення $\mu_i(t)$ характеризують інтенсивність виконання робіт по їх усуненню або попередженню.

Побудова графа переходу здійснюється наступним чином. Наприклад, розглянемо розвиток дефекту 44 (боковий знос головки рейки). В момент пропущеного тоннажу $t=0$ рейки знаходяться в стані P_0 - це справний стан. Під час експлуатації можливе виникнення дефекту 44 і при перевищенні допустимих норм бокового зносу рейки підлягають плановій заміні. При цьому якщо боковий знос понад 15 до 20 мм швидкість руху поїздів обмежується до 80/70 км/год і рейки переходять в стан P_{43} . При подальшому розвитку дефекту від 20 до 26 мм рейки переходять в наступний стан P_{44} . Коли розмір дефекту доходить до граничного значення рейки переходять в стан повної відмови P_{45} і підлягають заміні негайно. Аналогічно розглядаючи розвиток дефектів - d (позначено на рис.2.7) будуються інші можливі стани системи.

Головним методом отримання відомостей відносно надійності роботи рейок у колії є опрацювання статистичної інформації про відмови з визначенням їх інтенсивності. Статистична обробка даних дозволяє визначити закон розподілу часу безвідмовної роботи і прогнозувати всі показники надійності об'єкта. Функція інтенсивності потоку відмов перш за все залежить від фізики виникнення дефектів, а в кожному конкретному випадку від багатьох експлуатаційних факторів, таких як пропущений тоннаж, вантажонапруженість, осьове навантаження, швидкість руху поїздів, план лінії, максимально-допустимих величин накопичувальних пошкоджень чи деформацій, рівня напружень від динамічного навантаження. Функція відновлення залежить від системи утримання колій, яка прийнята на залізницях. В роботі [23] приведено перелік інтенсивності відмов і відновлення відповідно до дефектів, що виникають в рейках.

Граф переходу системи містить кінцеве число можливих станів $i=0, 1...59$ і параметр t (попущений тоннаж) міняється безупинно і перехід з одного стану

в інший можливий в будь-який момент t . Позначимо $P_i(t)$ як ймовірність знаходження системи в i – тому стані.

