

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет залізничного транспорту

МАЦЮК ВЯЧЕСЛАВ ІВАНОВИЧ

УДК 656.2:658.5

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ОРГАНІЗАЦІЇ  
ЗАЛІЗНИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ**

05.22.01 – транспортні системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків– 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі управління процесами перевезень в Державному університеті інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант** – доктор технічних наук, професор  
**Мироненко Віктор Кімович**,  
Державний університет інфраструктури та технологій, кафедра управління комерційною діяльністю залізниць, завідувач кафедри.

**Офіційні опоненти:** – доктор технічних наук, професор  
**Поліщук Володимир Петрович**,  
Національний транспортний університет, кафедра транспортних систем та безпеки дорожнього руху, завідувач кафедри;

– доктор технічних наук, професор  
**Козаченко Дмитро Миколайович**,  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, кафедра управління експлуатаційною роботою, професор кафедри;

– доктор технічних наук, професор  
**Лаврухін Олександр Валерійович**,  
Український державний університет залізничного транспорту, кафедра управління вантажною і комерційною роботою, завідувач кафедри.

Захист відбудеться «29» червня 2018 р. о 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.04 в Українському державному університеті залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

Автореферат розісланий «26» травня 2018 р.

В.о. вченого секретаря  
спеціалізованої вченої ради



О. М. Огар

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Виконання термінів доставки та освоєння запланованих обсягів перевезень при раціональному використанні наявних виробничих ресурсів можна вважати головними операційними задачами залізниць. У зв'язку з цим, технічне нормування, планування виробничої діяльності та загальна організація залізничних транспортних систем повинні забезпечувати належний рівень безвідмовності та ефективності.

Безвідмовність функціонування залізничних транспортних систем (надалі ЗТС) – складне, комплексне поняття і є ключовим при реалізації потрібної ефективності. Ця властивість містить: безвідмовність технічних засобів (технічну складову), безвідмовність поведінки людей (ефективність прийнятих рішень – людський фактор) і технологічну безвідмовність (безвідмовність систем технологій та експлуатаційного процесу залізничних станцій, вузлів і дільниць).

Крім суто технічних та управлінських (з точки зору ефективності прийняття рішень персоналом) складових загальної безвідмовності, технологічний процес також, як комплекс постійно взаємодіючих різних (за своїм технологічним оснащенням, набором каналів та множин обслуговуючих приладів) систем масового обслуговування, із постійно діючими зовнішніми та внутрішніми факторами формування відмов, повинен бути достатньо надійним.

Тому розвиток наукових основ підвищення ефективності організації залізничних транспортних процесів та систем усіх ієрархічних рівнів через вивчення закономірностей впливу множин зовнішніх і внутрішніх факторів та наявних параметрів на технологічну безвідмовність їх функціонування є актуальною науково-прикладною проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до Державної цільової програми реформування залізничного транспорту на 2010 – 2019 рр. (затвердженої постановою КМУ від 16.12.2009 № 1390), Транспортної стратегії України на період до 2020 року (затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р. № 2174-р), Закону про особливості утворення публічного акціонерного товариства залізничного транспорту загального користування (прийнятого Верховною Радою України від 23.02.2012 р. № 4442), проекту змін до Закону України «Про залізничний транспорт» (щодо розмежування функцій державного та господарського управління галуззю), прийнятого Верховною Радою України від 23.02.2012 р. № 9377, Переліком актів законодавства ЄС з питань залізничного транспорту та планами їх імплементації, схваленими розпорядженням КМУ від 26.11.2014 №1148-р, а також в рамках таких наукових тематик кафедри: «Розробка методів та оптимізаційних моделей управління в нових умовах взаємодії з клієнтом» (державний реєстраційний номер 0112U002440); «Розробка методики формування графіків доставки вантажів та функцій контролю виконання умов договорів при автоматизації перевізного процесу» (державний реєстраційний номер 0112U003672); «Дослідження стану і тенденцій розвитку транзитних перевезень та розробка пропозицій щодо освоєння перспективних транзитних вантажопотоків через територію України» (державний реєстраційний номер 0112U006664); «Розробка бізнес-плану пілотного проекту приміської залізничної компанії на одному з

напрямоків київського залізничного вузла» (державний реєстраційний номер 0112U006598); «Дослідження та визначення ділянок запровадження з урахуванням досвіду держав-членів Європейського Союзу денних поїздів з тактовим розкладом руху з незначним інтервалом з пасажиромісткістю до 300 чоловік» (державний реєстраційний номер 0113U007489); «Розробка єдиного технологічного процесу роботи ДП «УДЦТС Ліски» з урахуванням взаємодії філіалів, структурних підрозділів залізничного транспорту та формування бізнес-плану розвитку підприємств» (державний реєстраційний номер 0113U005601); «Правила недискримінаційного доступу до інфраструктури залізничного транспорту загального користування» (державний реєстраційний номер 0113U003216).

**Мета і задачі дослідження.** Дисертаційну роботу присвячено вирішенню науково-прикладної проблеми підвищення ефективності організації залізничних транспортних процесів та систем шляхом встановлення та дослідження причин формування технологічних відмов залізничного транспорту загального користування всіх ієрархічних рівнів.

Зазначена мета передбачає постановку та вирішення таких завдань дослідження:

1. Провести дослідження теорії та практики щодо етапів формування поняття «залізнична транспортна система».
2. Провести аналіз стану теорії і практики забезпечення технологічної безвідмовності та відмовостійкості залізничних транспортних систем.
3. Провести дослідження існуючого стану забезпечення технологічної безвідмовності перевізного процесу залізниць України та існуючої системи забезпечення надійності техніки в Україні.
4. Сформулювати концепцію і розробити систему критеріїв оцінки технологічної безвідмовності залізничних транспортних систем.
5. Розробити математичні моделі та встановити ключові зовнішні та внутрішні фактори впливу на ефективність функціонування мережі залізниць (ЗТС macro рівня).
6. Розробити практичні рекомендації щодо забезпечення технологічної безвідмовності ЗТС в умовах ринку доступу до інфраструктури залізниць.
7. Розробити математичні моделі та дослідити умови і час безвідмовного функціонування залізничних напрямків в умовах дії небезпечних факторів (ЗТС medium рівня).
8. Розробити імітаційні моделі та дослідити закономірності формування технологічних відмов у вчасному прийманні та відправленні поїздів, часу безвідмовної роботи у приймально-відправних парках залізничних станцій (ЗТС micro рівня).
9. Дослідити закономірності впливу окремих технологічних параметрів приймально-відправних парків на формування відмов у вчасному прийманні і відправленні поїздів та часу безвідмовної роботи.
10. Дослідити закономірності виникнення систематичної та повної технологічних відмов приймально-відправних парків та розробити практичні рекомендації для забезпечення потрібної безвідмовності їх взаємодії із прилеглими ділянками.

11. Дослідити ефективність організації залізничних транспортних процесів та систем за критерієм мінімальних операційних витрат і технологічної безвідмовності на прикладі наскрізної (зі зміною локомотивів) технологічної лінії обробки вантажних поїздів технічних станцій.

*Об'єкт дослідження* – організація залізничних транспортних процесів та систем.

*Предмет досліджень* – заходи та параметри технологій, що забезпечують безвідмовне функціонування залізничних транспортних процесів та систем.

*Методи дослідження.* Проведені дослідження базуються на використанні таких методів: регресійний та статистичний аналіз – при дослідженні динамік основних якісних та кількісних показників виконаної роботи залізниць України, ЄС, США, Канади та Китаю; теорія імовірності та математична статистика – при дослідженні інтервальних та дискретних рядів розподілу випадкових статистичних та експериментальних величин; теорія масового обслуговування та теорія імовірності (Марковські процеси) – при дослідженні систем масового обслуговування та оцінки граничних ймовірностей станів ЗТС; теорія алгоритмів та математична логіка – при розробці і формалізації аналітичних моделей формування вантажопотоків, оцінці граничних ймовірностей станів відмови ЗТС та розробці імітаційних моделей; дискретно-подієве імітаційне моделювання засобами об'єктно-орієнтовної мови програмування Java SE (Oracle) в середовищі розробки Eclipse та пакеті стандартних класів бібліотек середи розробки імітаційних моделей AnyLogic – для реалізації алгоритмів імітаційної моделі технологічних ліній технічних станцій залізниць, збору, систематизації та аналізу результатів моделювання.

*Наукова новизна одержаних результатів.* У дисертаційній роботі запропоновані наукові основи підвищення ефективності організації залізничних транспортних процесів та систем ієрархічних рівнів залізничних станцій, ДН, регіональних філій, напрямків та національної мережі залізниць в цілому. Розроблені моделі та методи дозволяють теоретично обґрунтувати критерії технологічної безвідмовності та мінімізації операційних витрат з метою підвищення ефективності технологічних процесів та систем залізниць.

У дисертаційних дослідженнях **вперше**:

1. Для оцінки безвідмовного функціонування технологічних процесів залізничних транспортних систем на рівні станцій, ДН, залізничних напрямків та мережі залізниць запропоновані критерії «технологічна відмова залізничних транспортних систем» та «час безвідмовного функціонування залізничних транспортних систем».

2. Запропоновані наукові основи формування рівноправного доступу до виділеної пропускної спроможності залізничних напрямків, що дозволяє забезпечити баланс економічних інтересів усіх учасників процесу доставки вантажів (вантажовласники, перевізники, операторів інфраструктури).

3. Формалізовано функціонування залізничних транспортних систем на рівні залізничних напрямків у вигляді циклічного переходу між працездатним станом – звичайним (безпечним) функціонуванням та непрацездатним станом – у тому числі під дією небезпечних факторів через виникнення надзвичайних ситуацій.

4. Формалізовано технологічний процес обробки наскрізних (зі зміною локомотивів) поїздів на технічних станціях у вигляді імітаційної моделі, що

дозволяє комплексно врахувати та оцінити стохастичну природу вхідних поїздопотоків і станційних технологічних процесів, наявні множини та технологічні параметри (кількість приймально-відправних колій, поїзних локомотивів, бригад технічного та комерційного огляду) для визначення ефективності за критерієм технологічної безвідмовності та мінімуму операційних витрат.

*Удосконалені та набули подальшого розвитку:*

1. Наукові основи взаємодії технічних станцій та прилеглих дільниць в частині формування мінімально-необхідних резервів наявної пропускної спроможності міжстанційних перегонів та дільниць, які, на відміну від існуючих, дозволяють забезпечити потрібну ефективність взаємодії залізничних станцій і прилеглих дільниць за критеріями потрібної технологічної безвідмовності та мінімуму сукупних операційних витрат.

2. Наукові основи проектування залізничних станцій та вузлів в частині розрахунку ємності колійного розвитку приймально-відправних парків технічних станцій, які, на відміну від існуючих, дозволяють забезпечити потрібний рівень безвідмовності технологічних процесів зазначених парків по прибутті та відправленні поїздів.

3. Наукові основи організації залізничних транспортних процесів та систем в частині обґрунтування технологічних норм опрацювання наскрізних (зі зміною локомотивів) вантажних поїздів на технічних станціях які, на відміну від існуючих, визначають міжопераційні прості рухомого складу і технологічних елементів залізничних транспортних систем як обов'язкові складові нормування відповідних технологічних операцій.

**Практичне значення результатів дослідження** полягає у такому:

1. Запропоновано методологію організації залізничних транспортних процесів та систем, за умови врахування стохастичних процесів прибуття, відправлення та обробки поїздів, що дозволяє вдосконалити діючі технологічні процеси технічних та інших залізничних станцій, інструкцію з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України, державні будівельні норми проектування залізниць колії 1520 мм, в частинах:

- визначення потрібної структури – кількості приймально-відправних колій, поїзних локомотивів, виділеної наявної пропускної спроможності міжстанційних перегонів та дільниць – транспортно-технологічних ліній із організації наскрізних (зі зміною локомотивів) поїздів;

- нормування технологічних операцій з обробки вантажних поїздів в приймально-відправних парках технічних станцій;

- обґрунтування мінімально-необхідного резерву наявної пропускної спроможності міжстанційних перегонів та дільниць.

2. Запропоновано методологію формування мережі пунктів дислокації відбудовних і пожежних поїздів та встановлення необхідних технологічних параметрів зазначених поїздів, при яких буде забезпечуватись потрібний рівень відмовостійкості функціонування залізничної транспортної мережі, що є основою для імплементації Директиви 2004/49/ЄС від 29 квітня 2004 р. «Про безпеку залізниць у Співтоваристві».

3. Запропоновано методологію визначення умов рівноправного доступу до виділеної пропускної спроможності залізничних напрямків, що є основою для імплементації Директиви 91/440/ЄС від 29 липня 1991 року «Про розвиток залізниць Співтовариства» та Директиви 2001/14/ЄС від 26 лютого 2001 року «Про розподілення пропускної спроможності залізничної інфраструктури, стягнення зборів за користування залізничною інфраструктурою та сертифікацію безпеки».

Результати дисертаційних досліджень впроваджені:

1. Департаментом управління рухом ПАТ «Укрзалізниця» при удосконаленні експлуатаційної роботи залізничних транспортних систем всіх рівнів.

2. Головним управлінням воєнізованої охорони ПАТ «Укрзалізниця» при вдосконаленні нормативів ресурсного забезпечення і технологічних процесів відновлення безпечного функціонування і працездатності об'єктів залізничної транспортної інфраструктури при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

3. ДП «Державний автотранспортний науково-дослідний і проектний інститут» при дослідженні основних проблем функціонування галузі транспорту на період до 2020 року.

4. Державним університетом інфраструктури та технологій у навчальний процес при розробці навчально-методичних комплексів дисциплін «Управління експлуатаційною роботою», «Залізничні станції та вузли», «Вантажні перевезення», «Взаємодія видів транспорту» та «Транспортне забезпечення зовнішньоекономічної діяльності» кафедр «Управління процесами перевезень» і «Управління комерційною діяльністю залізниць».

Всі впровадження підтвержені відповідними актами.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація є завершеною науковою працею. Всі положення і результати, що виносяться на захист, отримані автором самостійно або при його безпосередній участі та проводилися в Державному університеті інфраструктури та технологій. У роботах, що опубліковано у співавторстві, авторові безпосередньо належать: [3] – постановка задачі, розробка математичних моделей скорочення та виконання термінів доставки вантажів залізничним транспортом; [5] – постановка задачі, розробка математичних моделей та наукових положень щодо визначення меж обслуговування вантажних фронтів промислових зон розвиненими залізничним вузлами; [6] – розробка математичної моделі оцінки переробної спроможності транзитної лінії, оцінка її технологічної надійності; [7] – постановка і формалізація задачі, розробка математичних моделей щодо оцінки технологічної надійності функціонування ЗТС; [8] – розробка математичних моделей формування транзитних вантажопотоків та їх реалізація; [9, 27] – постановка задачі, розробка та реалізація моделей формалізації відносин учасників сучасного ринку залізничних вантажних перевезень; [10] – постановка задачі, оцінка наукової новизни досліджень, розробка математичних моделей; [11, 14, 26] – постановка задачі, розробка та реалізація математичних моделей; [13] – постановка задачі, формалізація та розробка методу пропорцій; [16] – розробка алгоритму формування «справедливої ціни» виділеної пропускної спроможності, реалізація

алгоритму; [17 – 25] – розробка математичних моделей формування технологічних відмов, скорочення непрацездатного стану залізничної інфраструктури внаслідок дії небезпечних факторів та оцінка технологічної надійності залізничних напрямків в умовах виникнення надзвичайних ситуацій; [31] – оцінка впливу технологічної безвідмовності на загальну безвідмовність функціонування залізничного транспорту в Україні.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційних досліджень пройшли публічне обговорення, апробацію та були ухвалені на: V МНПК «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка, технології» (м. Київ, ДЕГУТ, 24 – 25 березня 2011 р.); III МНПК «Проблеми розвитку транспортних систем і логістики» (м. Євпаторія 3 – 8 травня 2012 р.); VII МНПК «Проблеми економіки та управління на залізничному транспорті ЕКУЗТ 2012» (м. Судак, АР Крим, 11 – 13 жовтня 2012 р.); МНПК «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології» (м. Київ, ДЕГУТ, 2013 р.); X Ювілейної МНПК «Проблеми економіки та управління на залізничному транспорті (ЕКУЗТ, 30 червня – 1 липня 2015 р., м. Одеса); XI Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми економіки та управління на залізничному транспорті (ЕКУЗТ, 9 – 15 вересня 2016 р., м. Київ); науково-практичної конференції викладачів, аспірантів і магістрів Державного економіко-технологічного університету транспорту «Шляхи та напрями структурної реформи залізничного транспорту України» (м. Київ, ДЕГУТ, 23-24 лютого 2012 р.).