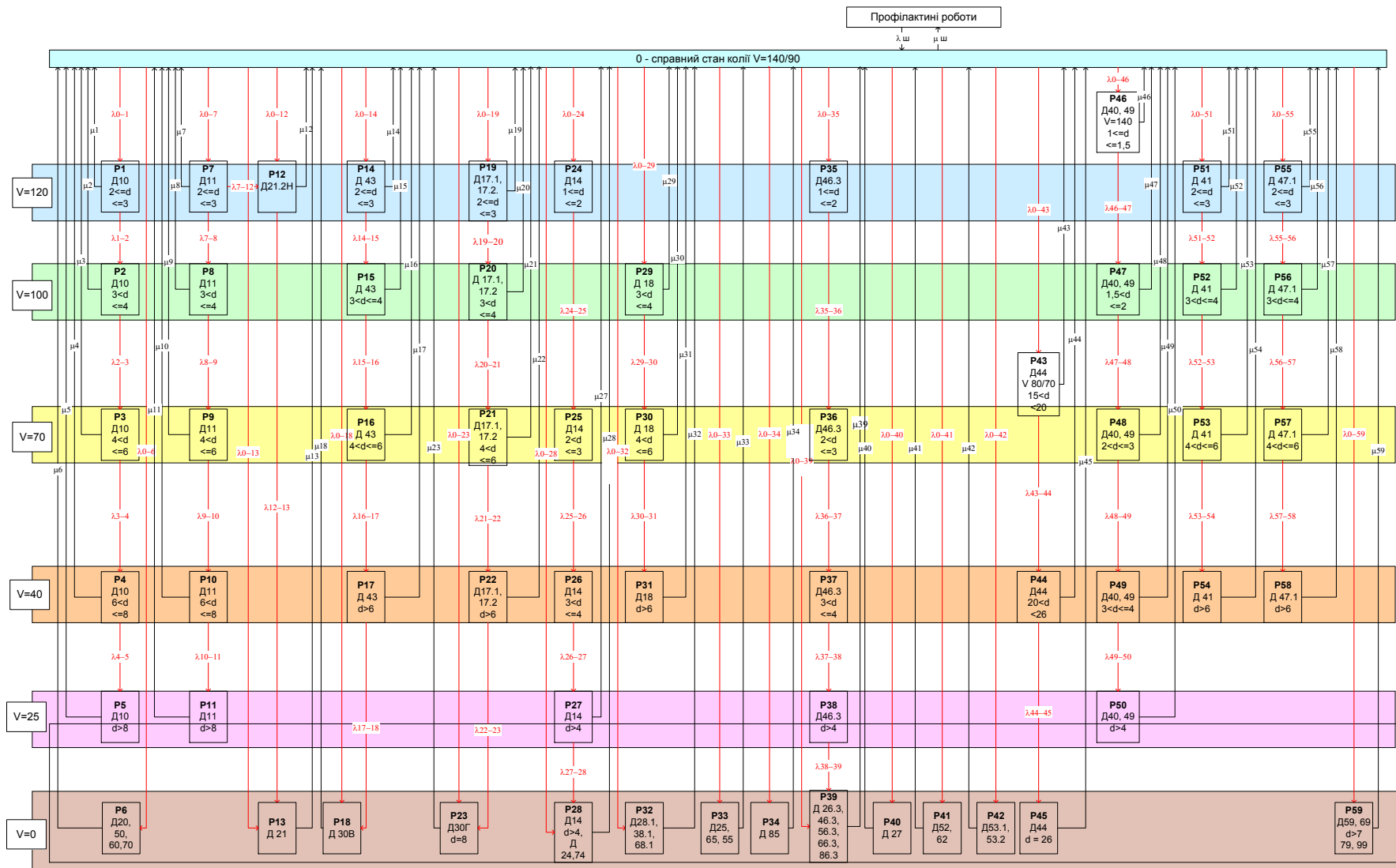


Рис. 2.7 Модель життєвого циклу рейок у колії

Значення елементів матриці А

Елемент матриці	Значення	Елемент матриці	Значення
1	2	3	4
$a_{1,1}$	$-(\lambda_{0-1} + \lambda_{0-6} + \lambda_{0-7} + \lambda_{0-12} + \lambda_{0-13} + \lambda_{0-14} + \lambda_{0-18} + \lambda_{0-19} + \lambda_{0-23} + \lambda_{0-24} + \lambda_{0-26} + \lambda_{0-28} + \lambda_{0-29} + \lambda_{0-32} + \lambda_{0-33} + \lambda_{0-34} + \lambda_{0-35} + \lambda_{0-39} + \lambda_{0-40} + \lambda_{0-41} + \lambda_{0-42} + \lambda_{0-43} + \lambda_{0-46} + \lambda_{0-51} + \lambda_{0-55} + \lambda_{0-59} + \lambda_{ii}) + \mu_{ii}$	$a_{13,8}$	λ_{7-12}
$a_{1,2} \dots a_{1,24}$	$\mu_1 \dots \mu_{23}$	$a_{13,13}$	$-(\lambda_{12-13} + \mu_{12})$
$a_{1,28} \dots a_{1,35}$	$\mu_{27} \dots \mu_{34}$	$a_{14,1}$	λ_{0-13}
$a_{1,40} \dots a_{1,60}$	$\mu_{39} \dots \mu_{59}$	$a_{14,13}$	λ_{12-13}
$a_{2,1}$	λ_{0-1}	$a_{14,14}$	$-\mu_{13}$
$a_{2,2}$	$-(\lambda_{1-2} + \mu_1)$	$a_{15,1}$	λ_{0-14}
$a_{3,2}$	λ_{1-2}	$a_{15,15}$	$-(\lambda_{14-15} + \mu_{14})$
$a_{3,3}$	$-(\lambda_{2-3} + \mu_2)$	$a_{16,15}$	λ_{14-15}
$a_{4,3}$	λ_{2-3}	$a_{16,16}$	$-(\lambda_{15-16} + \mu_{15})$
$a_{4,4}$	$-(\lambda_{3-4} + \mu_3)$	$a_{17,16}$	λ_{15-16}
$a_{5,4}$	λ_{3-4}	$a_{17,17}$	$-(\lambda_{16-17} + \mu_{16})$
$a_{5,5}$	$-(\lambda_{4-5} + \mu_4)$	$a_{18,17}$	λ_{16-17}
$a_{6,5}$	λ_{4-5}	$a_{18,18}$	$-(\lambda_{17-18} + \mu_{17})$
$a_{6,6}$	$-\mu_5$	$a_{19,1}$	λ_{0-18}
$a_{7,1}$	λ_{0-6}	$a_{19,18}$	λ_{17-18}
$a_{7,7}$	$-\mu_6$	$a_{19,19}$	$-\mu_{18}$
$a_{8,1}$	λ_{0-7}	$a_{20,1}$	λ_{0-19}
$a_{8,8}$	$-(\lambda_{7-8} + \lambda_{7-12} + \mu_7)$	$a_{20,20}$	$-(\lambda_{19-20} + \mu_{19})$
$a_{9,8}$	λ_{7-8}	$a_{21,20}$	λ_{19-20}
$a_{9,9}$	$-(\lambda_{8-9} + \mu_8)$	$a_{21,21}$	$-(\lambda_{20-21} + \mu_{20})$
$a_{10,9}$	λ_{8-9}	$a_{22,21}$	λ_{20-21}
$a_{10,10}$	$-(\lambda_{9-10} + \mu_9)$	$a_{22,22}$	$-(\lambda_{21-22} + \mu_{21})$
$a_{11,10}$	λ_{9-10}	$a_{23,22}$	λ_{21-22}
$a_{11,11}$	$-(\lambda_{10-11} + \mu_{10})$	$a_{23,23}$	$-(\lambda_{22-23} + \mu_{22})$
$a_{12,11}$	λ_{10-11}	$a_{24,1}$	λ_{0-23}
$a_{12,12}$	$-\mu_{11}$	$a_{24,23}$	λ_{22-23}

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4
$a_{13,1}$	λ_{0-12}	$a_{24,24}$	$-\mu_{23}$
$a_{25,1}$	λ_{0-24}	$a_{42,42}$	$-\mu_{41}$
$a_{25,25}$	$-\lambda_{24-25}$	$a_{43,1}$	λ_{0-42}
$a_{26,25}$	λ_{24-25}	$a_{43,43}$	$-\mu_{42}$
$a_{26,26}$	$-\lambda_{25-26}$	$a_{44,1}$	λ_{0-43}
$a_{27,26}$	λ_{25-26}	$a_{44,44}$	$-(\lambda_{43-44} + \mu_{43})$
$a_{27,27}$	$-\lambda_{26-27}$	$a_{45,44}$	λ_{43-44}
$a_{28,27}$	λ_{26-27}	$a_{45,45}$	$-(\lambda_{44-45} + \mu_{44})$
$a_{28,28}$	$-(\lambda_{27-28} + \mu_{27})$	$a_{46,45}$	λ_{44-45}
$a_{29,1}$	λ_{0-28}	$a_{46,46}$	$-\mu_{45}$
$a_{29,28}$	λ_{27-28}	$a_{47,1}$	λ_{0-46}
$a_{29,29}$	$-\mu_{28}$	$a_{47,47}$	$-(\lambda_{46-47} + \mu_{46})$
$a_{30,1}$	λ_{0-29}	$a_{48,47}$	λ_{46-47}
$a_{30,30}$	$-(\lambda_{29-30} + \mu_{29})$	$a_{48,48}$	$-(\lambda_{47-48} + \mu_{47})$
$a_{31,30}$	λ_{29-30}	$a_{49,48}$	λ_{47-48}
$a_{31,31}$	$-(\lambda_{30-31} + \mu_{30})$	$a_{49,49}$	$-(\lambda_{48-49} + \mu_{48})$
$a_{32,31}$	λ_{30-31}	$a_{50,49}$	λ_{48-49}
$a_{32,32}$	$-\mu_{31}$	$a_{50,50}$	$-(\lambda_{49-50} + \mu_{49})$
$a_{33,1}$	λ_{0-32}	$a_{51,50}$	λ_{49-50}
$a_{33,33}$	$-\mu_{32}$	$a_{51,51}$	$-\mu_{50}$
$a_{34,1}$	λ_{0-33}	$a_{52,1}$	λ_{0-51}
$a_{34,34}$	$-\mu_{33}$	$a_{52,52}$	$-(\lambda_{51-52} + \mu_{51})$
$a_{35,1}$	λ_{0-34}	$a_{53,52}$	λ_{51-52}
$a_{35,35}$	$-\mu_{34}$	$a_{53,53}$	$-(\lambda_{52-53} + \mu_{52})$
$a_{36,1}$	λ_{0-35}	$a_{54,53}$	λ_{52-53}
$a_{36,36}$	$-\lambda_{35-36}$	$a_{54,54}$	$-(\lambda_{53-54} + \mu_{53})$
$a_{37,36}$	λ_{35-36}	$a_{55,54}$	λ_{53-54}
$a_{37,37}$	$-\lambda_{36-37}$	$a_{55,55}$	$-\mu_{54}$
$a_{38,37}$	λ_{36-37}	$a_{56,1}$	λ_{0-55}
$a_{38,38}$	$-\lambda_{37-38}$	$a_{56,56}$	$-(\lambda_{55-56} + \mu_{55})$
$a_{39,38}$	λ_{37-38}	$a_{57,56}$	λ_{55-56}
$a_{39,39}$	$-\lambda_{38-39}$	$a_{57,57}$	$-(\lambda_{56-57} + \mu_{56})$
$a_{40,1}$	λ_{0-39}	$a_{58,57}$	λ_{56-57}
$a_{40,39}$	λ_{38-39}	$a_{58,58}$	$-(\lambda_{57-58} + \mu_{57})$
$a_{40,40}$	$-\mu_{39}$	$a_{59,58}$	λ_{57-58}
$a_{41,1}$	λ_{0-40}	$a_{59,59}$	$-\mu_{58}$

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4
$a_{41,41}$	$-\mu_{40}$	$a_{60,1}$	λ_{0-59}

$a_{42,1}$	λ_{0-41}	$a_{60,60}$	$-\mu_{59}$
------------	------------------	-------------	-------------

3. ОЦІНОЧНІ КРИТЕРІЇ МІЦНОСТІ РЕЙОК ТА ІНШІ НАПРЯМИ ПРАКТИЧНОГО ВПРОВАДЖЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1. Визначення допустимої інтенсивності відмов рейок з умови економічної доцільності в конкретних умовах експлуатації

Встановлення допустимої інтенсивності відмов рейок у колії використовується для визначення оціночних критеріїв їх міцності. При цьому допустимий рівень відмов рейок у колії визначався в залежності від осьового навантаження та вантажонапруженості лінії для прямих ділянок колії. При визначенні допустимого рівня відмов рейок використовувалась модель відмов рейок за дефектами контактено-втомленого характеру, оскільки ці дефекти носять не випадковий характер, а підпорядковуються певним закономірностям. Це дозволить диференціювати оціночні критерії міцності рейок у колії по вищезазначеним критеріям.

Рівень відмов рейок у колії залежить від осьового навантаження. Розглянемо вплив осьового навантаження на сумарні витрати перевізного процесу і колійного господарства. Витрати на перевезення вантажів також залежать від осьового навантаження. Оскільки при однаковому вантажообігу і різних осьових навантаженнях буде різна кількість поїздів, а це і різні затрати на локомотивні ресурси, рухомий склад, людські ресурси та ін. З однієї сторони, чим більше осьове навантаження, тим менший основний питомий опір, наприклад при зміні осьового навантаження з 15 до 20 т/вісь основний питомий опір зменшується на 12,6 %. Ця величина впливає на витрати на тягу поїздів. Отже при збільшенні осьового навантаження витрати на тягу поїздів зменшуються. З другої сторони, чим більше осьове навантаження, тим частіші поодинокі відмови рейок, що в свою чергу збільшує експлуатаційні витрати на заміну рейок при поточному утриманні.

Визначення допустимої інтенсивності відмов рейок диференційованої для різних умов експлуатації в загальному вигляді ґрунтується на таких критеріях.

1. Технічний критерій, який забезпечує безпеку руху поїздів.
2. Економічний критерій, який визначається виходячи з мінімуму сумарних витрат на перевезення вантажів і витрат колійного господарства, що пов'язані з поодиноким заміню рейок.

Крім вище зазначених критеріїв, рівень відмов рейок у колії обмежується також додатковими критеріями.

1. Можливість надання «вікон» для виконання ремонтів колії.
2. Наявність людських ресурсів (працезатрати) на поточне утримання.
3. Наявність фінансових ресурсів.

Економічний критерій показує економічно-раціональний рівень відмов рейок у колії. При цьому його значення приймається до уваги, якщо воно менше за рівень, що забезпечує безпеку руху поїздів.

Технічний критерій характеризує працездатність рейок на ділянці. В якості технічного критерію в роботах [2, 106, 107] прийнято сумарне накопичення питомих поодиноких відмов рейок. Цей критерій використовувався для призначення суцільної зміни рейок.

Функціональна залежність сумарних витрат колійного господарства і перевізного процесу має наступний вигляд:

$$E = E_{зр} + E_{зм} + E_n, \quad (3.1)$$

де $E_{зр}$ - витрати на поодинокі заміни рейок при поточному утриманні;

$E_{зм}$ - витрати на оплату робочої сили при поодинокій заміні рейок;

E_n - витрати на перевезення вантажів.

Витрати колійного господарства та на перевезення вантажів детально розглядаються в п'ятому розділі.

Допустимий рівень відмов рейок у колії залежить від допустимого рівня осьового навантаження. За моделлю відмов рейок для дефектів контактнотомленого та втомленого характеру, яка розроблена в третьому розділі при наступних експлуатаційних умовах: пропущений тоннаж – 800 млн. т, план лінії – прямі і криві радіусом більше 2000 м отримано залежність осьового навантаження від відмов рейок у колії. Вибір таких експлуатаційних умов

обґрунтовується тим, що вони використовуються для визначення в подальшому оціночних критеріїв міцності. Результати приведені на рис. 3.1.