Дисертаційна робота доповідалась та пройшла повне обговорення, апробацію та була рекомендована до захисту на розширеному засіданні кафедр управління процесами перевезень, управління комерційною діяльністю залізниць, залізнична колія та колійне господарство, тяговий рухомий склад залізниць, вагони та вагонне господарство Державного університету інфраструктури та технологій.

**Публікації.** Відповідно до теми дисертації опубліковано 35 наукових публікацій, з них: 14 статей у фахових виданнях України, 10 статей у фахових наукових виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз (Scopus, IndexCopernicus, РИНЦ, OpenAIRE, WorldCat, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, ResearchBib, CiteFactor та інших) і одна стаття у закордонному (США) фаховому виданні; 7 тез доповідей та 3 додаткових наукових публікацій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг тексту дисертації – 385 сторінок; обсяг основного тексту складає 279 сторінок друкованого тексту (всі рисунки та таблиці на повну сторінку винесені у додатки), 95 рисунків, 16 таблиць; список використаних джерел (включає 289 найменувань) і 10 додатків.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

*У вступі* обґрунтовано актуальність теми, визначено об'єкт, предмет, проблематику, методи, наукову новизну, теоретичне і практичне значення дисертаційного дослідження.



У першому розділі представлено аналіз тенденцій розвитку транспортних систем та ринку надання транспортних послуг у світі, зроблено огляд та аналіз сучасного стану теорії транспортних процесів і систем, теорії та практики забезпечення технічної та технологічної надійності залізничних транспортних систем.

Теорія транспортних процесів і систем, її структура, понятійний та категорійний апарат, принципи і положення та загальні фундаментальні основи перетерпіли безліч перетворень та удосконалень з моменту свого виникнення. У більшості своїх робіт, що присвячені проблемам транспортних процесів та систем, дослідники Хейт Ф., Резер С. М., Грунтов П.С., Тихомирова І. Г., Васильєва Е. М., Петров М. Б., Пугачев І. Н., Стенбринк П., Трофимов С. В., Марінцева К.В., В. Й. Коган, О. В. Кирилова, Guckenheimer J. and Holmes, Nonlinear Oscillations P., Jordan D. W., Smith P. та інші оперують поняттям «транспортна система», вкладаючи свій, часто специфічний, зміст в цей термін. Однак більшість з науковців розглядають транспортні системи як набір інфраструктурних елементів, множини зв'язків, що формуються інформаційними та матеріальними потоками та набором функціональних ознак, включаючи загальну, системоутворюючу мету. Тому поняття «залізнична транспортна система» містить ознаки структурних (праці Хорафаса Д. Н., Грунтова П.С., Берталанфи Л. та ін.), функціональних (праці Анохіна П. К. та ін) та динамічних (праці Guckenheimer J., Jordan D. W., Малинецкого Г.Г. та ін.) систем. У даних дослідженнях під терміном «залізнична транспортна система» слід розуміти таке: *це складна і велика система, яка є сукупністю інфраструктурних, технологічних і організаційних елементів та множини зв'язків між ними, характеризується стохастичною природою динамічних процесів та множиною функцій, що регламентуються нормативними та правовими вимогами і обмежуються наявними ресурсами.*

Завдання забезпечення працездатності технічних засобів є базовими для всієї технічної науки. Проблема надійності технічних систем присвячена низка робіт науковців-класиків Гнеденка Б. В., Коваленка В. Г., Ушакова І. А., Вентцель Є. С. Проблема підвищення ефективності організації залізничних транспортних процесів та систем займалось багато вітчизняних та іноземних дослідників, таких як: Акулінічев В. М., Негрей В. Я., Архангельський Є. В., Бобровський В. І., Бутько Т. В., Грунтов П. С., Губенко В. К., Данько М. І., Жуковицький І. В., Козаченко Д. М., Козлов І. Т., Котенко А. М., Кочнев Ф. П., Лаврухін О.В., Левін Д.Ю., Ломотько Д.В., Макарович А.М., Максимович Б. М., Мироненко В. К., Мойсеєнко В.І., Нагорний Є. В., Негрей В. Я., Огар О. М., Повороженко В. В., Правдін М. В., Прохорченко А. В., Савченко І. Є., Самсонкін В. М., Скалозуб В. В., Сотніков І. Б., Тихомиров І. Г., Тішкін Є. М., Чернецька-Білецька Н. Б., Abril M., Haight F., Bell M. G. H., Batley R., Dargay J., Kerner Boris S, Landex A., Berg H.-P., Blokus-Roszkowska A., Breznická A., Chovanec A., Kołowrocki K., Kwiatkowska-Sarnecka B., Soszyńska J., Smolarek L., Schäbe H., Vromans M.J.C.M. та інші.

Більшість досліджень стосуються пошуку раціональних та ефективних моделей організації виробничого процесу на залізницях, однак визначають забезпечення безвідмовності на належному рівні як обов'язкову категорію експлуатаційного процесу залізниць, яка на практиці, у більшості випадків, визначається через: надійність експлуатації технічного устаткування та рухомого

складу ЗТС; пунктуальність та безперервність доставки у тому числі складними, комбінованими маршрутами; пунктуальність виконання графіків руху поїздів з імовірністю не менш 0,95; пошук раціональних моделей і алгоритмів, співвідношення технічних та технологічних параметрів за критерієм оптимального завантаження ЗТС (та їх підсистем) у діапазоні  $[0,5; 0,75]$ , де 0,5 – межа раціональності, 0,75 – межа безвідмовності (стаціонарності).

Окремо слід відмітити значний внесок у формування та розвиток теорії надійності технологічних процесів залізничних станцій та вузлів науковців Білоруської школи експлуатаційників під керівництвом Грунтова П.С. У своїх роботах вони зазначають, що експлуатаційна надійність залізничних станцій є комплексним поняттям, що містить як надійність технічних засобів – станційної інфраструктури і транспортних засобів (станційних колій, стрілочних переводів, засобів СЦБ та зв'язку, енергозабезпечення, локомотивів, вагонів тощо), так і організаційно-технологічну складову (ступінь заповнення графіка руху, виконання плану формування, наявність локомотивів та локомотивних бригад, внутрішньодобова нерівномірність поїздопотоків та ін.). Крім того, Грунтов П.С. розділяє відмови ЗТС на такі, що виникли через конструкційні недоліки технічних засобів – проектні недоліки – та такі, що виникають унаслідок помилок у організації технологічних процесів та експлуатації технічних пристроїв. Інші дослідники загострюють увагу на відмовах, що пов'язані із нерівномірністю добового поїздопотоків. Зокрема Архангельський Є.В. вказує на те, що рекомендації діючих будівельних норм із вибору кількості приймально-відправних колій у парках залізничних станцій передбачають вчасне приймання тільки 93% поїздів.

Однак, незважаючи на масштабність висвітлення проблеми у наукових працях, слід зазначити, що технологічна безвідмовність ЗТС, як безвідмовність технологічних процесів, майже не досліджувалась. Сучасна наука та практика не володіє ефективними моделями оцінки безвідмовного функціонування залізничних станцій, вузлів, напрямків та всієї мережі в цілому. Тому подальший розвиток теорії та практики забезпечення технологічної безвідмовності ЗТС є важливою науково-прикладною проблемою, яка може бути вирішена шляхом дослідження існуючої системи забезпечення надійності техніки і адаптування її до технологічних особливостей залізничного транспорту із розробкою критеріїв, моделей та методів оцінювання її показників.

*У другому розділі* обґрунтовано критерії ефективності та раціональності організації залізничних транспортних процесів та систем. Крім загальноприйнятих критеріїв оцінки ефективності організації залізничних транспортних процесів та систем – мінімальних техніко-експлуатаційних витрат та строків окупності капіталовкладень, швидкості та точності доставки вантажів – залізничні транспортні системи, з точки зору ефективності їх організації та експлуатації, доцільно оцінювати категоріями надійності (технологічної безвідмовності) та потенційними операційними втратами всіх учасників перевізного процесу – оператора інфраструктури, перевізників та вантажовласників – від настання технологічної відмови залізничних транспортних системи різного рівня.

Для більшої конкретизації понять «технологічна надійність залізничної транспортної системи», «технологічна відмова залізничної транспортної системи» та «час безвідмовного функціонування залізничної транспортної системи» було проведено дослідження існуючого стану забезпечення надійності техніки на залізницях України та світу. Встановлено, що приблизно у 80% у внутрішньому сполученні залізниць України вантажі прибувають до станції призначення раніше строку. Точність доставки прямо пропорційно залежить від кількості порушень, що пов'язані із вчасним прийманням та відправленням поїздів по залізничних станціях, дільницях, вузлах та інших елементах ЗТС. При структурному аналізі причин відмови у вчасному прийманні поїздів за 2014 – 2016 рр. встановлено, що значна частина відмови (60 – 70%) виникає через технологічні та операційні причини (рис. 1).

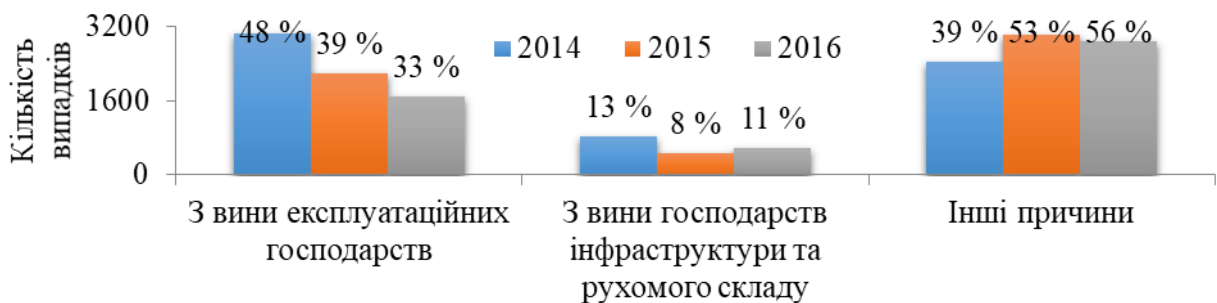


Рисунок 1 – Розподіл випадків затримок поїздів перед вхідними світлофорами за 2014 – 2016 рр.

Крім вчасного приймання поїздів залізничні станції та інші залізничні транспортні системи повинні забезпечувати (у встановлених межах) вчасне підготування поїздів до відправлення, і забезпечувати вчасне їх відправлення. За офіційними даними 2015 – 2016 рр. для всіх без винятку сортувальних станцій, що задіяні в суто технічній експлуатації (тобто без врахування митних та інших додаткових операцій) перевищення типових норм становить від 1,5 до 7 разів, а фактичне виконання показника (простий транзитного без переробки) перевищує норми технологічних процесів відповідних станцій в середньому на 34 % по мережі.

Дослідженнями існуючої системи забезпечення надійності технічних засобів та систем технологій в Україні встановлено, що найбільше значення для формалізації та дослідження технологічної надійності залізничних транспортних систем мають: ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення; ДСТУ 2740-94 Надійність техніки. Системи технологій. Терміни та визначення.

Державний стандарт (ДСТУ 2860-94) визначає терміни, критерії, показники та визначення, які можуть цілком використовуватись при оцінці надійності технологічних процесів ЗТС: об'єкт, функція об'єкта, надійність, безвідмовність, відмова (з різновидами), імовірність відмови, середній час безвідмовної роботи. Однак більшість термінів та визначень в зазначеному стандарті стосуються суто технічних систем та вузлів, і не мають на сьогодні практичного застосування при оцінці надійності технологічних процесів залізничних станцій та вузлів: довговічність, ремонтпридатність, справність

та несправність, несправність через неміцність, несправність через зношування та (чи) старіння, дефект, ресурс та інші.

ДСТУ 2740-94 (Надійність техніки. Системи технологій. Терміни та визначення) є, за змістом, ближчим до експлуатаційного процесу залізничного транспорту. Цей норматив визначає основні терміни та положення надійності функціонування технологічних систем. Але технологічний процес у даному ДСТУ розглядається як процес виготовлення виробів, напівфабрикатів та іншої продукції, а значна частина всієї термінології стосується технологічних систем обробки та виготовлення матеріальної продукції.

Якщо розглядати залізницю як виробництво транспортної продукції, одиницями виміру якої є тонно- та пасажиро-кілометри, то можна застосовувати такі визначення та нормативи: технологічна система, виконавець у технологічній системі, підсистема, елемент технологічної системи, працездатний стан технологічної системи, непрацездатний стан технологічної системи, відмова технологічної системи (рис. 2).

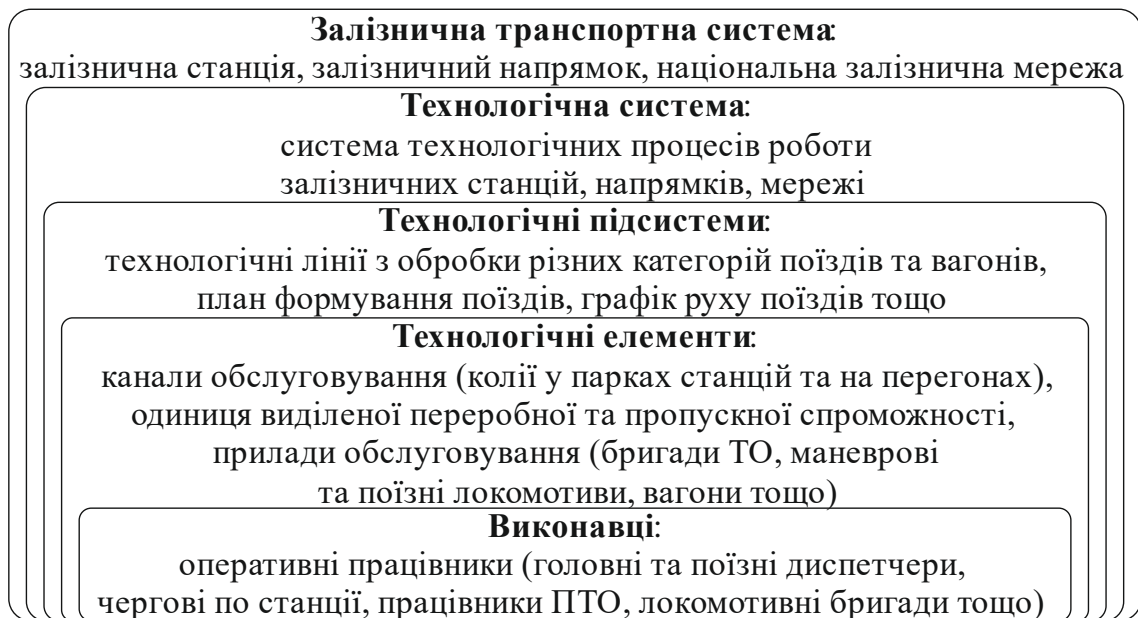


Рисунок 2 – Ієрархічна структура системи забезпечення надійності ЗТС

Враховуючи положення існуючих ДСТУ та результати проведеного аналізу, під терміном *технологічна надійність залізничних транспортних систем* слід розуміти: *це властивість технологічних процесів ЗТС різного рівня забезпечувати вчасне (або із запізненням на час, не більше встановленого) приймання, відправлення, пропуск поїздів та переробку вагонопотоків.*

Під терміном *технологічна відмова залізничної транспортної системи* слід розуміти таке: *подія, яка полягає у втраті ЗТС здатності вчасно (або із запізненням на час, не більше встановленого) приймати, відправляти, пропускати поїзди та переробляти вагонопотоки.* Практичною реалізацією даної категорії буде показник *імовірність технологічної відмови*

$$\xi = p(t_{b_i} \geq t_{n_i}), \quad (1)$$

де  $t_{b_i}$  – затримка поїзда по прибутті чи відправленні або тривалість  $i$ -ї операції обробки вагона;  $t_{n_i}$  – нормативне значення величини  $t_{b_i}$ .