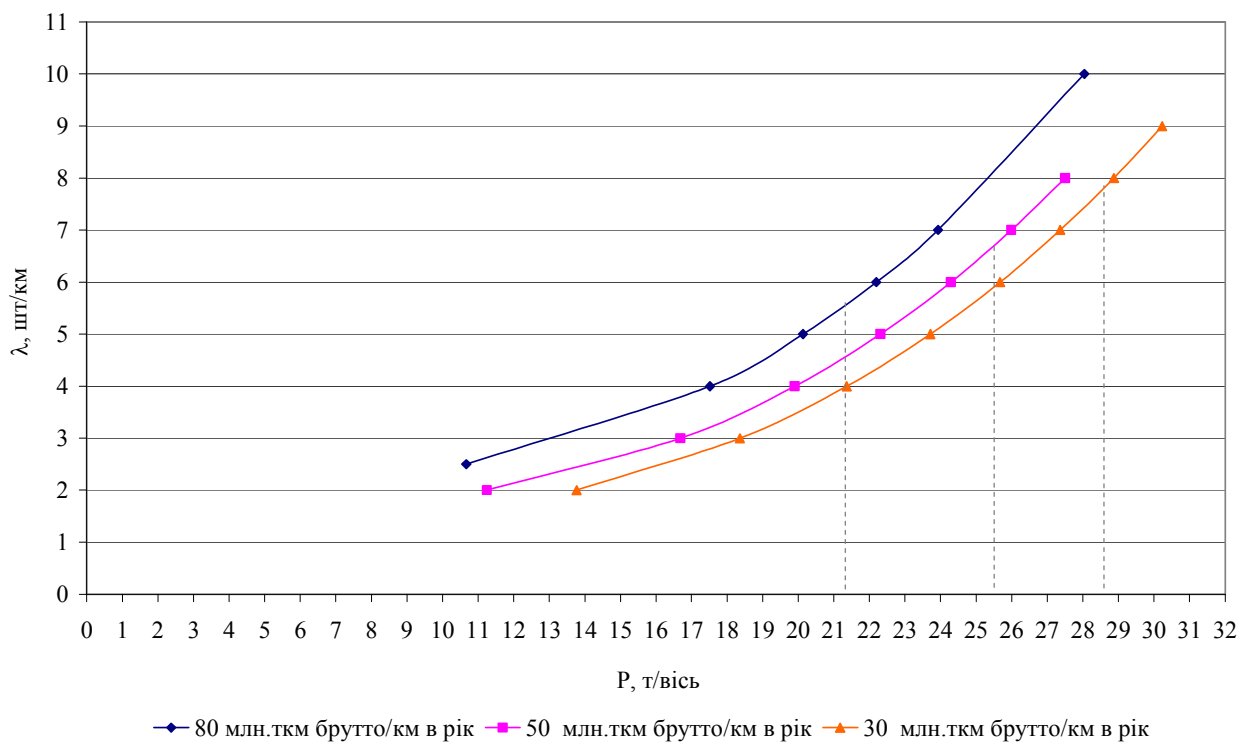


Рис. 3.1 – Залежність відмов рейок у колії від осьового навантаження.

Рациональний рівень осьового навантаження для заданих умов експлуатації визначається з умови, при якій сумарні витрати колійного господарства та витрати на перевезення вантажів повинні бути мінімальними. Даний мінімум функції отримуємо взявши першу похідну $\frac{dE}{d\lambda}$ і прирівнявши її до нуля. Розв’язок даної задачі в роботі здійснено з використанням програми Maple 9.

В графічному вигляді на рис. 3.2-3.5 приведені результати зміни витрат від розрахункової величини поодиноких відмов рейок для різної вантажонапруженості для прямих і кривих $R > 2000$ м. Для кривих ділянок $R < 2000$ м розрахунки не проводились, оскільки на таких ділянках передбачається суцільна заміна рейок в міжремонтний період, а оціночні критерії міцності рейок визначаються за повний цикл.

При вантажонапруженості 80 млн. т км бруто/км у рік економічно-раціональні поодинокі відмови рейок $[\lambda] = 5,6$ шт/км.

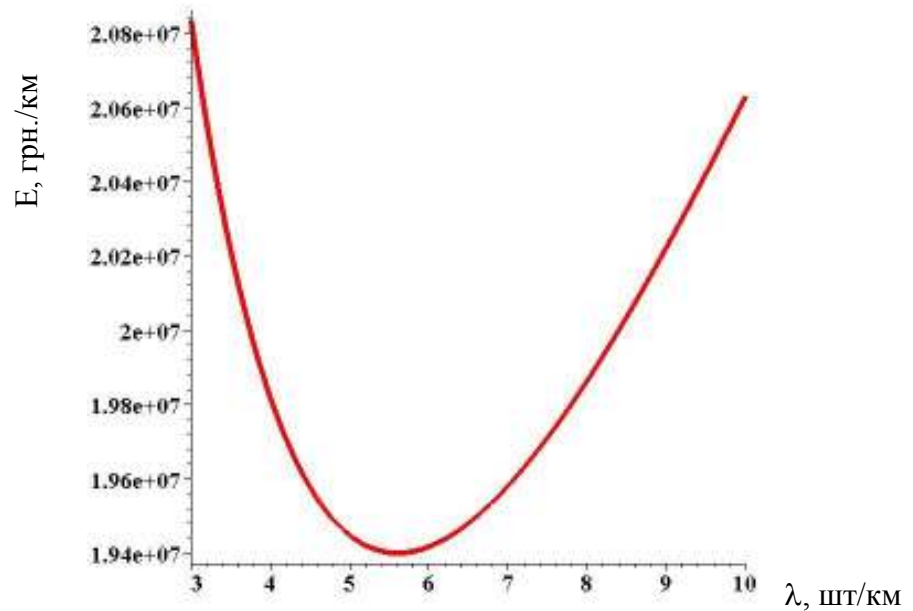


Рис. 3.2 – Сумарні витрати при вантажнапруженості 80 млн. т км брутто/км у рік.

При вантажнапруженості 50 млн. т км брутто/км у рік економічно-раціональні поодинокі відмови рейок $[\lambda] = 6,5$ шт/км.

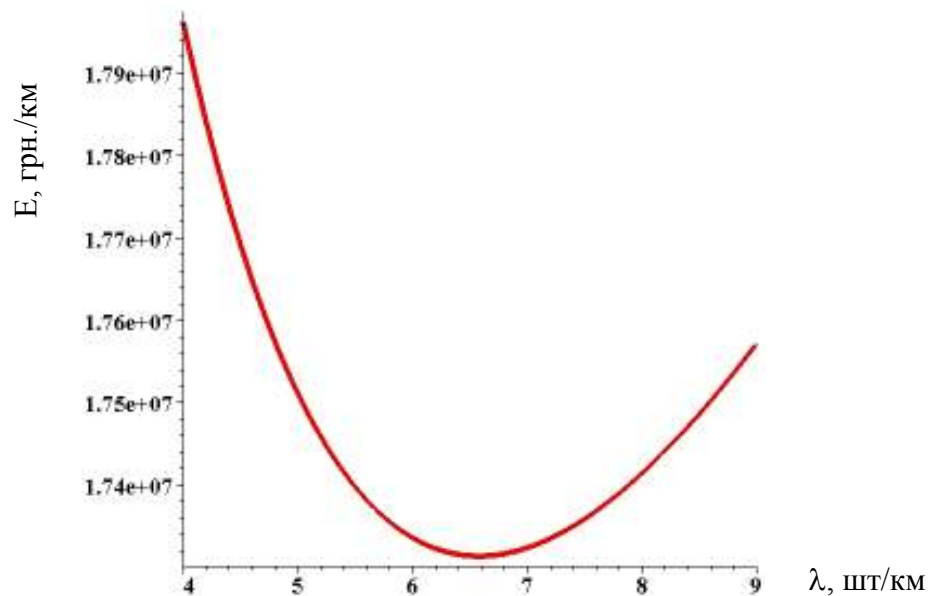


Рис. 3.3 – Сумарні витрати при вантажнапруженості 50 млн. т км брутто/км у рік.

При вантажнапруженості 30 млн. т км брутто/км у рік економічно-раціональні поодинокі відмови рейок $[\lambda] = 8$ шт/км.

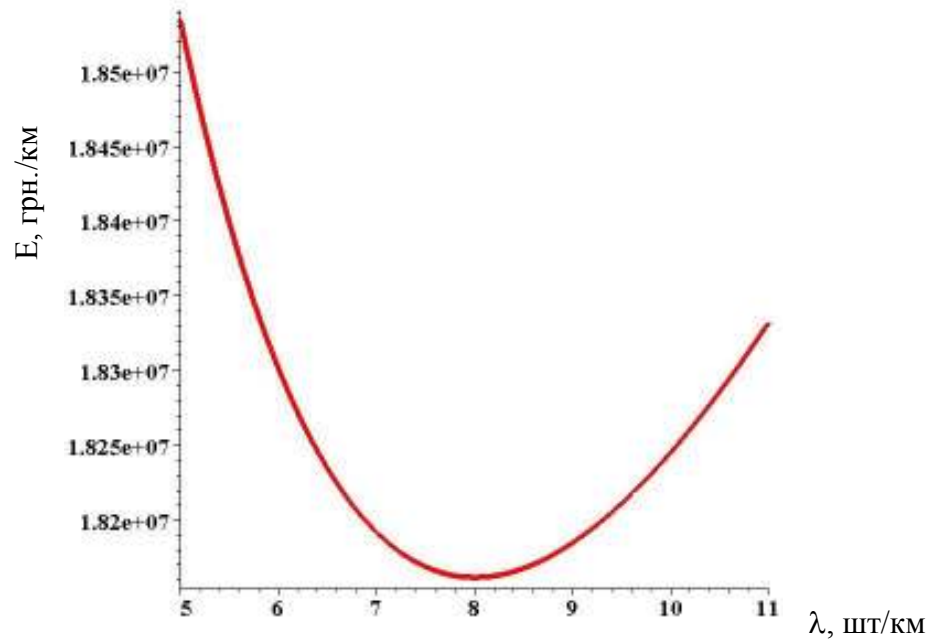


Рис. 3.4 – Сумарні витрати при вантажнапруженості 30 млн. т км брутто/км у рік.

3.2. Визначення оціночних критеріїв міцності рейок з умови не перевищення допустимої інтенсивності відмов

В Україні до недавнього часу діяли Правила розрахунку колії на міцність 1954 р. [38]. При цьому допустимі напруження в рейках для ланкової колії були встановлені однозначною величиною $[\sigma] = 240 \text{ МПа}$ в залежності від межі текучості рейкової сталі при одноразовому навантаженні. Проте, як видно із сучасних досліджень [6, 7, 54, 56-63], такий підхід до визначення допустимих напружень в рейках був не достатнім, а саме, принципово новою є флуктуаційно-часова теорія міцності академіка С.Н. Журкова [108]. Сам процес руйнування, чи утворення тріщини, згідно цієї теорії, інтерпретується, як поступовий процес накопичення розривів міжатомних зв'язків в твердому тілі, викликаний тепловим рухом атомів і молекул. Цей рух прискорюється механічними пошкодженнями, які знижують енергію розриву міжатомних зв'язків і перешкоджають їх відновленню. При цьому гублять зміст такі поняття-константи, як «границя міцності», «границя витривалості» матеріалу, так як згідно цієї теорії довговічність твердих тіл, що деформуються, залежить не тільки від навантаження і числа циклів їх дії, але й від часу і від

температури. В сучасних умовах експлуатації, крім вимоги забезпечення безпеки руху поїздів, повинна діяти інша – диференціація міцності колії по вантажонапруженості і швидкості руху поїздів, тобто, чим вища вантажонапруженість і швидкість руху поїздів на ділянці тим надійніша і міцніша повинна бути колія. Отже, потрібний розподіл несучої здатності елементів колії по вантажонапруженості, що з допомогою традиційних методів розрахунку не можна пояснити. Тому виникла необхідність в розробці принципово нової методики оцінки міцності колії, яка основана на врахуванні впливу на накопичення пошкоджень і деформацій її елементів не тільки величини діючих на неї навантажень, але й кількості їх дії при заданому нормативному строку експлуатації, чи вантажонапруженості.

Основні принципи такого методу були розроблені ЦНИИ МПС [41]. На базі цих принципів був виконаний ряд науково-дослідницьких робіт, в яких розроблені основи нового методу розрахунку колії на міцність [54, 57-59]. Розроблений і ухвалений новий метод розрахунку колії на міцність реального застосування набув у 2000 р. на залізницях Російської Федерації в якості Методики [56]. В даній методиці оціночним критерієм міцності виступає двопараметричний критерій міцності, який враховує величину навантаження і кількість їх дії (вантажонапруженість).

Новий метод розрахунку колії на міцність, згідно [56] ставить перед собою дві задачі. Перша – це перевірка разової міцності, або перевірка на витривалість. Допустимі значення напружень, що приведені в Правилах 1954 р. є необхідною, але не є достатньою умовою. Допустимі напруження в рейках $[\sigma_p]_{ny}$, за необхідною умовою, були прийняті як допустимі напруження розтягу в кромках підошви рейки за рахунок її згину і кручення під дією вертикальних і горизонтальних сил від рухомого складу і вирішують тільки першу задачу оцінки міцності колії. В інших дослідженнях, наприклад в [42] було запропоновано перейти від нормування допустимих напружень по границі текучості до нормування допустимих напружень в рейках при роботі на витривалість. При цьому умовна межа витривалості при роботі на згинаючі

деформації розрахована в лабораторних умовах – є важливою характеристикою і може бути достатньою умовою міцності. Проте вона не враховує термін та реальні умови експлуатації колії. Так як в реальних умовах рейки зазнають не тільки згин та циклічні навантаження, а витримують складні деформації, то пропонується при визначенні допустимих напружень в рейках використовувати розрахунок за показниками надійності, так як вони відображають реальні напруження в рейках. Для вирішення другої задачі щодо достатньої умови міцності потрібно враховувати термін та умови експлуатації. Виходячи з цього, пропонується визначати допустимі напруження в рейках з урахуванням додаткових критеріїв. Позначимо допустимі напруження визначенні з умов не перевищення допустимої кількості відмов рейок як $[\sigma_p]_{\text{доп}}$ (достатня умова) – це функція, що залежить від умов експлуатації, характеристик рейок, допустимого значення інтенсивності відмов рейок.

Опираючись на досвід ВНИИЖТу [62], була поставлена задача переглянути допустимі напруження в рейках [38], і надати пропозиції відносно їх зміни, враховуючи нові підходу до розрахунок колії на міцність. При цьому розглядалась диференціація допустимих напружень в рейках в залежності від категорії колії (вантажонапруженості) окремо для вагонів і локомотивів.

В основу даного дослідження покладена методика визначення допустимих напружень в рейках [61] зі змінами, що стосуються визначення фактичної величини інтенсивності відмов рейок у колії.