Під часом безвідмовного функціонування залізничної транспортної системи треба розуміти: середній час функціонування ЗТС, протягом якого відсутні відповідні технологічні відмови.

Оскільки залізничні станції (зокрема технічні), напрямки та вся залізнична мережа – це складні та великі ЗТС, надійність їх функціонування залежить від багатьох факторів, які умовно можна поділити на такі групи:

1. Технічні фактори: технічний стан елементів інфраструктури та рухомого складу, відповідність їх технічних характеристик нормативам; наявність конструктивних недоліків та помилок; ремонтпридатність технічних пристроїв та рухомого складу.

2. Технологічні фактори: потужність вхідного поїздо- та вагонопотоку, ритмічність (відповідність інтенсивності надходження вхідного поїздопотоку інтенсивності його обслуговування в СМО ЗТС); величина нерівномірності інтервалу прибуття та відправлення поїздів, тривалості виконання технологічних операцій.

3. Фактори, що виникають унаслідок діяльності людей (персоналу, користувачів послугами залізничного транспорту). Дана група факторів має найбільший вплив на надійність функціонування ЗТС, оскільки у різних формах присутня у всіх факторах попередніх груп, адже їх формування у більшості залежить від ефективності (раціональності) прийняття рішень. Зазначена теза стосується як конструкторських розробок або затвердження нормативів, так й ефективності планування і управління в оперативному режимі.

Таким чином, загальна імовірність відмови ЗТС є сукупністю складових відмови технічних засобів, відмови технологічного процесу та відмови через людський фактор

$$\xi_{\text{ЗТС}} = \left\{ \xi_{\text{пс.}} \cdot \xi_{\text{фіз.}} \cdot \xi_{\text{кв.}} \right\}_{\text{л}} \cdot \left\{ \xi_{\text{констр.рiш}} \cdot \xi_{\text{експл.}} \right\}_{\text{тл.}} \cdot \left\{ \xi_{\text{норм.}} \cdot \xi_{\text{експл.}} \right\}_{\text{тхн.}}, \quad (2)$$

де  $\left\{ \xi_{\text{пс.}} \cdot \xi_{\text{фіз.}} \cdot \xi_{\text{кв.}} \right\}_{\text{л}}$  – імовірність відмови через поведінку виконавців (персоналу) як добуток в частині психологічного, фізіологічного стану та рівня їх кваліфікації;  $\left\{ \xi_{\text{констр.рiш}} \cdot \xi_{\text{експл.}} \right\}_{\text{тл.}}$  – імовірність технологічної відмови як добуток імовірностей відмов в частині типових (нормативних) рішень та їх практичної реалізації у конкретній ЗТС;  $\left\{ \xi_{\text{норм.}} \cdot \xi_{\text{експл.}} \right\}_{\text{тхн.}}$  – імовірність відмови технічних пристроїв як добуток імовірностей відмов в частині конструкторських рішень та практичної експлуатації конкретного технічного пристрою.

У свою чергу весь технологічний процес та організацію експлуатаційної роботи на залізничному транспорті прийнято розглядати на трьох рівнях: залізнична станція, залізничний напрямок (або полігон залізниць) та залізнична мережа. Тому безвідмовність функціонування ЗТС також слід розглядати на трьох рівнях: мікро рівень – залізнична станція; medium рівень – дільниця, залізничний напрямок; macro рівень – залізнична мережа. Надалі при дослідженнях технологічної безвідмовності під ЗТС кожного рівня буде розумітись таке:

1. Мікро рівень – залізнична станція: станційна інфраструктура, технологічний процес станцій (без врахування під'їзних колій, вантажних

фронтів, інфраструктури та процесів локомотивних, вагонних та інших господарств). Розглядається як підсистема залізничного напрямку.

2. Medium рівень – дільниця, залізничний напрямок – суміжні ЗТС мікро рівня, що з'єднані між собою залізничними дільницями. Розглядається як підсистема Національної мережі залізниць.

3. Macro рівень – всі ЗТС мікро та medium рівнів мережі залізниць України. Розглядається як підсистема Світової мережі залізниць.

Умовно для більшості випадків (особливо в межах мікро та medium рівнів) всі відмови будуть поділятися на ті, що оцінюють вчасний початок обслуговування (вчасне надходження заявки у канал обслуговування та вчасний початок обробки заявки у каналі обслуговування), та ті, що будуть оцінювати вчасне закінчення обслуговування (вчасне закінчення обслуговування заявки та вчасний вихід заявки з каналу обслуговування). Для мережі залізниць України головним критерієм надійності, як критерієм виконання функції ЗТС, може виступати рівень забезпечення умов щодо організації перевезень, зокрема транзитних.

Зазначені множини показників також слід розглядати в двох аспектах:

1) максимально граничний рівень безвідмовності, що може бути забезпечений відповідними технічними параметрами, місцевими умовами та способом організації транспортного виробництва – *наявна* технологічна безвідмовність. Дану категорію можна розуміти як конструктивну, або проектну безвідмовність і вона визначається індивідуально для кожної ЗТС;

2) граничний рівень безвідмовності, який потрібно (планується) забезпечити відповідно до планових обсягів перевізної роботи, її характеру – *потрібна* (планова) технологічна надійність – це певний норматив, встановлена (призначена) межа. Відповідно до ДСТУ «Надійність техніки», пункту 7.4 такою межею рекомендується прийняти значення з ряду «довірчої вірогідності» {0,90; 0,95; 0,98; 0,99}, тобто потрібна гранична відмова становитиме відповідно 0,10; 0,05; 0,02; 0,01.

**У третьому розділі** проведено дослідження ефективності організації на макро рівні (Національна залізнична мережа). Технологічна безвідмовність всієї Національної мережі залізниць є складним, комплексним поняттям, а тому не може оцінюватись суто технологічними (внутрішніми) параметрами, залежить також від зовнішніх геополітичних та економічних чинників, наявного попиту (в пунктах зародження) і пропозиції (в пунктах споживання) потенційних транзитних вантажопотоків.

Для встановлення закономірностей переходу до безвідмовного стану ЗТС макро рівня формалізовано процес формування транзитних вантажопотоків. У результаті розроблена економіко-математична модель, що базується на таких припущеннях:

1. Максимальний обсяг транзиту обмежується наявною пропускною спроможністю залізничного напрямку маршруту транзиту.

2. Величина попиту на товар (вантаж), що перевозиться транзитом, прямо пропорційно залежатиме від рівня комерційної вигоди, тобто різниці між вартістю товару у пункті постачання та вартістю у пункті призначення цін на цей товар, і обернено – від величини транспортного тарифу та інших

сукупних витрат, безпосередньо пов'язаних з організацією транзитних відправок, а також тривалістю транспортування.

3. Повне використання наявної пропускної (провізної) спроможності маршруту неможливе, оскільки необхідні технологічні резерви. Потік буде тим більшим, чим буде більший попит на товар (вантаж) і менші відхилення від встановленої тривалості транзиту.

Після доведення до рівня практичної реалізації, отримано такий вигляд моделі

$$Q = N_{\text{при}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{(M_k - W) N_{\text{при}}^2 F_c}{(M_k - F_c)(R - N_{\text{при}})^2 \cdot W}} \right) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{1 - \Delta T_i}{1 + \Delta T_i} \frac{F_c}{W} \frac{1}{\Psi_i}} \right), \quad (3)$$

де  $N_{\text{при}}$  – виділена наявна провізна спроможність на розрахунковій ділянці маршруту для поїздів  $i$ -ї категорії. Визначається через виділену наявну пропускну спроможність ( $\overline{N}_{ni}$ ) та середню масу (нетто) вантажного поїзда ( $q_{\text{max}i}$ )

$$N_{\text{при}} = \overline{N}_{ni} \cdot q_{\text{max}i}, \quad (4)$$

де  $M_k$  – комерційна вигода від реалізації товару у пункті призначення вантажу, наприклад, дол. США/т (або інші грошові одиниці);  $F_c$  – величина транспортного тарифу та інші сукупні витрати, що пов'язані з транспортуванням відповідного товару у межах всього маршруту транзиту (крім непередбачуваних витрат, наприклад, «фактор  $X$ »), грошових одиниць;  $W$  – сукупні витрати, що пов'язані із організацією транзитних відправок, дол. США/т. Визначається як:  $W = F_c + X$ , де  $X$  – непередбачувані витрати;  $R$  – попит на перевезення;  $\Psi_i$  – фактор балансу попиту і пропозиції транспортних послуг

$$\Psi = \frac{1}{2} \left( \frac{\overline{S}q}{R} + \frac{R}{\overline{S}q} \right), \quad (5)$$

де  $\Delta T_i$  – розрахункова нормативна імовірність відхилення від графіка

$$\Delta T_i = \left( \frac{1+i}{P+i} \right)^{P-i}, \quad (6)$$

де  $P$  – кількість основних категорій поїздів при формуванні ГРП 10.

Модель реалізовано на прикладі транзитного маршруту актуальних для України вантажопотоків в універсальних контейнерах, що прямують з Китаю в межах Нового Шовкового шляху, відповідно до реальних (2015 – 2016 рр.) та прогнозних даних: вантажі у контейнерах; маршрут Одеса-Порт– Жмеринка – Львів – Мостиська-2 (довжина маршруту 825 км; варіанти організації вагонопотоків із транзитним вантажем у контейнерах: наскрізними та дільничними поїздами), (рис. 3, 4).



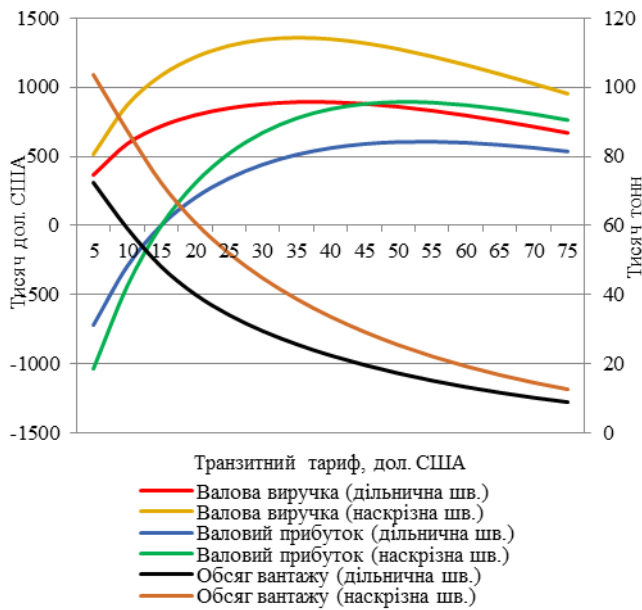


Рисунок 3 – Моделювання добових обсягів вантажопотоку у контейнерах, валової виручки та прибутку при існуючому попиті

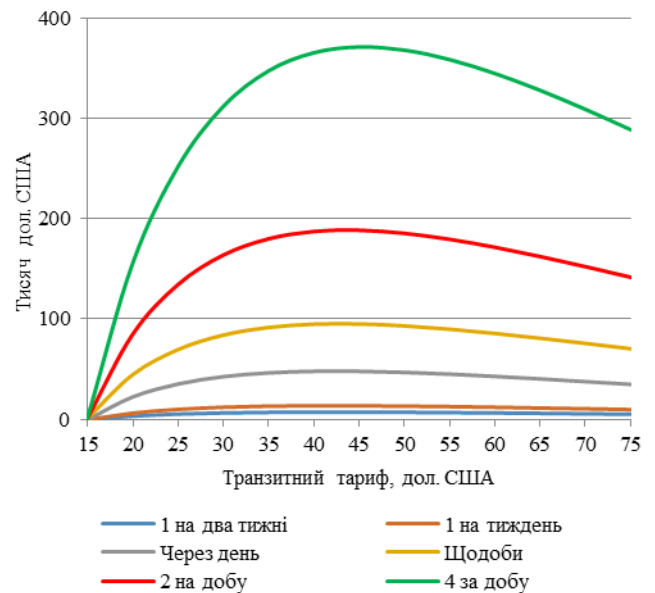


Рисунок 4 – Залежність валового прибутку від транзитного тарифу транспортування вантажів у контейнерах та фактичного потоку контейнерів (контейнерних маршрутів за розрахунковий період)

Оптимальним тарифом, при якому формуватиметься максимальна валова виручка буде 35,6, а валовий прибуток 51,3 дол. США за тонну. Незалежно від прогнозованого попиту на перевезення, максимальний прибуток буде формуватися при рівні тарифу в межах 40 – 45, а не при існуючому у 28 дол. США за тонну. Найбільший вплив на працездатність ЗТС тасго рівня та повноту реалізації транспортного потенціалу України здійснюється такими факторами: комерційна вигода, співвідношення сукупних витрат на перевезення внутрішніми і зовнішніми (конкуруючими) маршрутами та час транспортування.

Ключовим питанням доступу приватних операторів вагонного парку та вантажовласників до залізничної інфраструктури загального користування залишається формування «справедливих» тарифів, оскільки у зазначеній взаємодії гравців транспортного ринку існує конфлікт інтересів. Враховуючи специфічність рейкового (зокрема залізничного) транспорту, найефективнішою моделлю доступу до залізничної інфраструктури є олігополія, яка передбачає контрольовану конкуренцію: кожний оператор (державний або приватний) має вільний доступ до виділеної пропускної спроможності, однак тільки при відповідності встановленим (науково обґрунтованим та чітко регламентованим) вимогам.

За умови рівноправності доступ до інфраструктури залізничного транспорту формується як «принцип рівності співвідношень вигод і витрат». Мета кожного з учасників перевезення: для оператора перевезення:  $F \geq S + c_T$ ; для оператора інфраструктури:  $S \geq c_S$ ; для вантажовласника:  $P \geq F + A$ , де  $F$  – тариф (під яким розумітимемо перевізну плату, інші збори та платежі, необхідні для здійснення перевезення);  $S$  – плата за доступ до інфраструктури;  $c_T$  – собівартість здійснення перевезення залізницею;  $c_S$  – питомі витрати на утримання інфраструктури;  $P$  – комерційна вигода для вантажовласника від



здійснення перевезення;  $A$  – сумарні (транспортні та нетранспортні) витрати організації перевезення.

Серед всієї множини випадків співставлення інтересів учасників транспортного ринку (вантажовласників, операторів транспортного ринку та оператора інфраструктури) існує – «сідлова точка» – збіг інтересів одразу всіх учасників ринку, що дає можливість визначити «справедливу ціну» доступу до інфраструктури ( $S$ ) як функцію від зазначених вище параметрів (рис. 5)

$$\begin{cases} P(c_T + S) = F(F + A); \\ P \cdot c_S = S(F + A); \\ F \cdot c_S = S(c_T + S). \end{cases} \quad (7)$$

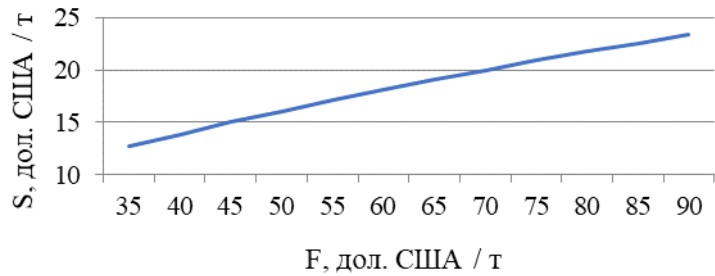
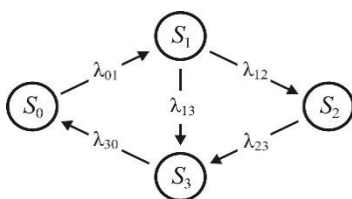


Рисунок 5 – Графік залежності  $S$  (ціни нитки графіка) від  $F$ ,  $c_T = 15$  дол. США та  $c_S = 10$  дол. США

У четвертому розділі проведено дослідження технологічної безвідмовності на прикладі ЗТС medium рівня (залізничні напрямки). Відмовостійкість функціонування полігонів залізниць може порушуватися впливом різних факторів та подій, що їх спричинили, серед яких слід виділити як найбільш непередбачувані та тяжкі за своїми наслідками аварії та катастрофи, а також катаклізми природнього та антропогенного характеру. Якщо ЗТС (чи її окремі елементи) здатні відновитися у визначений час після таких непередбачуваних подій з тяжкими наслідками, що ліквідуються у екстремальних умовах, то така система буде здатна до ще швидшого відновлення у будь-яких інших умовах.