Враховуючи дві умови – достатню і необхідну, умова міцності рейок, буде мати такий вигляд:

$$\begin{cases} \sigma^{\text{розн}} \leq [\sigma_p]_{\text{доп}} \\ \sigma^{\text{розн}} \leq [\sigma_p]_{\text{необ}} \end{cases}, \quad (3.2)$$

де $\sigma^{\text{розн}}$ – розрахункові напруження в рейках.

Допустимі напруження в рейках за достатньою умовою $[\sigma_p]_{\text{доп}}$:

$$[\sigma_p]_{\text{доп}} = f(K_t; k; [\lambda]), \quad (3.3)$$

де K_t – категорія колії, яка визначається за вантажонапруженістю залізниці;

k – інтегральна характеристика фізико-механічних властивостей розрахункового елемента колії (тип рейки, зміцнення);

$[\lambda]$ – допустима величина відмов рейок, що накопичується за весь період експлуатації між їх оновленнями. Даний параметр визначався окремим дослідженням і представлений в підрозділі 3.1.

Критерієм міцності сучасних конструкцій колії є таке навантаження на її несучі елементи, при якому кількість відмов між оновленнями її верхньої будови колії не буде перевищувати допустиму величину.

Загальний вигляд умови працездатності рейок має наступний вигляд:

$$\left. \begin{array}{l} [\lambda_1] - K_y \cdot \lambda_1(T, P, G, K) \geq 0 \\ \vdots \\ [\lambda_i] - K_y \cdot \lambda_i(T, P, G, K) \geq 0 \end{array} \right\} \quad (3.4)$$

де $[\lambda_i]$ - допустима величина i –того виду відмов рейок, що накопичується за весь період експлуатації між їх оновленнями;

$\lambda_i(T, P, K, G)$ - фактична величина напрацювання i – тої відмови рейки в залежності від пропущеного тоннажу, осьового навантаження, плану лінії та вантажонапруженості (відповідно до позначень в дужках);

K_y – безрозмірний коефіцієнт, який враховує можливий вплив інших факторів на накопичення відмов в рейках.

Критерій міцності рейок за експлуатаційними умовами визначається з виразу (3.4) шляхом його рішення відносно навантаження P для граничних випадків, тобто після заміни нерівностей рівностями.

Основою формалізованих умов міцності рейок є функція накопичення їх відмов чи пошкоджень $\lambda_i(T, P, K, G)$. На відміну від даної роботи в методиці [61] розглядається два параметри – пропущений тоннаж та напруження в рейках під час проходження рухомого складу, а двопараметричний критерій міцності h представлений як добуток двох простих (степеневих) функцій.

В явному вигляді функцію інтенсивність потоку відмов рейок для різних видів відмов можна представити різними законами розподілу. Вони визначаються експериментально на основі апроксимації даних про відмови в залежності від різних експлуатаційних факторів. В . роботі [34] для відмов контактено-втомленого характеру запропонована математична модель, яка має наступний вигляд:

$$\lambda(T, P, K, \Gamma) = (a_0 + a_1 \cdot P + a_2 \cdot \Gamma + a_3 \cdot R) \cdot T^{(b_0 + b_1 \cdot P + b_2 \cdot \Gamma + b_3 \cdot R)}, \quad (3.5)$$

де $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3$ - постійні коефіцієнти апроксимації.

Сумарні фактичні відмови рейок протягом заданого періоду експлуатації в залежності від вантажонапруженості, осьового навантаження та плану лінії визначаються через інтеграл даної залежності по пропущеному тоннажу. Виконавши розрахунки була отримана функція сумарних відмов рейок. Прирівнявши це рівняння до $[\lambda]$, і обчисливши відносно осьового навантаження P , отримуємо середнє допустиме значення навантаження $[\bar{P}]$.

Тоді, система умов для розрахунку критеріїв міцності рейок по обмеженню кількості їх відмов за період заданого напрацювання прийме наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} [P]_1 &= \frac{\varphi_1}{\gamma_1} [\bar{P}]_1 \\ \dots\dots\dots \\ [P]_i &= \frac{\varphi_i}{\gamma_i} [\bar{P}]_i \end{aligned} \right\}, \quad (3.6)$$

$$\varphi = 1 + \psi C, \quad (3.7)$$

де $[P]_i$ - допустиме еквівалентне значення поїзного навантаження;

γ - функція зв'язку між еквівалентним і середнім значенням P ;

ψ - безрозмірний коефіцієнт рівня ймовірності розрахункових фактичних значень P для порівняння з $[P]_i$, який дорівнює 2,5 згідно [61];

C – коефіцієнт зміни діючих поїзних динамічних навантажень, рівних відношенню середньоквадратичного їх відхилення до середнього по заданій

ділянці. Даний коефіцієнт визначається по закону композиції випадкових величин:

$$C = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}, \quad (3.8)$$

де C_1 – коефіцієнт зміни статичних навантажень на колію, який залежить від долі різних видів вантажу, степені і нерівномірності завантаження вагонів частини порожніх пробігів;

C_2 - коефіцієнт зміни динамічних навантажень, який залежить від швидкості руху, нерівностей на колесах та колії, а також динамічних характеристик рухомого складу.

Коефіцієнт C_1 визначається на основі середніх статичних значеннях осьового навантаження по звітах ЦО-4. Основна ідея і фізична сутність визначення даного коефіцієнта детально описані в [57]. Формула визначення C_1 має наступний вигляд:

$$C_1 = \frac{P_{\max} - \bar{P}}{2,5\bar{P}}. \quad (3.9)$$

Визначено коефіцієнт C_1 , який дорівнює 0,211.

Розрахунок коефіцієнт C_2 ґрунтується на методах розроблених М.Ф. Веріго і О.Я. Коганом і згідно [46] дорівнює 0,08 при долі пасажирських поїздів в загальній складовій вантажонапруженості менше 15% (в даній роботі доля пасажирських поїздів склала 13,1%). Отже коефіцієнт зміни діючих поїзних динамічних навантажень C дорівнює 0,226.

Функція γ визначається з виразу:

$$\gamma = 1 + 0.94nC^2, \quad (3.10)$$

де n – позитивне число, що характеризує вплив величини навантаження P на різні накопичення відмов рейок при однаковому пропущеному тоннажі.

Фактичні значення n можуть коливатись від 1 до 3 за різними джерелами [46, 51]. В розрахунку прийнято 1,5.