Критичними для надійного функціонування залізничних напрямків є надзвичайні ситуації із вибухонебезпечними, легкозаймистими та хімічними вантажами, оскільки такі події здатні вивести залізничну інфраструктуру з працездатного стану на тривалий час, і тому є визначальними при дослідженні безвідмовності ЗТС medium рівня.

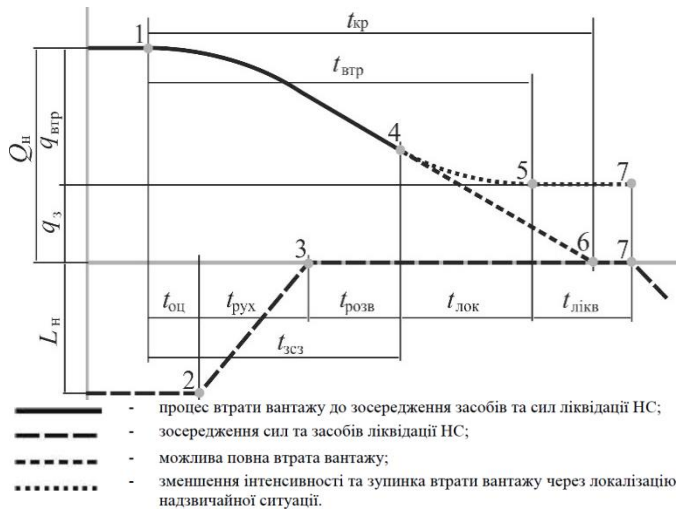
Функціонування ЗТС на рівні залізничних напрямків формалізовано як циклічний перехід між працездатним станом – звичайним (безпечним) функціонуванням, та непрацездатним станом – дією небезпечних факторів при виникненні НС, локалізацією та ліквідацією наслідків НС (рис. 6):



Примітка 1:  $S_0$  – стан звичайного, безпечного функціонування ЗТС (safe system);  $S_1$  – стан ЗТС, при якому діють небезпечні фактори НС, що починаються після виникнення НС і закінчуються, коли зникають небезпечні фактори;  $S_2$  – стан локалізації НС;  $S_3$  – стан ліквідації наслідків НС.  $S_0$  – працездатний стан ЗТС;  $S_1, S_2, S_3$  – непрацездатний стан ЗТС.

Рисунок 6 – Граф станів ЗТС medium рівня із можливим переходом від працездатного до непрацездатного та відновлювальних станів

Для розуміння загального процесу виявлення, вивчення, локалізації та ліквідації наслідків НС розроблено графічну модель розвитку надзвичайної події, та процес ліквідації її наслідків і відновлення руху поїздів (рис. 7).



Примітка 1: *момент часу 1* – виникнення НС, оповіщення відповідних служб про НС; *момент часу 2* – початок дій щодо зосередження сил спеціального реагування на НС; *момент часу 3* – закінчення зосередження сил спеціального реагування на НС; *момент часу 4* – початок локалізації НС; *момент часу 5* – завершення локалізації та початок ліквідації наслідків НС; *момент часу 6* – момент повної втрати вантажу внаслідок відсутності необхідних локалізаційних заходів; *момент часу 7* – завершення ліквідації наслідків НС, початок розосередження сил та засобів спеціального реагування.

Рисунок 7 – Графічна модель розвитку надзвичайної події та процес ліквідації її наслідків і відновлення руху поїздів

Примітка 2:  $t_{кр}$  – час повної втрати вантажу внаслідок НС, критичний час;  $t_{втр}$  – період втрати вантажу під дією небезпечних факторів надзвичайної ситуації НС;  $t_{лок}$  – тривалість локалізації надзвичайної ситуації;  $t_{лікв}$  – тривалість ліквідації наслідків надзвичайної ситуації;  $t_{зсз}$  – тривалість зосередження сил і засобів ліквідації та відновлення;  $t_{оц}$  – тривалість оцінки ситуації;  $t_{розв}$  – час на розвідувальні дії та оцінку ситуації;  $t_{рух}$  – час руху до місця ліквідації.

Тривалість знаходження ЗТС у стані  $S_1$  складається із часу тривалості зосередження сил і засобів ліквідації та відновлення ( $t_{зсз}$ )

$$t_1 = t_{зсз} = t_{оц} + \frac{L_H}{V_H} + t_{розв}, \quad (8)$$

де  $L_H$  – відстань від місця дислокації пожежних та відбудовних підрозділів;  $V_H$  – маршрутна швидкість зосередження спеціальних сил та засобів на місці виникнення НС.

Тривалість знаходження ЗТС у стані  $S_2$  складається із часу тривалості локалізації надзвичайної ситуації ( $t_{лок}$ )

$$t_2 = t_{лок} = t_{лок} + t_{рят.} \quad (9)$$

Система рівнянь фінальних ймовірностей станів ЗТС, складених відповідно до рівнянь балансу інтенсивностей вхідних та вихідних потоків матиме вигляд

$$\begin{cases} \lambda_{01}p_0 = \lambda_{30}p_3, \\ (\lambda_{12} + \lambda_{13})p_1 = \lambda_{01}p_0, \\ \lambda_{23}p_2 = \lambda_{12}p_1, \\ \lambda_{30}p_3 = \lambda_{13}p_1 + \lambda_{23}p_2, \\ p_0 + p_1 + p_2 + p_3 = 1, \end{cases} \quad (10)$$

де  $p_0, p_1, p_2, p_3$  – граничні імовірності станів ЗТС medium рівня;  $\lambda_{ij}$  – інтенсивність переходу ЗТС із стану  $i$  до стану  $j$ , відповідно до рис. 8.

Звідки:

$$p_0 \left( 1 + \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{12} + \lambda_{13}} + \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{24}} \cdot \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{12} + \lambda_{13}} + \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{30}} \right) = 1, \quad (11)$$

$$p_0 = p_{\text{безвідм}} = \frac{t_{\text{безвідм}}}{t_{\text{безвідм}} + \frac{t_{\text{кр}} + t_{\text{зсз}}}{t_{\text{кр}} + 2t_{\text{зсз}}} (t_{\text{зсз}} + t_{\text{лок}}) + t_{\text{лікв}}}. \quad (12)$$

У кінцевому вигляді, через представлення параметрів моделі техніко-експлуатаційними показниками ЗТС отримано модель імовірності безвідмовного стану ЗТС medium рівня

$$p_{\text{безвідм}} = \frac{1876,4 \cdot \text{EXP}\{-0.1201G_{\text{в.напр}}\} - (t_{\text{зсз}} + t_{\text{лок}} + t_{\text{лікв}})}{(1876,4 \cdot \text{EXP}\{-0.1201G_{\text{в.напр}}\} - (t_{\text{зсз}} + t_{\text{лок}} + t_{\text{лікв}})) + \frac{t_{\text{кр}} + t_{\text{зсз}}}{t_{\text{кр}} + 2t_{\text{зсз}}} (t_{\text{зсз}} + t_{\text{лок}}) + t_{\text{лікв}}}. \quad (13)$$

При реалізації моделі за даними 2015 – 2016 рр. (рис. 8) встановлено, що найбільший вплив на час перебування ЗТС у непрацездатному (як й у працездатному) стані здійснює тривалість «критичного часу» ( $t_{\text{кр}}$ ) та тривалості оцінювання ситуації – розвідки та прийняття рішень з порядку проведення локалізаційних та ліквідаційних робіт ( $t_{\text{оц}}$  та  $t_{\text{розв}}$ ). Якщо критичний час залежить від фізико-хімічних властивостей вантажів, вплинути на які майже неможливо, час розвідки та швидкість прийняття рішень є змінними параметрами функціонування ЗТС.

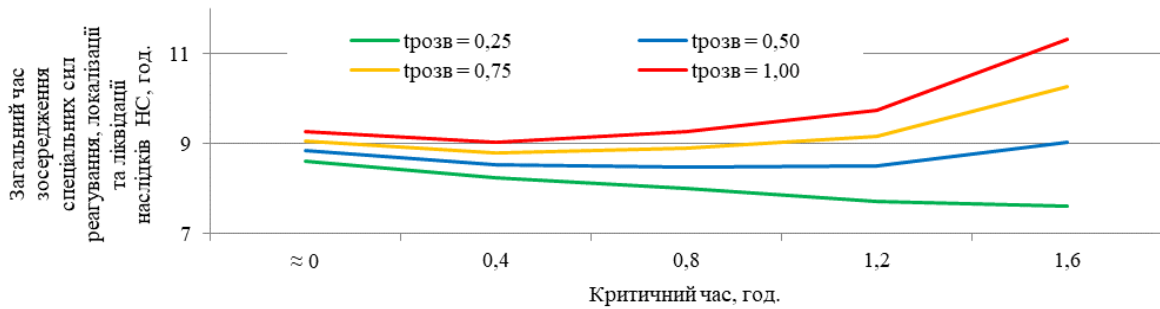


Рисунок 8 – Залежність часу зосередження, локалізації та ліквідації наслідків НС від «критичного часу» та тривалості оцінювання ситуації

Процес локалізації та ліквідації наслідків НС подано як систему масового обслуговування із параметрами  $M/E_2/2/3$ . Граф станів даної СМО (рис. 9):

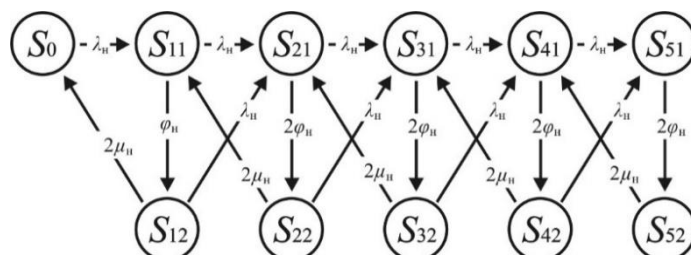


Рисунок 9 – Граф станів двоканальної із трьома місцями у черзі СМО

Система рівнянь станів та імовірність станів інтегрального потоку Ерланга у відповідній СМО має вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
 &P_{12}\mu_H = P_0\lambda_H, \\
 &P_0\lambda_H + P_{22}2\mu_H = P_{11}\lambda_H + P_{11}\varphi_H, \\
 &P_{12}\lambda_H + P_{12}\mu_H = P_{11}\varphi_H, \\
 &P_{11}\lambda_H + 2P_{32}\mu_H + P_{12}\lambda_H = P_{21}\lambda_H + 2P_{21}\varphi_H, \\
 &P_{21}\varphi_H = P_{22}\lambda_H + 2P_{22}\varphi_H, \\
 &P_{31}\lambda_H + 2P_{31}\varphi_H = P_{21}\lambda_H + 2P_{42}\mu_H + P_{22}\lambda_H, \\
 &P_{32}\lambda_H + 2P_{32}\varphi_H = 2P_{31}\varphi_H, \\
 &P_{31}\lambda_H + 2P_{52}\mu_H + P_{32}\lambda_H = P_{41}\lambda_H + 2P_{41}\varphi_H, \\
 &P_{42}\lambda_H + 2P_{42}\varphi_H = 2P_{41}\varphi_H, \\
 &P_{41}\lambda_H + P_{42}\lambda_H = 2P_{51}\varphi_H, \\
 &2P_{52}\mu_H = 2P_{51}\varphi_H, \\
 &P_0 + P_{11} + P_{12} + P_{21} + P_{22} + P_{31} + P_{32} + P_{41} + P_{42} + P_{51} + P_{52} = 1;
 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned}
 &P_{Er.1} = P_{11} + P_{12}, \\
 &P_{Er.2} = P_{21} + P_{22}, \\
 &P_{Er.3} = P_{31} + P_{32}, \\
 &P_{Er.4} = P_{41} + P_{42}, \\
 &P_{Er.5} = P_{51} + P_{52}.
 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Імовірність того, що заявка буде вчасно опрацьована (будуть вчасно локалізовані та ліквідовані наслідки НС)

$$P_{\text{лок.-лікв.}} = 1 - P_{\text{відм.}} = 1 - \left( P_{Er.5} - \frac{P_{12} + P_{22} + P_{32} + P_{42}}{2} \right). \quad (16)$$

Середній час знаходження заявки у системі

$$t_s = \frac{1}{2\lambda_H} (1 \cdot P_{Er.1} + 2 \cdot P_{Er.2} + 3 \cdot P_{Er.3} + 4 \cdot P_{Er.4} + 5 \cdot P_{Er.5}). \quad (17)$$

При зростанні продуктивності ( $\mu_H$ ) сил спеціального реагування збільшення імовірності  $P_{\text{лок.-лікв.}}$  спостерігається тільки у випадках зростання інтенсивності зосередження ( $\varphi_H$ ). Якщо при значенні  $\mu_H = 0,1\lambda_H$  при всіх розрахункових значеннях  $\varphi_H \in [0,1\lambda_H; 1,1\lambda_H]$  імовірність успішної локалізації є низькою – знаходиться у діапазоні множини  $P_{\text{лок.-лікв.}} \in [0,101; 0,23]$  – то при збільшенні інтенсивності  $\mu_H$  до  $1,1\lambda_H$  діапазон значень імовірності  $P_{\text{лок.-лікв.}}$  збільшується до  $P_{\text{лок.-лікв.}} \in [0,179; 0,949]$ . Тобто, при низьких розрахункових значеннях  $\varphi_H$  незалежно від розрахункових  $\mu_H$  імовірність успішної локалізації та ліквідації наслідків знаходиться у діапазоні тільки  $P_{\text{лок.-лікв.}} \in [0,101; 0,949]$ , що є незадовільним при НС (рис. 10).

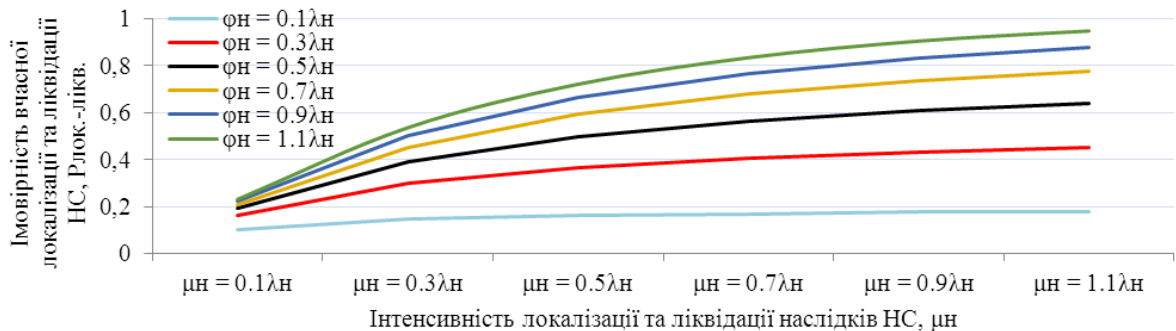


Рисунок 10 – Графіки залежності  $P_{\text{лок.-лікв.}} = f(\mu_H, \varphi_H)$

За логікою проведення локалізаційних та ліквідаційних робіт впливає, що при низькій швидкості зосередження сил спеціального реагування на місці

НС необхідним є збільшення їх продуктивності. Однак продуктивність кожної з одиниць техніки (пожежний поїзд, відбудовний поїзд тощо) обмежується його технологічними та технічними можливостями. Тому підвищення загальної продуктивності локалізаційних робіт на практиці здійснюється за рахунок збільшення кількості одиниць локалізаційної техніки.

Розглянуто ситуацію, коли на місці НС зосереджують дві локалізаційно-ліквідаційні одиниці, кожна з яких представляє СМО. Сам процес відповідатиме концентрації двох пар пожежних та відбудовних поїздів, наприклад, на двоколіїному перегоні, або проміжній чи іншій станції. Структурна схема взаємодії СМО1 та СМО2 подана на рис. 11.