Якщо використовувати в якості міри силової дії коліс на рейки замість допустимого еквівалентного навантаження допустимі згинаючі напруження, які

лінійно залежать від них, то оціночний критерій міцності для рейок за достатньою умовою $[\sigma_p]_{\partial y}$ можна представити у вигляді рівняння

$$[\sigma_p]_{\partial y} = \xi \cdot [P], \quad (3.11)$$

де ξ – коефіцієнт переходу від навантажень до напружень, які виникають в кромках підшви рейки. Даний коефіцієнт залежить від модуля пружності підрейкової основи, від розрахункових характеристик поперечного перерізу рейок, від коефіцієнта переходу від осьових напружень в підшві рейки до кромочних в підшві.

В результаті отримуємо $[\sigma_p]_{\partial y}$ – допустимі напруження в рейках, за умови не перевищення допустимої кількості відмов рейок за період нормативного напрацювання. Для безстикової конструкції колії допустимі напруження дорівнюють

$$[\sigma_p]_{\partial y}^{\text{бк}} = [\sigma_p]_{\partial y}. \quad (3.12)$$

Для ланкової потрібно відняти температурні напруження, які типовим розрахунком колії на міцність не враховуються. Тому для тих категорій колії, що передбачають ланкову конструкцію колії допустимі напруження можна обчислити за формулою

$$[\sigma_p]_{\partial y}^{\text{лк}} = \frac{[\sigma_p]_{\partial y} - \sigma_t}{K_3}, \quad (3.13)$$

де σ_t – температурні напруження в рейках;

K_3 – коефіцієнт запасу.

Розрахунок σ_t приведений, наприклад, в [109].

В даній роботі, на основі вище приведеної методики, були проведені розрахунки оціночних критеріїв міцності для загартованих рейок типу Р65, які працюють в безстиковій конструкції колії, як для найбільш поширеної конструкції колії в Україні. Згідно [68] головні колії поділяються на 8 категорій в залежності від вантажонапруженості та встановленої швидкості руху. Тому

було розглянуто, як змінюється величина оціночних критеріїв міцності в рейках в залежності від вантажнапруженості. При цьому розрахунки проводилися для прямих і кривих $R > 2000$ м при заданому сумарному пропущеному тоннажу по колії ($T_{\text{сум}} = 800$ млн. т.). Для ділянок з низькою вантажнапруженістю значення критеріїв міцності можуть виходити за межу допустимих напружень в рейках при розрахунку по крихкому зламу чи залишковому згину, тому їх потрібно обмежувати. На рис. 3.5, 3.6 приведені результати розрахунку оціночних критеріїв міцності в залежності від різних допустимих сумарних відмов рейок при різних значеннях вантажнапруженості для зони підшви і головки рейки.

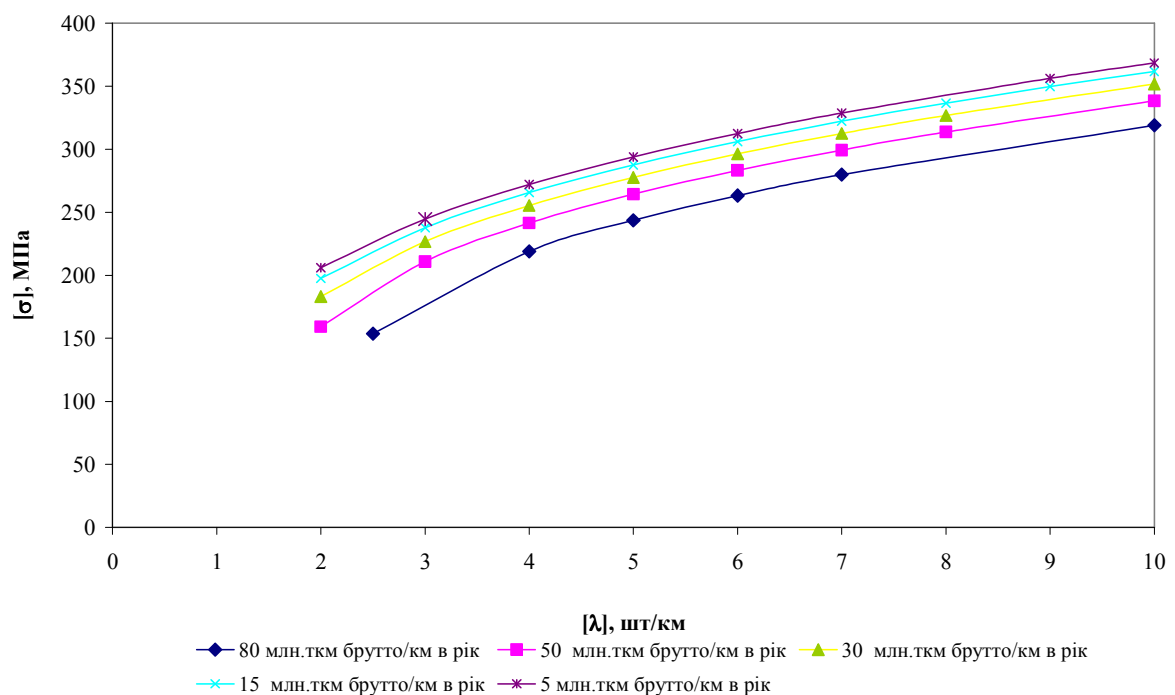


Рис. 3.5 - Залежність напружень від сумарних відмов рейок, які виникають в підшві рейки при різних значеннях вантажнапруженості.

Оціночні критерії міцності рейок розраховані при середньому значенні модуля пружності підрейкової основи 50 МПа.

Прийнявши допустиму величину відмов, можна отримати оціночні критерії міцності для рейок. Допустима величина відмов рейок в шт./км визначена на основі техніко-економічних критеріїв, які приведені в [34].

Залежність допустимих напружень в рейках від вантажнапруженості при різних значеннях відмов, в шт./км приведений на рис. 3.7.

У результаті розрахунків допустимі напруження в рейках визначені з умови неперевищення допустимої кількості відмов рейок за період нормативного напрацювання. Значення допустимих напружень приведені в табл. 3.1 в залежності від вантажонапруженості встановленої [68]. При цьому допустима кількість відмов прийнята для вантажонапруженості 80 млн. т км брутто/км у рік – 6 шт/км, 50 млн. т км брутто/км у рік – 6 шт/км, 30 млн. т км брутто/км у рік – 8 шт/км.

Оскільки, на ділянках з малою вантажонапруженістю отримано високі значення допустимих напружень в рейках, прийнято рішення обмежити їх розрахунками на витривалість за рівнянням 3.2.

Таблиця 3.1

Оціночні критерії міцності в рейках до пропуску нормативного тоннажу для безстикової колії із загартованими рейками Р65

Вид рухомого складу	Область на рейці	Значення оціночних критеріїв міцності, в МПа при вантажонапруженості, млн. т км брутто/км у рік					
		більше 80	80...50	50...30	30-15	15-5	менше 5
Локомотиви	Підшви	290	300...320	320...360	360	360	360
	Головка	330	340...360	360...400	400	400	400
Вагони	Підшви	250	260...280	280...320	320	320	320
	Головка	290	300...320	320...360	360	360	360

Отримані результати порівнювались з результатами, які визначені за існуючими методиками. А саме за [68] допустимі напруження в рейках при розрахунку на витривалість при багато цикловій роботі в лабораторних умовах складають для загартованих рейок при розрахунку на розтяг – 310 МПа, стиск – 350 МПа. Ці дані відрізняються від напружень визначених за методикою, яка оснований на допустимому рівні відмов рейок на 3-5% при середніх умовах експлуатації колії. В порівнянні з результатами, розрахованими за методикою ВНИИЖТу, отримані в роботі значення відрізняються на 2-14% при різних значеннях вантажонапруженості. При цьому отримані значення приводились до результатів в [56], оскільки вони визначенні для різних експлуатаційних умов.

За методикою [47] також були розраховані допустимі напруження в незагартованих рейках. Вони відрізняються від загартованих на 22 %. Тому при використанні незагартованих рейок оціночні критерії міцності рейок пропонується зменшити на 22 %.

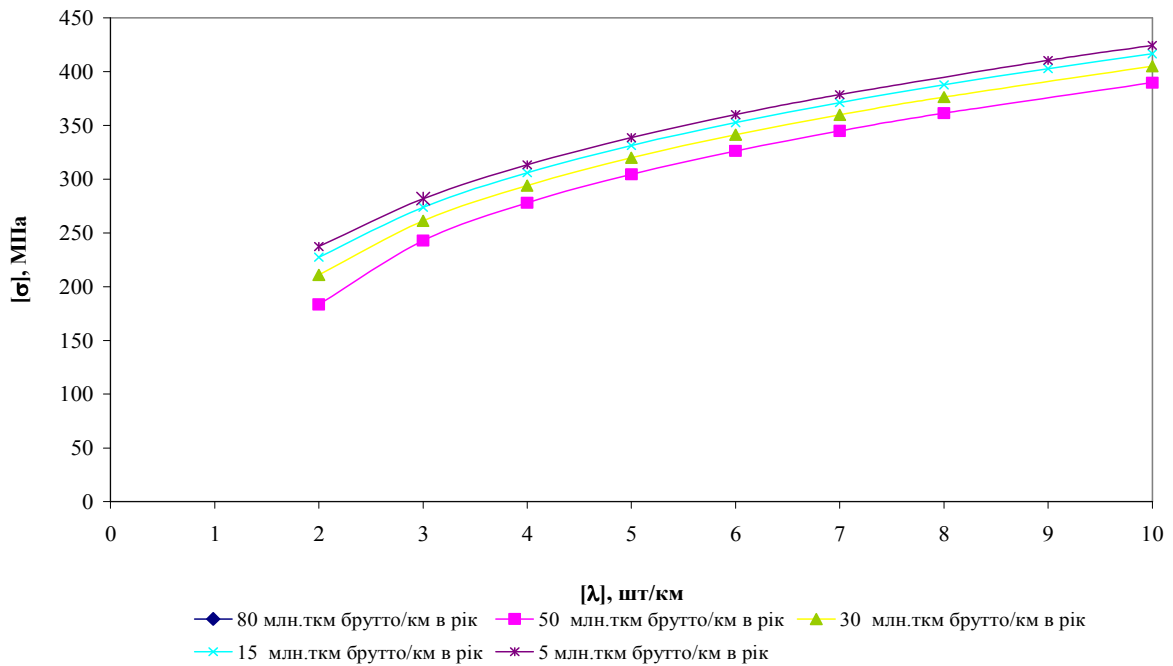


Рис. 3.6 - Залежність сумарних відмов рейок від напружень, які виникають в головці рейки при різних значеннях вантажонапруженості. (Рейки типу Р 65, загартовані, безстикова конструкція колії).

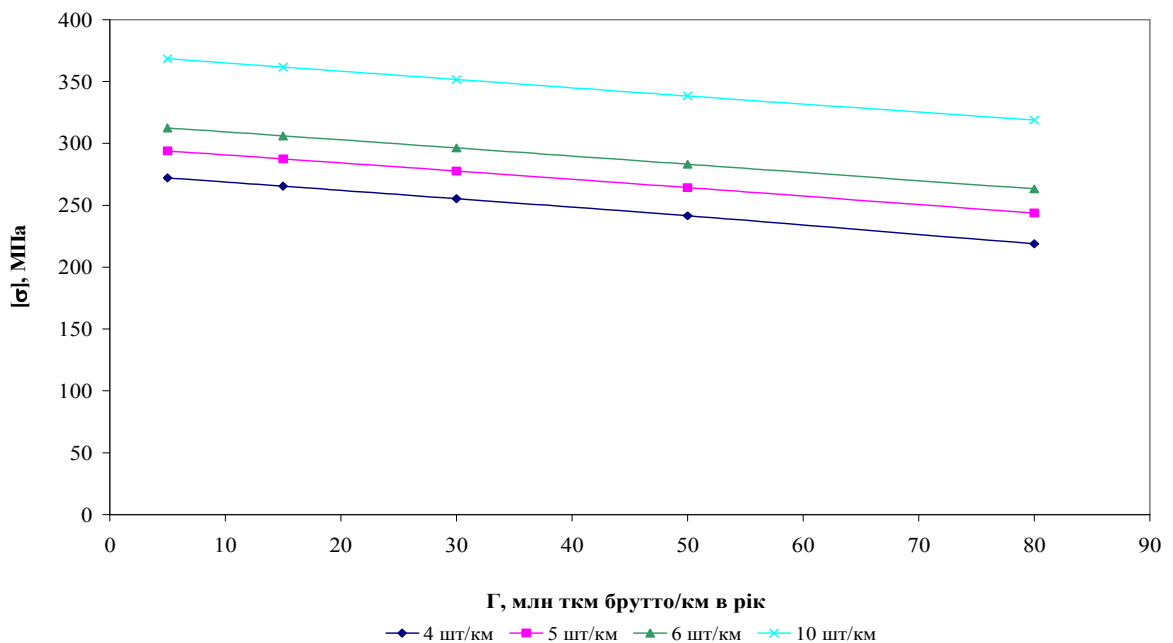


Рис. 3.7 - Залежність допустимих напружень в рейках від вантажонапруженості при різних значеннях відмов, в шт./км

Основна одиниця рухомого складу, яка впливає на колію – це є вагони і їх маса – найбільш вагома складова, яка формує вантажонапруженість ділянки. Тому для локомотивів, внаслідок їх суттєво меншої дії на колії можливе збільшення границі допустимих напружень в рейках і за даними [61] коливається в межах 11...15%.