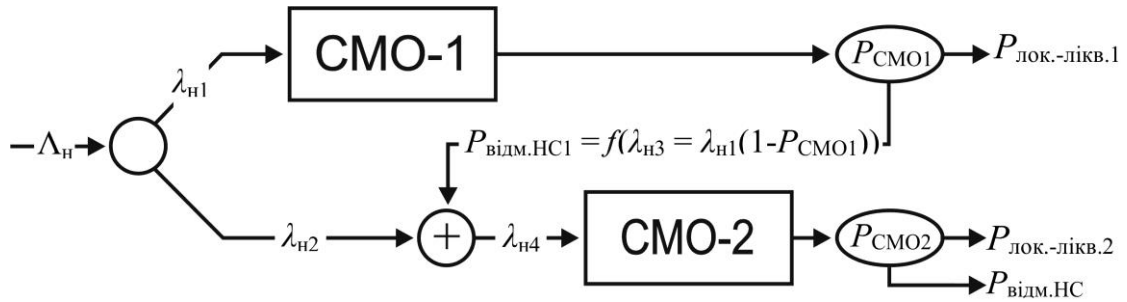


Рисунок 11 – Схема взаємодії двох СМО при послідовному об'єднанні компонент

Для прикладу кожна СМО матиме такі компоненти системи масового обслуговування: M/E2/1/3 (рис. 12) та систему рівнянь станів імовірності

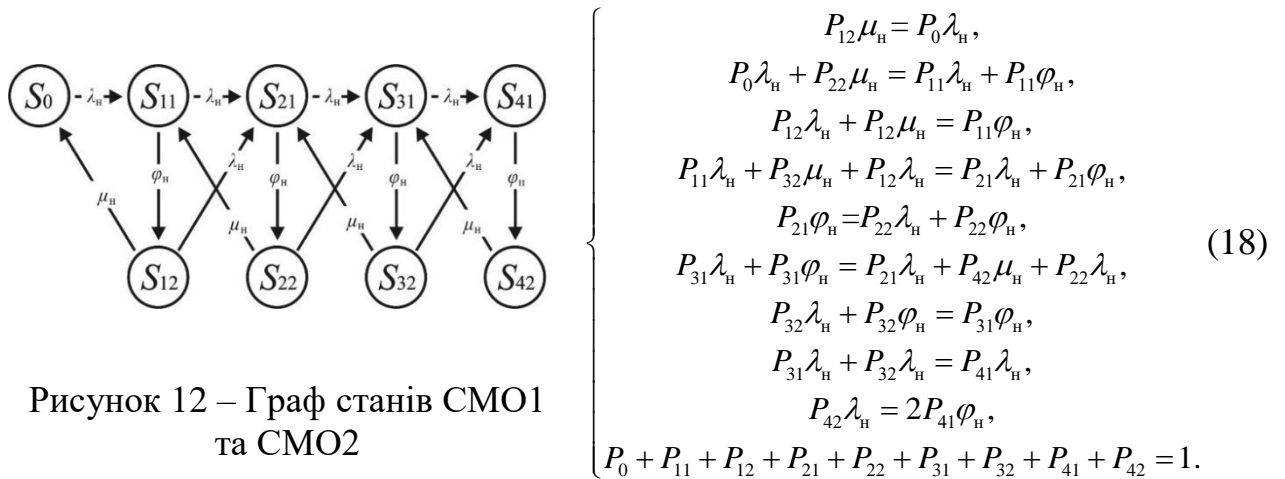


Рисунок 12 – Граф станів СМО1 та СМО2

У результаті отримані залежності формування імовірності вчасної локалізації та ліквідації наслідків НС двокомпонентної СМО,  $P_{лок.-лікв.}$  (рис. 13), по яких спостерігається ще більша залежність ефективності проведення локалізаційних та ліквідаційних робіт від швидкості реагування. Так, при низьких темпах зосередження спеціальних сил реагування ( $\varphi_n = 0,1$ ) успішність локалізаційних робіт буде майже однаково низькою ( $P_{лок.-лікв.} \in [0,127; 0,136]$ ) незалежно від продуктивності устаткування ( $\mu_n \in [0,7; 1,4]$ ).

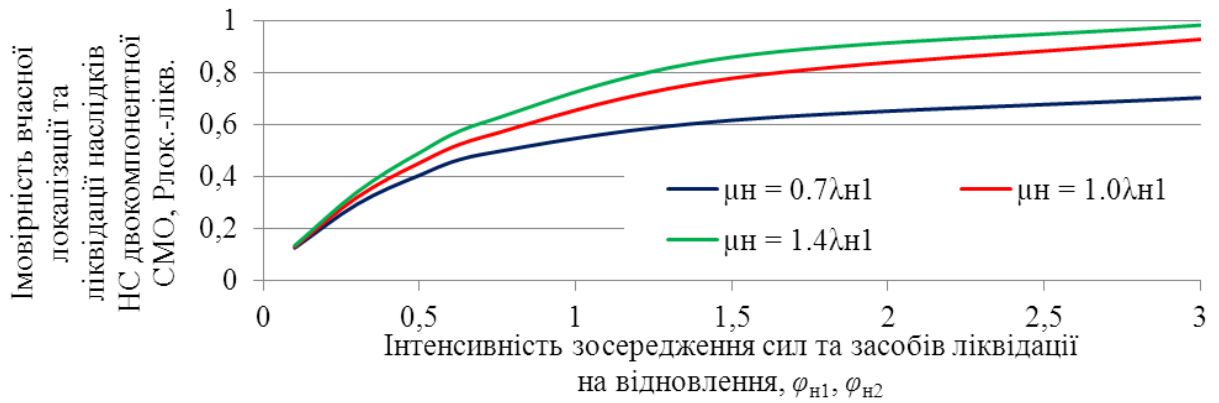


Рисунок 13 – Графіки залежності  $P_{\text{лок.-лікв.}} = f(\mu_n, \varphi_n)$  двокомпонентної СМО

**У н'ятому розділі** проведено дослідження технологічної відмовостійкості та безвідмовності ЗТС – залізнична станція (місто рівень). Враховуючи комплексність та складність завдання, глибину деталізації технологічних процесу, що буде досліджено, одним з небагатьох доступних наукових інструментів для проведення досліджень є експериментальні заміри результатів імітаційного моделювання. Для цього було розроблено комплекс імітаційних моделей функціонування технологічних ліній технічних станцій.

Процес функціонування технологічної лінії з обробки поїздів в межах залізничних станцій можна подати як дискретно-подієвий процес. Кожна заявка, що обслуговується у системі, дискретно перебуває на обслуговуванні у тому чи іншому технологічному елементі. Перехід через етапи обробки являє собою умовну межу, і не має власної тривалості.

Як приклад розглянуто процес обслуговування наскрізних поїздів (зі зміною локомотивів) на коліях приймально-відправних парків як взаємодію трьох СМО. Перша СМО: дільниця прибуття – приймально-відправний парк; одноканальна СМО (за умови послідовного приймання поїздів на колії парку). Друга СМО: складна  $N$ -канальна із  $M$  фазами обслуговування. Кожна колія транзитного парку – це канал обслуговування, тому кількість каналів обслуговування дорівнюватиме кількості приймально-відправних колій парку. На кожній приймально-відправній колії з поїздом відбувається набір технологічних операцій, які виконуються як паралельно, так і послідовно одна до одної. Всі операції умовно можна згрупувати на два послідовних процеси: 1) технічний (із безвідчипним ремонтом) та комерційний огляд вагонів, що виконуються паралельно один до одного. Причому, технічний огляд, як правило, за тривалістю є більшим та перекриває собою комерційний; 2) причеплення поїзного локомотива, опробування автогальм та інші заключні операції з відправлення. Третя СМО: приймально-відправний парк – дільниця відправлення; одноканальна СМО (за умови послідовного відправлення поїздів на дільниці примикання).

Інструментом розробки імітаційної моделі обрано об'єктно-орієнтовну мову програмування *Java SE 7.0 (Oracle)*. Середо розробки *Eclips* та *AnyLogic 6.4* із основними бібліотеками. Архітектура моделі розроблялась відповідно до «фізичного» процесу приймання поїздів та їх обробки. Основними фізичними ознаками процесу є модельний час та просторові бінарні координати.



Враховуючи технологічні особливості ЗТС до класів стандартних бібліотек *AnyLogic*, було розроблено додаткові класи: *class Train* – клас заявок – набір властивостей наскрізних поїздів; *class Tracks* – клас колій – набір властивостей приймально-відправних колій транзитного парку; *class Teams* – клас бригад ПТО – набір властивостей бригад технічного огляду; *class Locom* – клас поїзних локомотивів – набір властивостей поїзних локомотивів. Оскільки класи *Train* та *Locom* являють собою різновиди заявок на обслуговування, вони, відповідно до об'єктно-орієнтовної парадигми, походять від базового класу *Entity* (рис. 14). Класи *Tracks* та *Teams* являють собою самостійні, активні, класи, оскільки виконують функції обслуговуючих елементів (підсистем інфраструктури), тому при розробці інтегруються у основну структуру імітаційної моделі.

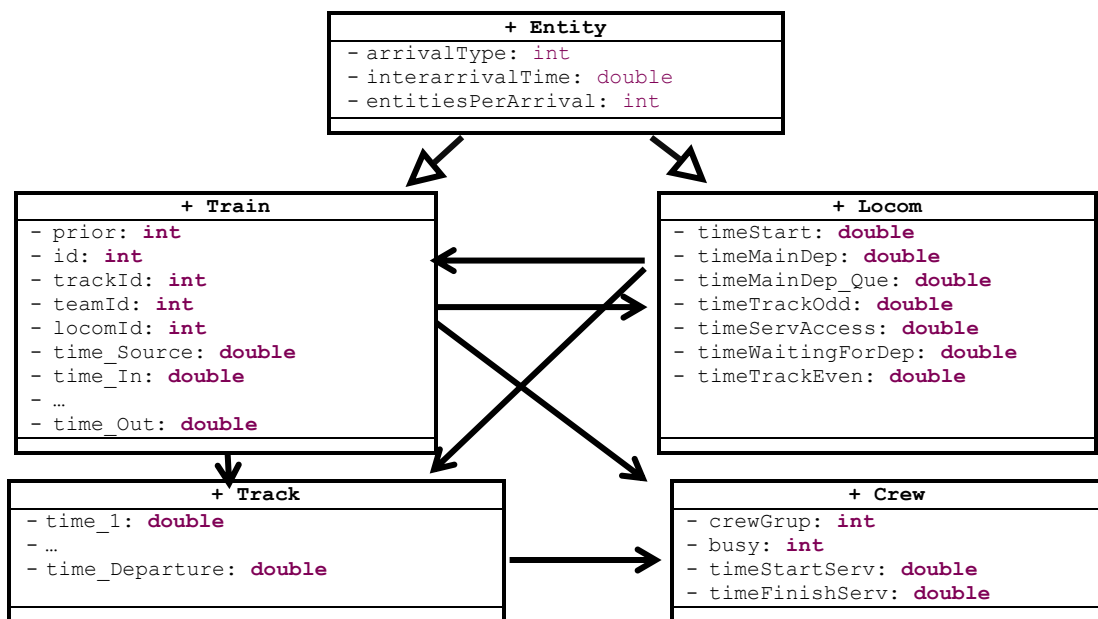


Рисунок 14 – Діаграма взаємодії класів в імітаційній моделі функціонування технологічної лінії з обробки наскрізних (зі зміною локомотивів) вантажних поїздів технічних станцій

При розробці моделі було враховано та забезпечено:

1) регулювання інтенсивності входження у канали моделі, відповідно до встановленого мінімально-припустимого інтервалу руху поїздів

$$p(t) = \begin{cases} p(J_{in}), & \text{при } t \leq J_{in}, \\ p(t), & \text{при } t > J_{in}. \end{cases} \quad (19)$$

де  $p(t)$  – щільність розподілу імовірності інтервалу прибуття поїздів у переробку;  $J_{in}$  – мінімально-допустимий інтервал прибуття поїздів з перегону на станцію відповідно до існуючих засобів автоматики, телемеханіки та зв'язку;

2) вибір вільного каналу обслуговування (приймально-відправної колії) та приладів обслуговування першої та другої фаз (бригад ПТО та поїзних локомотивів) – відповідно до встановлених обмежень та вихідних умов моделювання;

3) під час процесу моделювання здійснюються заміри дискретних переходів заявок (поїздів) по блоках кожного з каналів обслуговування, час початку задіяння та звільнення каналів та приладів обслуговування.

Модель реалізовано на прикладі типових технологічних процесів роботи технічних станції залізниць України. Основні вихідні параметри подані в табл. 1.

Таблиця 1 – Вихідні нормативні та розрахункові параметри моделювання

№ п.п.	Варіативні та розрахункові параметри моделювання	Середньодобова кількість поїздів				
		40	60	85	109	132
1	Потрібна кількість колій	5	7	9	11	13
2	Розрахункова кількість бригад ПТО	1	2	2	2	2
3	Розрахункова кількість поїзних локомотивів	17	26	34	44	52

При розробці моделі вважається, що: вхідний потік наскрізних поїздів є найпростішим, а тому, – Пуассонівським; графік руху поїздів є раціональним і ритмічним; всі норми часу на виконання технологічних операцій приймаються відповідно до типових норм. За відсутності типових норм – відповідно до технологічних процесів підрозділів сортувальної станції Дарниця; колійний розвиток станції є раціональним і суттєво не впливає на затримку часу при прийманні та відправленні поїздів і локомотивів. Тривалість займання горловин парків станції є меншою за найменш можливий інтервал попутного прибуття/відправлення поїздів; під час вибору каналу обслуговування заявки у СМО-2 (колії транзитного парку для приймання поїздів) пріоритетом є той канал, що має менший індекс – від 1 до  $N$ , де  $N$  – кількість приймально-відправних колій транзитного парку; під час вибору приладу обслуговування або заявки для обслуговування – використовується принцип *FIFO* (*first in – first out*) – вибирається той прилад, що знаходиться у стані очікування довше.

Валідація моделі проводилась через тестування всіх її блоків окремо. Під час тестування коду моделі було проведено корегування її окремих елементів. Сам код моделі успішно компілюється, що підтверджує відсутність програмних помилок.

Для гарантування достовірності результатів моделювання необхідним було визначити граничну кількість ітерацій (при одних і тих самих вихідних параметрах) та тривалості (модельного часу) моделювання. Рішення базується на тому принципі, що встановлена кількість ітерацій повинна забезпечувати таке середнє арифметичне значення, щоб його відхилення від математичного сподівання не перевищувало встановленого рівня помилки. Дане твердження справедливе тільки у випадку апроксимації експериментальних даних нормальним розподілом.

Для загальної оцінки розподілу експериментальних частот було виконано декілька серій експериментів із різною тривалістю моделювання, але з одними й тими самими вихідними параметрами. Кожна з серій містила 400 ітерацій. Для заміру та аналізу вибрано найбільш важливий розрахунковий показник – відсоток заявок, що мали затримання при надходженні у канали обслуговування СМО-2, а по суті – імовірність відмови в прийманні поїзда на колії транзитного парку. Оцінка вибірки на гіпотезу щодо нормального закону розподілу підтверджується із високою імовірністю – 99 % – за критерієм  $\chi^2$  (рис. 15, табл. 2).





Рисунок 15 – Щільності нормального розподілу для результатів експериментів з різною тривалістю модельного часу

Таблиця 2 – Оцінка серій експериментів імітаційної моделі

Параметр експерименту	Порядковий номер експерименту						
	1	2	3	4	5	6	7
Модельний час, місяців	1	6	12	24	60	90	150
Оцінка $M(x)$	4,99	5,03	5,03	5,10	5,03	5,06	5,07
Оцінка $\sigma(x)$	2,92	1,26	0,85	0,58	0,41	0,33	0,24
Оцінка $v(x)$	0,59	0,25	0,17	0,11	0,08	0,07	0,05
Ліва межа довірчого інтервалу 95 %	-0,73	2,56	3,36	3,96	4,24	4,42	4,60
Права межа довірчого інтервалу 95 %	10,71	7,50	6,69	6,25	5,83	5,70	5,54
Мінімальна кількість ітерацій для забезпечення достовірності	90 %	132	25	11	6	3	2
	95 %	526	97	44	21	10	7
	99 %	13143	2410	1095	503	249	160

Враховуючи принцип, що для більшості транспортних процесів прийнятним рівнем вважається достовірність у 95 %, та з огляду на натурні спостереження за ходом моделювання, вибрано співвідношення 12,5 років (150 місяців) та 4 ітерації при проведенні кожного експерименту.

Унаслідок того, що кількість каналів обслуговування СМО-2 та приладів обслуговування на них не співпадають за кількістю, та стохастичною природою надходження поїздів у обробку, виникають *технологічні конфлікти*, які призводять до виникнення міжопераційних простоїв (рис. 16).

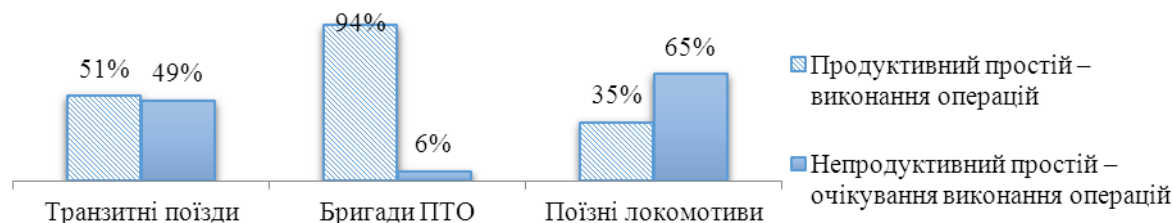


Рисунок 16 – Відносний показник продуктивного та непродуктивного простою основних елементів транзитної технологічної лінії

Середній час обслуговування поїздів становить 63,8 хв, при тому, що загальний час очікування операцій становитиме 31,5 хв (49,4% – від загального) (рис. 17). Для забезпечення 95% рівня технологічної надійності ( $\xi_{обр.ст.} \leq 0,05$ ), нормативний час обслуговування поїздів повинен бути:  $t_{обр.ст.} \geq 131,8$  хв замість існуючих нормативних 33 хв.



Рисунок 17 – Щільність розподілу часу обслуговування поїздів на коліях транзитного парку

Прийнято в обслуговування заявок: вчасно 256051 (93,6 %); із запізненням 17473 (6,4 %). Імовірність відмови у вчасному прийманні поїздів на колії станції  $\xi_{\text{пр.ст.}} = 0,064$ . Розподіл часу безвідмовної роботи із вчасного приймання поїздів подано на рис. 18.

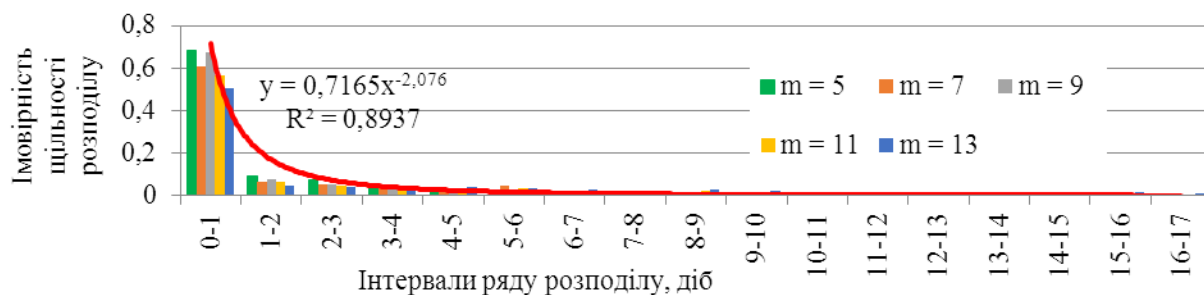


Рисунок 18 – Розподіл часу безвідмовної роботи із вчасного приймання поїздів

У *шостому розділі* іншою серією експериментів проводились дослідження закономірності формування відмов при зміні основних технологічних параметрів ЗТС місто рівня.

Зменшення каналів обслуговування (колій парку) призводить до різкого збільшення імовірності відмови у вчасному прийманні поїздів. Збільшення каналів майже не впливає на технологічну безвідмовність парків. Залежність  $\xi_n = f(m)$  щільно апроксимується експоненційною функцією. Все вищезазначене справедливе для будь-якої каналності СМО-2 (рис. 19).

Значний вплив на формування відмов також здійснює зміна кількості приладів обслуговування: кількості бригад ПТО (рис. 20) та кількості поїзних локомотивів (рис. 21).

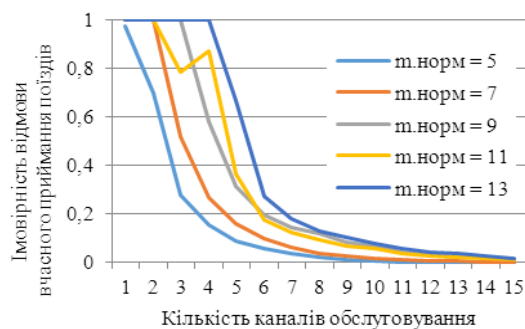


Рисунок 19 – Вплив зміни кількості каналів на імовірність вчасного приймання поїздів

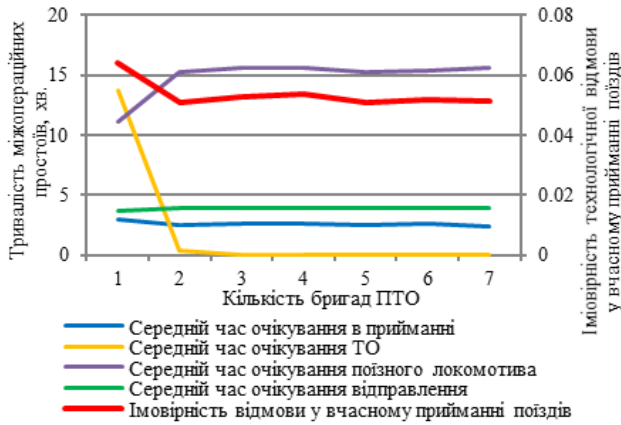


Рисунок 20 – Залежності імовірностей відмов та тривалості міжопераційних простоїв від кількості бригад ПТО

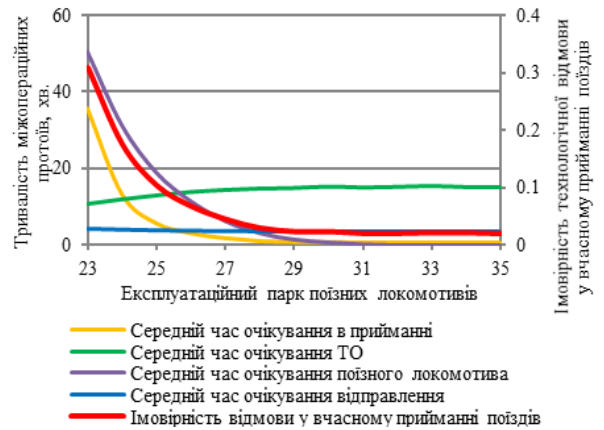


Рисунок 21 – Залежності імовірностей відмов та тривалості міжопераційних простоїв від кількості поїзних локомотивів

На безвідмовність функціонування ЗТС тісно рівня суттєво впливає нерівномірність вхідного потоку, що також підтверджується результатами проведених експериментів. При наближенні інтервалу попутного прибуття поїздів до середнього на 80 % вже спостерігається зменшення імовірності відмови до нуля, що, очевидно, є наслідком зменшення міжопераційних простоїв також до нуля (рис. 22). Для варіантів із іншою кількістю каналів обслуговування у СМО-2 (відповідно 5, 7, 9, 11 та 13 каналів) спостерігається аналогічний результат, що підтверджує однаковий вплив зміни мінімальних інтервалів попутного прибуття на імовірність вчасного приймання поїздів.

Однак найбільший вплив на безвідмовність функціонування парків залізничних станцій здійснює технологічна можливість вчасного відправлення поїздів. Моделюванням встановлено, що при збільшенні мінімального інтервалу попутного відправлення імовірність відмови вчасного приймання поступово зростає і після межі 0,7 – 0,8 від середнього інтервалу прибуття поїздів зростання набуває ступеневого характеру, що вказує на неможливість вчасного відправлення поїздів при дотриманні рівних інтенсивностей їх прибуття та відправлення – однакової кількості ниток графіка руху по прибутті та відправленні (рис. 23).

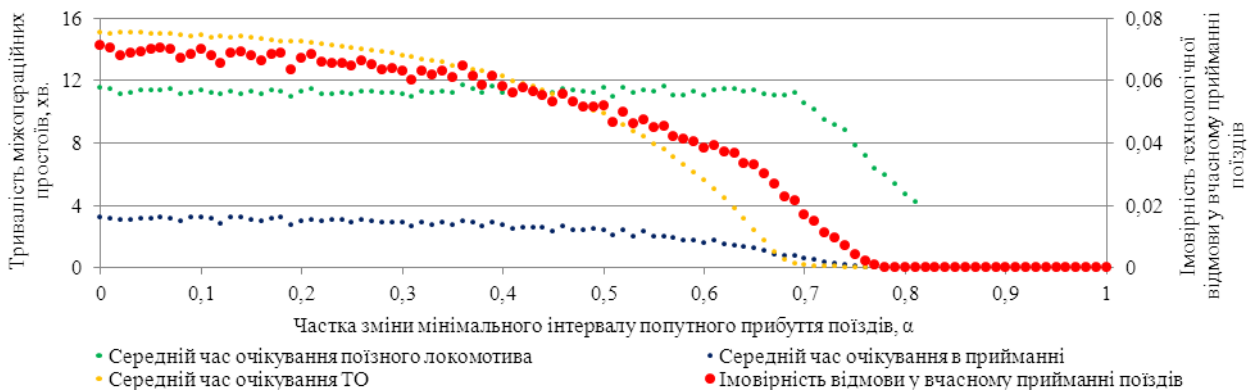


Рисунок 22 – Залежність  $\xi_n = f(\alpha t_{\text{приб}})$ , де  $\alpha$  – частка від середнього значення інтервалу прибуття  $t_{\text{приб}}$ .  $\alpha \in [0; 1]$  із кроком 0,01; для ЗТС при сімох коліях у парку

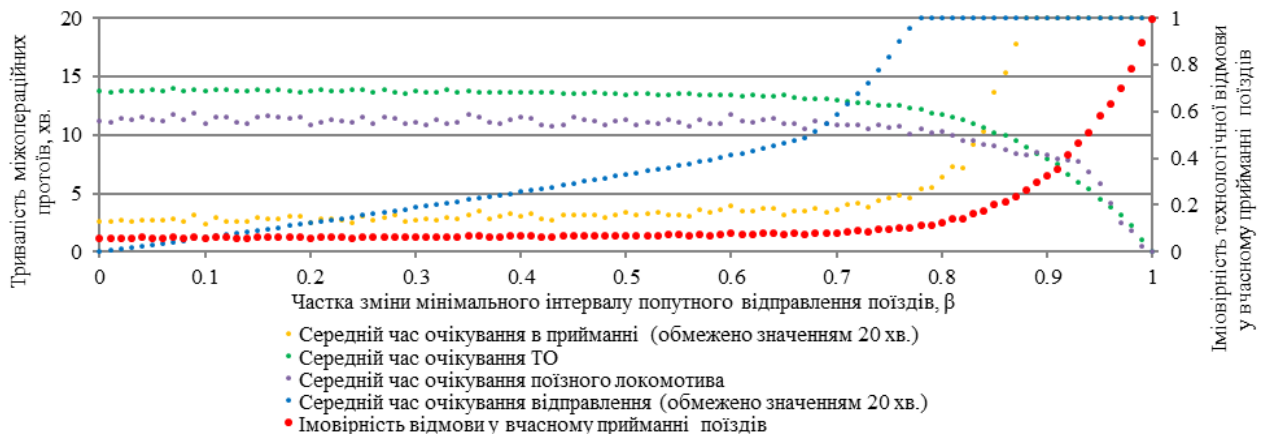


Рисунок 23 – Залежність  $\xi_n = f(\beta t_{\text{відпр}})$ , де  $\beta$  – частка від середнього значення інтервалу відправлення  $t_{\text{відпр}}$ .  $\beta \in [0; 1]$  із кроком 0,01; для ЗТС при сімох коліях у парку

Зазначений на рис. 23 результат справедливий для варіантів з іншою кількістю каналів обслуговування і вказує на існування систематичної та конструктивної технологічних відмов.

При наближенні середнього значення інтервалу відправлення до середнього інтервалу прибуття поїздів (кількості ниток графіка по прибутті та по відправленні) спостерігається постійне зростання черги з поїздів, які не можуть бути вчасно прийняті з причини зайнятості всіх каналів обслуговування (колій парку) (рис. 24).

Встановлені закономірності дозволили визначити граничне співвідношення запланованих середньодобових розмірів руху поїздів ( $N_{\text{доб}}$ ) та мінімальної кількості ниток графіка по прибутті та відправленні ( $N_{\text{min}}$ ), при якому буде забезпечуватись потрібна імовірність вчасного приймання (0,93-0,95) та відправлення (0,95) поїздів (табл. 3, рис. 25)

$$N_{\text{min}} \geq \left\lceil \frac{N_{\text{доб.}}}{(0,0022491 \cdot N_{\text{доб.}} + 0,411)} \right\rceil. \quad (20)$$

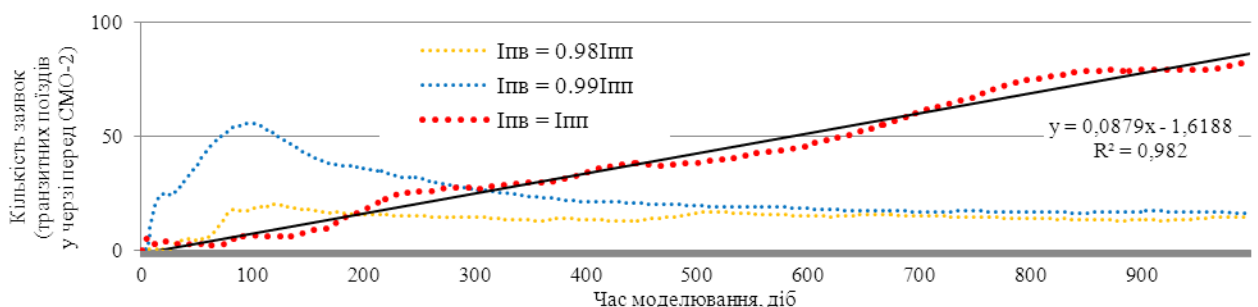


Рисунок 24 – Середньодобова кількість поїздів, що знаходяться у черзі для обслуговування в приймально-відправному парку при різному співвідношенні середніх інтервалу прибуття ( $I_{\text{пв}}$ ) та інтервалу відправлення ( $I_{\text{пв}}$ ) поїздів

З результатів проведених експериментів доведено, що в умовах стохастичного надходження поїздів в обробку, один і той самий поїздпотік може бути освоєний різними (за наборами внутрішніх технологічних параметрів) залізничними транспортними системами. Результатом організації таких систем буде їх кінцева ефективність. Тому у даному розділі також було

проведено дослідження ефективності організації ЗТС на прикладі місто рівня, а саме технологічної лінії з обробки наскрізної (зі зміною локомотивів) поїздів.

Таблиця 3 – Граничне співвідношення запланованих розмірів руху поїздів та мінімальної кількості ниток варіативного графіка, при якому забезпечується потрібний рівень технологічної надійності ЗТС місто рівня

Розрахункова (середня) кількість вантажних поїздів за добу	Мінімальна кількість ниток варіативного ГРП, не менш	Імовірність вчасного приймання поїздів ( $\xi_{н.пр.}$ ), не менше	Максимальна границя часу обслуговування поїздів (хв.) при забезпеченні імовірності вчасного відправлення поїздів ( $\xi_{н.відпр.}$ ), не менше 0,95, хв.	Параметри часу безвідмовного функціонування	
				M(x), хв.	v(x)
до 36	74	0.925	167	202	1.6
37-48	93	0.944	146	191	1.6
49-60	110	0.931	154	143	1.7
61-72	126	0.925	157	119	1.8
73-84	140	0.952	130	168	1.7
85-96	154	0.952	128	154	1.7
97-108	166	0.946	132	150	1.7
109-120	177	0.943	133	150	1.8
121-132	187	0.963	114	262	1.8

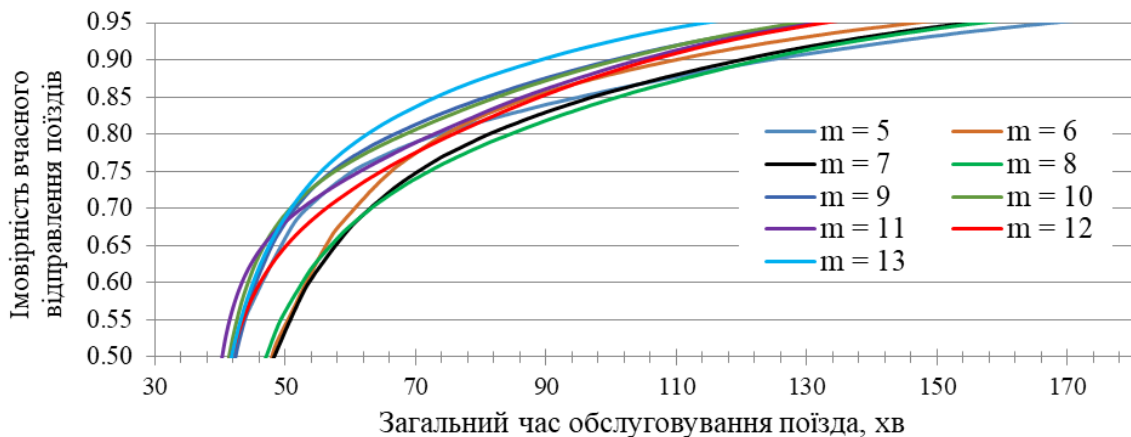


Рисунок 25 – Графіки залежностей між граничним (максимальним) часом обслуговування та мінімальною імовірністю вчасного відправлення поїздів для ЗТС місто рівня різної канальності

Оцінка ефективності організації ЗТС проводилась за критерієм безвідмовності, мінімальних сукупних операційних витрат та віддачі капіталовкладень. Причому ефективність капіталовкладень (для залізниці) при оцінці конкретного варіанта організації ЗТС (при незмінних обсягах поїздопотоків, виділеної пропускної спроможності прилеглих дільниць) визначатиметься як відношення варіативних – пов'язаних із міжопераційними простоями, що виникають через технологічні відмови – операційних витрат ( $E_{OPEX.R.VAR}$ ) до варіативної – залежно від способу організації ЗТС – складової капіталовкладень ( $E_{CAPEX.VAR}$ ). Цільова функція ефективності капіталовкладень матиме такий вигляд

$$k_{VAR.e.eph.R} = \frac{E_{OPEX.R.VAR}(S_{crew}, M_{locom}, m)}{E_{CAPEX.VAR}(M_{locom}, m)} \rightarrow \min, \quad (21)$$

або

$$k_{VAR.e.еф.R} = 365 \frac{\left( 24 \cdot c_{инфр} \cdot m \cdot \overline{l_{П-B}} + c_{поїзд} \cdot \sum T_{VAR.поїзд} + c_{вагон} \cdot \sum T_{VAR.вагон} \right. \\ \left. + c_{локом без бр.} \cdot \sum T_{VAR.локом без бр.} + c_{локом з бр.} \cdot \sum T_{VAR.локом з бр.} \right. \\ \left. + c_{зуп.поїзд} \cdot \sum \Pi_{зуп.поїзд} + c_{crew} \cdot 2(S_{crew} 2k_{crew} \cdot H_{crew}) \right) \rightarrow \min, \quad (22)$$

$$\left( S_{CAPEX.VAR.M_{locom}} \cdot M_{locom} + S_{CAPEX.VAR.m} \cdot m \cdot \overline{l_{П-B}} \right)$$

де  $C_{инфр}$ ,  $C_{поїзд}$ ,  $C_{вагон}$ ,  $C_{локом без бр.}$ ,  $C_{локом з бр.}$ ,  $C_{crew}$  – годинні витратні ставки: утримання одного кілометра станційної інфраструктури, простою поїзда на перегоні, простою вагонів, простою поїзних локомотивів без бригад, простою поїзних локомотивів з бригадою, утримання одного працівника бригад ПТО/ПКО, відповідно, грн;  $C_{зуп.поїзд}$  – витратна ставка, що пов’язана із додатковими витратами від початку руху поїзда після незапланованої зупинки на перегоні, грн;  $\overline{l_{П-B}}$  – середня повна довжина однієї приймально-відправної колій для обслуговування наскрізних поїздів, км;  $\sum T_{VAR.поїзд}$ ,  $\sum T_{VAR.вагон}$ ,  $\sum T_{VAR.локом без бр.}$ ,  $\sum T_{VAR.локом з бр.}$  – середньодобові міжопераційні простої: поїздів на перегоні перед вхідним світлофором, вагонів на станційних коліях, локомотивів без бригад (у локомотивному депо), локомотивів із бригадою (в очікуванні складу для відправлення), відповідно, годин;  $\sum \Pi_{зуп.поїзд}$  – середньодобова кількість відмов вчасного приймання поїздів;  $S_{crew}$  – кількість бригад ПТО/ПКО;  $k_{crew}$  – кількість груп в бригаді ПТО/ПКО;  $H_{crew}$  – кількість змін для працівників бригад ПТО/ПКО;  $M_{locom}$  – розрахункова кількість поїзних локомотивів;  $S_{CAPEX.VAR.M_{locom}}$ ,  $S_{CAPEX.VAR.m}$  – орієнтовна вартість інвестицій в придбання одного поїзного локомотива та спорудження одного кілометра станційної інфраструктури відповідно, грн.

Додаткові операційні витрати через виникнення технологічних відмов по конкретній станції, що призводять до додаткових затримок у доставці вантажів, несуть й вантажовласники. Розмір втрат, а саме варіативну складову операційних витрат вантажовласників, можна формалізувати як функцію від додаткових тонно-годин, що вантаж у вагонах знаходиться в очікуванні виконання технологічних операцій (у тому числі при прийманні та відправленні поїздів унаслідок відповідних технологічних відмов) та вартості капіталу відповідно до діючої ставки рефінансування Національного банку України. Тоді цільова функція ефективності капіталовкладень щодо сукупних витрат вантажовласників визначатиметься як

$$k_{VAR.e.еф.G} = \frac{\left( \overline{m_{скл.}} \cdot \sum T_{VAR.поїзд} + \sum T_{VAR.вагон} \right) G_{вант.} \cdot C_{вант.} \cdot \frac{C_{НБУ}}{100 \cdot 365}}{\left( S_{CAPEX.VAR.M_{locom}} \cdot M_{locom} + S_{CAPEX.VAR.m} \cdot m \cdot \overline{l_{П-B}} \right)} \rightarrow \min, \quad (23)$$

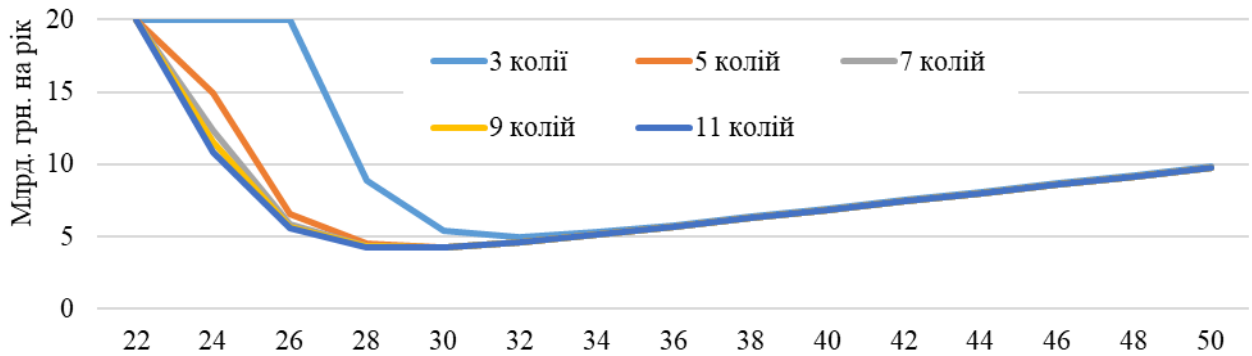
де  $\overline{m_{скл.}}$  – середня кількість вагонів у складі наскрізного поїзда;  $G_{вант.}$  – середня маса нетто вантажу у вагоні, тонн;  $C_{вант.}$  – середня ринкова вартість тонни вантажу, грн;  $C_{НБУ}$  – ставка рефінансування Національного банку України, відсотків на рік.

Загальна цільова функція ефективності капіталовкладень відносно витрат всіх учасників перевізного процесу на залізничному транспорті залежно від варіанта організації технологічної лінії із обробки наскрізних (зі зміною локомотивів) поїздів матиме вигляд



$$k_{VAR.e.эф.} = 365 \frac{E_{OPEX.R.VAR} + E_{OPEX.G.VAR}}{(S_{CAPEX.VAR.M_{locom}} \cdot M_{locom} + S_{CAPEX.VAR.m} \cdot m \cdot \overline{l_{II-B}})} \rightarrow \min, \quad (24)$$

Модель реалізовано відповідно до імітаційної моделі технологічної лінії із обробки наскрізних (зі зміною локомотивів) поїздів, що представлена у п'ятому розділі (рис. 26, 27). Вихідні параметри моделювання прийняті відповідно до базового експерименту, що проводився раніше, а саме:



Розрахункова кількість поїзних локомотивів

Рисунок 26 – Залежності варіативних сукупних операційних витрат всіх учасників перевезення вантажів залізницею при виникненні технологічних відмов від розрахункової кількості приймально-відправних колій та поїзних локомотивів. Результат на графіках обмежено значенням двадцять

середньодобовий вхідний поїздопотік  $N_{вх.}$  – 60; вантаж – зернові, ринкова вартість тонни – 5000 грн., технічна норма завантаження у вагон – 65 т, ставка рефінансування НБУ – 17 % річних; виділена пропускна спроможність – 110 пар поїздів на добу; розрахункова кількість поїзних локомотивів  $M_{locom}$  – норматив: 26, діапазон варіації при експерименті: від 20 до 50; розрахункова кількість приймально-відправних колій,  $m$  – норматив: 7, діапазон варіації при експерименті: від 2 до 15; розрахункова кількість бригад ТО/КО – норматив: 2, діапазон варіації при експерименті: від 1 до 3.

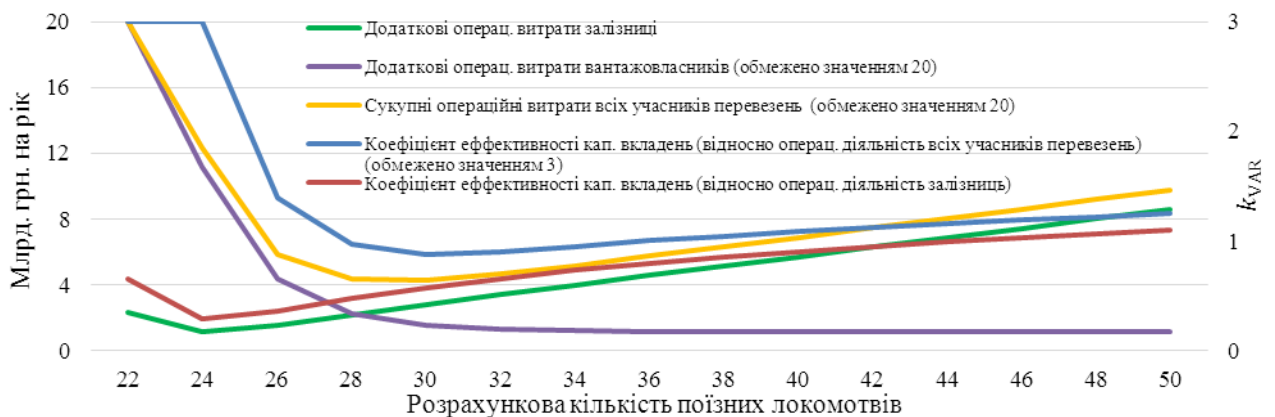


Рисунок 27 – Залежність показників ефективності організації технологічної лінії з обробки наскрізних (зі зміною локомотивів) вантажних поїздів на технічних станціях від розрахункової кількості поїзних локомотивів при  $m = 7$  колій

Результати моделювання вказують на незначний вплив параметра «кількість бригад ТО/КО» і найбільший вплив параметра «розрахункова кількість поїзних локомотивів», що формує мінімум сукупних операційних витрат всіх учасників транспортного ринку при збільшенні нормативного значення локомотивів з 26 до 30 (приблизно на 15%) та мінімум коефіцієнта ефективності капітальних вкладень відповідно сукупних операційних витрат.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну проблему підвищення ефективності транспортного процесу залізниць шляхом розвитку теоретичних основ забезпечення технологічної надійності залізничних транспортних систем різного рівня. Основні наукові теоретичні та практичні результати досліджень можна узагальнити таким чином:

1. Залізничний транспорт загального користування має всі ознаки класичних (структурно-орієнтованих), функціональних та динамічних систем. Переважною є функціональна ознака, оскільки саме мета, завдання та функції ЗТС створюють умови для виникнення та існування інших ознак – структурних та динамічних. Тому під визначенням «залізнична транспортна система» слід розуміти таке: це складна, велика система, яка є сукупністю інфраструктурних, технологічних і організаційних елементів та множини зв'язків між ними, характеризується стохастичною природою динамічних процесів та множиною функцій, що регламентуються нормативними та правовими вимогами і обмежуються наявними ресурсами.

2. У більшості досліджень під надійністю транспортних систем розуміють їх властивість протягом регламентованого часу виконувати встановлені (заплановані) нормами функції, а технологічна безвідмовність ЗТС визначається як безвідмовність експлуатації техніки – інфраструктури та рухомого складу, але при цьому не розглядається безвідмовність технологічного процесу в цілому. В окремих дослідженнях основними критеріями технологічної безвідмовності вважаються пунктуальність (точність виконання графіків руху поїздів на дільницях) та безвідмовність приймання поїздів на колії приймально-відправних парків (залізничних станцій), тоді як безвідмовність виконання технологічних норм не розглядалася. Крім того, технологічна безвідмовність ЗТС як безвідмовність експлуатаційного процесу майже не досліджувалась з причин відсутності наукових методів комплексної оцінки імовірності відмов у вчасному прийманні та відправленні поїздів, безвідмовної роботи технологічних процесів ЗТС рівня залізничних станцій, напрямків та національної мережі.

3. При дослідженні річної кількості затримок поїздів перед вхідними світлофорами встановлено, що затримки достатньо щільно корелюються із річним вантажообігом (коефіцієнт кореляції 0,7), а переважна їх частина (60 – 70 %) виникає з вини недосконаlosti технологічного процесу організації перевезень залізниць. Фактичний простій наскрізних вантажних поїздів (за даними 2015 – 2016 рр.) на сортувальних станціях перевищує станційні нормативи в середньому на 34 %, а типові нормативи – у 1,5 – 7 разів, що є



однією з головних причин відмов у вчасному відправленні та звільненні колій обслуговування і вчасного приймання наступних поїздів.

Дослідженнями існуючої системи забезпечення надійності технічних засобів та систем технологій в Україні встановлено, що найбільше значення для формалізації та дослідження технологічної надійності залізничних транспортних систем мають: ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення»; ДСТУ 2740-94 «Надійність техніки. Системи технологій. Терміни та визначення». При детальному аналізі зазначених ДСТУ встановлено, що більшість їх норм та положень належать до надійності технічних об'єктів (систем) та технологічних систем виготовлення виробів та напівфабрикатів, а для технологічної надійності ЗТС, як надійності організації експлуатаційного процесу, повною мірою відповідають тільки окремі визначення ДСТУ – відмова, імовірності безвідмовної роботи та середній час безвідмовної роботи.

Враховуючи зазначене, під терміном «технологічна надійність залізничних транспортних систем» слід розуміти таке: це властивість технологічних процесів ЗТС різного рівня забезпечувати вчасне (або із запізненням на час, не більше встановленого) приймання, відправлення, пропуск поїздів та переробку вагонопотоків; під терміном «технологічна відмова залізничної транспортної системи» – це подія, яка полягає у втраті ЗТС здатності вчасно (або із запізненням на час, не більше встановленого) приймати, відправляти, пропускати поїзди та переробляти вагонопотоки; під терміном «час безвідмовного функціонування залізничної транспортної системи» – середній час функціонування ЗТС, протягом якого відсутні відповідні технологічні відмови.

4. Безвідмовність функціонування ЗТС є комплексним поняттям і містить: безвідмовність поведінки людей (ефективність прийнятих рішень – людський фактор), безвідмовність технічних засобів (технічну складову), і технологічну безвідмовність (безвідмовність систем технологій та експлуатаційного процесу ЗТС).

Усю множину показників надійності слід розглядати: за масштабністю ЗТС (micro, medium та macro рівень); за технологічною ознакою (для вчасного приймання, обробки, відправлення поїздів або вагонів); за дотриманням (наявні та потрібні).

Під наявною технологічною безвідмовністю слід розуміти максимально граничний рівень безвідмовності, що може бути забезпечений відповідними технічними параметрами, місцевими умовами та способом організації транспортного виробництва; під потрібною технологічною безвідмовністю – граничний рівень безвідмовності, який необхідно забезпечити відповідно до обсягів запланованої роботи, її характеру.

5. Розроблена та доведена до рівня практичної реалізації математична модель формування наскрізних вантажопотоків вперше дозволяє оцінити рівень безвідмовного функціонування транспортної транзитної технологічної лінії залізничної мережі на macro рівні та визначити рівень впливу зовнішніх і внутрішніх чинників на формування відмов в організації транзитних вантажопотоків.

Технологічна безвідмовність на масо рівні ЗТС є складним, комплексним поняттям, а тому не може оцінюватись суто технологічними (внутрішніми) параметрами, адже залежить також від зовнішніх геополітичних та економічних чинників, наявного попиту (в пунктах зародження) і пропозиції (в пунктах споживання) потенційних транзитних вантажопотоків. Ключовими зовнішніми факторами, що впливають на повноту реалізації транспортного потенціалу України, є комерційна вигода (від різниці цін у пункті виготовлення товару та пункті його реалізації) та наскрізні транзитні тарифи на конкурентних маршрутах, включаючи інші види транспорту. Основними внутрішніми факторами забезпечення безвідмовної роботи на рівні залізничної мережі, що мають технологічну природу, є: маршрутна швидкість руху наскрізних поїздів, виділена пропускна спроможність залізничних напрямків, наскрізний транзитний тариф та собівартість перевезень.

6. Вперше розроблено метод обґрунтування мінімального резерву пропускної спроможності, який, на відміну від існуючих, враховує колійний розвиток технічних станцій, що обмежують залізничний напрямок (або дільниці) та дозволяє забезпечити потрібну імовірність вчасного приймання поїздів та обґрунтований час їх затримки на приймально-відправних коліях технічних станцій.

Формалізовано модель ринку доступу до інфраструктури залізничного транспорту як олігополію, що передбачає контрольовану конкуренцію: кожний оператор (державний або приватний) має вільний доступ до виділеної пропускної спроможності, однак тільки при відповідності встановленим (науково обґрунтованим та чітко регламентованим) вимогам.

Розроблена модель формування «справедливої ціни» доступу до інфраструктури, яка базується на припущенні, що серед всієї множини випадків співставлення інтересів учасників транспортного ринку (вантажовласників, операторів транспортного ринку та оператора інфраструктури) існує «сідлова точка» – збіг інтересів одразу всіх учасників ринку.

7. Технологічна безвідмовність ЗТС може порушуватися впливом різних факторів та подій, що їх спричинили, серед яких слід виділити найбільш непередбачувані та тяжкі за своїми наслідками аварії та катастрофи природного та антропогенного характеру. Якщо ЗТС (чи її окремі елементи) здатні відновитися у визначений час після таких непередбачуваних подій з тяжкими наслідками, що ліквідуються у екстремальних умовах, то така система буде здатна до ще швидшого відновлення у будь-яких інших умовах.

Критичними для відмовостійкості функціонування залізничних напрямків є надзвичайні ситуації із вибухонебезпечними, легкозаймистими та хімічними вантажами, оскільки такі події здатні вивести залізничну інфраструктуру з працездатного стану на тривалий час, і тому є визначальними при дослідженні безвідмовності ЗТС medium рівня.

Вперше формалізовано функціонування ЗТС на рівні залізничних напрямків як циклічний перехід між працездатним станом – звичайним (безпечним) функціонуванням, та непрацездатним станом – дією небезпечних факторів при виникненні надзвичайних ситуацій; локалізацією та ліквідацією

наслідків надзвичайних ситуацій. Графоаналітичним та аналітичним моделюванням встановлено функціональні залежності між середнім часом зосередження сил спеціального реагування на НС, їх потрібною продуктивністю, часом та кількістю втрати вантажів, імовірністю безвідмовної роботи та працездатного стану ЗТС.

8. Вперше формалізовано та доведено до рівня практичної реалізації імітаційну модель транзитної технологічної лінії технічних станцій на основі дискретно-подієвого принципу, яка, на відміну від існуючих, повною мірою враховує стохастичну природу процесу та дозволяє комплексно оцінити типові норми проектування та експлуатації приймально-відправних парків залізничних станцій. Результатами моделювання доведено, що типові технологічні норми: здатні забезпечити імовірність безвідмовної роботи на рівні 0,93 – 0,95 та не можуть забезпечити нормативний (середній) час обслуговування поїздів, який для 95% випадків перевищує нормативи (до чотирьох разів).

Вперше формалізовані функціональні залежності впливу інтервалів приймання, відправлення, кількості бригад технічного обслуговування та поїзних локомотивів на імовірність технологічної відмови вчасного приймання, забезпечення нормативного часу обслуговування та часу безвідмовної роботи приймально-відправних парків технічних станцій.

9. При дослідженні чутливості моделі встановлено, що на безвідмовність ЗТС рівня залізничних станцій найбільше впливають: кількість поїзних локомотивів, мінімально-допустимі інтервали попутного прибуття та відправлення поїздів. При збільшенні одночасно діючих бригад ПТО та поїзних локомотивів не спостерігається суттєвого зменшення імовірності відмови у вчасному прийманні, однак зменшуються міжопераційні простоти та збільшується імовірність вчасного відправлення. При збільшенні мінімального інтервалу попутного прибуття імовірність відмови вчасного приймання зменшується із значень 0,07 – 0,04 до нуля. При збільшенні мінімального інтервалу попутного відправлення імовірність відмови вчасного приймання поступово зростає і після межі 0,7 – 0,8 від середнього інтервалу прибуття поїздів зростання набуває степеневого характеру.

10. Вперше досліджено повну технологічну відмову технологічного процесу приймально-відправних парків залізничних станцій, яка спостерігається при моделюванні типових норм і є наслідком систематичної відмови, що вказує на неможливість вчасного відправлення поїздів при дотриманні однакових інтенсивностей їх прибуття та відправлення – рівної кількості ниток графіка руху та запланованих розмірів руху поїздів. Розроблена методологія обґрунтування мінімально-необхідного резерву наявної пропускнує спроможності міжстанційних перегонів та дільниць, яка, на відміну від існуючих, дозволяє забезпечити потрібну ефективність взаємодії залізничних станцій і прилеглих дільниць за критеріями потрібної технологічної безвідмовності.

11. Для оцінки ефективності організації транзитної (зі зміною локомотивів) технологічної лінії сортувальної станції розроблена технолого-економічна оптимізаційна модель, яку реалізовано засобами імітаційної моделі транзитної (зі зміною локомотивів) технологічної лінії. В результаті встановлено, що

найбільший вплив на загальний обсяг варіативних операційних витрат (витрат, що виникають через міжопераційні простої) всіх учасників перевезень – оператора інфраструктури, оператора вагонів та вантажовласників – здійснює параметр загальної кількості поїзних локомотивів.

Зменшення кількості приймально-відправних колій на 25 – 30 відсотків від нормативного в умовах стохастичного надходження поїздів при організації наскрізної (зі зміною локомотивів) технологічної лінії технічних станцій не призводить до суттєвого збільшення загальних операційних витрат.

Залежність коефіцієнта ефективності, а саме: відношення сукупних річних варіативних витрат всіх учасників перевезень – і залізниці і вантажовласників (внаслідок збільшення негативного впливу від ефекту «мертвого капіталу») – до варіативної складової капіталовкладень, визначає оптимум (мінімум) при збільшенні нормативного значення поїзних локомотивів на 15% незалежно від кількості (крім критично низького значення – зниження на 60 % від норми) приймально-відправних колій.

Збільшення парку поїзних локомотивів на 15% від нормативного дозволить скоротити обсяг витрат учасників перевезень вантажів в Україні (за цінами 2016 р.) по кожній технічній станції (із оборотом поїзних локомотивів) в середньому на 27%, або 1,61 млрд. грн у рік при організації кожних 60-ти вантажних наскрізних поїздів.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Основні наукові праці:

1. Мацюк В. І. Дослідження повної та систематичної технологічних відмов залізничних станцій / В. І. Мацюк // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології. – 2017. – Вип. 30. – С. 226 – 236.

2. Мацюк В. І. Принципи забезпечення технологічної надійності залізничних транспортних систем / В. І. Мацюк // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології. – 2016. – № 28. – С. 262 – 271.

3. Мацюк В. І. Скорочення строків доставки вантажів залізничним транспортом / В. І. Мацюк, О. А. Горецький // Збірник наукових праць НТУ. Серія: Проблеми транспорту. – К., 2011. – № 8. – С. 146 – 149.

4. Мацюк В. І. Дослідження технологічної надійності парків технічних станцій дискретно-подієвим моделюванням / В. І. Мацюк // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології. – 2015. – № 26 – 27. – С. 268 – 272.

5. Мацюк В. І. Науково-методологічні підходи до визначення меж обслуговування вантажних фронтів промислових зон розвиненими залізничним вузлами / В. І. Мацюк, Г.А. Шкурко // Збірник наукових праць ДЕГУТ. Серія: Транспортні системи і технології. – К., 2012. – Вип. 21. – С. 164 – 167.

6. Мироненко, В.К. Умови ефективності функціонування технологічної транспортної лінії транзиту при зміні переробної спроможності пунктів входу і виходу транспортної мережі / В.К. Мироненко, В.І. Мацюк, Г.С. Висоцька,

О.Г. Родкевич // Залізничний транспорт України. – Київ, 2012. – № 5. – С. 14 – 16.

7. Мацюк В. І. Дослідження стану та тенденцій розвитку технологічної надійності пасажирських перевезень / В. І. Мацюк, В. О. Горбатюк, О. А. Горецький // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля: науковий журнал. – 2017. – № 4 (234). – С. 150 – 154.

8. Мироненко В. К. Моделювання транзитних транспортних потоків / В. К. Мироненко, В. І. Мацюк, Г. С. Висоцька, Н. М. Алексейчук // Автошляховик України. – К., 2012. – Вип. 6. – С. 17 – 22.

9. Мироненко В. К. Формалізація відносин учасників сучасного ринку залізничних вантажних перевезень / В. К. Мироненко, В. І. Мацюк // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. – 2012. – № 6(177). – С. 68 – 71.

10. Кириченко Г. І. Визначення рівня достовірності інформації про вантажі, що перевозяться залізницями України / Г. І. Кириченко, В. І. Мацюк, О. Г. Стрілко, О. Г. Родкевич // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології. – 2011. – Вип. 18. – С. 187 – 193.

11. Мироненко В. К. Визначення оптимального місця концентрації технічної переробки місцевого вагонопотоку в розвинених залізничних вузлах за критерієм мінімізації часу / В. К. Мироненко, В. І. Мацюк // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології. – 2012. – № 20. – С. 246 – 253.

12. Мацюк В. І. Визначення оптимального місця концентрації технічної переробки місцевого вагонопотоку за критерієм відстані. Математична модель / В. І. Мацюк // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології. – 2010. – Вип. 17. – С. 249 – 255.

13. Мироненко В. К. Визначення кореспонденцій пасажиропотоків приміського залізничного сполучення методом пропорцій / В. К. Мироненко, В. І. Мацюк, О. М. Гудков, Т. М. Грушевська, В. А. Моспаненко // Залізничний транспорт України. – 2013. – № 2. – С. 27 – 29.

14. Мироненко В. К. Натурні дослідження та математичні моделі приміських пасажирських перевезень / В. К. Мироненко, В. В. Габа, В. І. Мацюк, Т. М. Грушевська, В.П. Костюшко // Наукові технології. – Київ: НАУ, 2014. – №4(24) – С.496 – 502.

*Публікації у виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз (Scopus, IndexCopernicus, РИНЦ, OpenAIRE, WorldCat, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, ResearchBib, CiteFactor та інших):*

15. Matsiuk V. A study of the technological reliability of railway stations by an example of transit trains processing / V. Matsiuk// Eastern–European Journal of Enterprise Technologies: Control processes. – 2017. – Vol. 1. – P. 12-17 (включено до наукометричної бази Scopus).

16. Мироненко В. К. Методика визначення вартості та «справедливої ціни» доступу до інфраструктури залізничного транспорту загального користування / В.К. Мироненко, В. І. Мацюк, О.Г. Родкевич //Залізничний транспорт України. – К., 2015. – Вип. 2. – С. 28 – 32.

17. Мироненко В. К. Математична модель станів та надійності залізничної транспортної системи при перевезеннях небезпечних вантажів / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, М. М. Горбаха, В. І. Мацюк // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2015. – Вип. 9 (134). – С. 161 – 167.

18. Мироненко В. К. Логіко-математична концептуальна модель ліквідації наслідків надзвичайної ситуації при залізничних перевезеннях небезпечних вантажів / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, В. І. Мацюк // Системи озброєння і військова техніка: науковий журнал. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2015. – №1(41). – С. 168 – 172.

19. Кацман М. Д. Математичні моделі екологічно небезпечних залізничних транспортних подій / М. Д. Кацман, В. К. Мироненко, В. І. Мацюк // Системи обробки інформації: збірника наукових праць. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2015. – Вип. 3(128). – С. 125 – 131.

20. Мироненко В. К. Підвищення ефективності бойового застосування підрозділів ліквідації наслідків надзвичайної ситуації при залізничних перевезеннях небезпечних вантажів з урахуванням економічного аспекту / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, В. І. Мацюк // Системи озброєння і військова техніка: науковий журнал. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2015. – №2(42). – С. 168 – 172.

21. Мироненко В. К. Математичні моделі інформаційних процесів при ліквідуванні надзвичайних ситуацій / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, В. І. Мацюк // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: науково-технічний журнал. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2016. – №2(23). – С. 163 – 170.

22. Кацман М. Д. Система підтримки прийняття рішень мережецентричного управління реагуванням на залізничні надзвичайні ситуації / М. Д. Кацман, В. К. Мироненко, В. І. Мацюк // Системи озброєння і військова техніка: науковий журнал. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2016. – №2(46). – С. 89 – 93.

23. Кацман М. Д. Практичне застосування мережецентричних методів для управління реагуванням на залізничні надзвичайні ситуації / М. Д. Кацман, В. К. Мироненко, В. І. Мацюк // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2016. – №2(47). – С. 196 – 199.

24. Мироненко В. К. Передумови створення системи підтримки прийняття рішень щодо ліквідації наслідків залізничних надзвичайних ситуацій на основі мережецентричних методів управління / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, В. І. Мацюк // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2016. – №5(142). – С. 182 – 188.

*Публікації у наукових виданнях інших держав:*

25. Katsman M. D. Mathematical models of ecologically hazardous rail traffic accidents [Text] / M. D. Katsman, V. K. Myronenko, V. I. Matsiuk // Reliability: theory & applications. – USA, San Diego, 2015. – Vol.10, No.1 (36). – P. 28 – 39. – Mode of access: [http://www.gnedenko-forum.org/Journal/2015/012015/RTA\\_1\\_2015-03.pdf](http://www.gnedenko-forum.org/Journal/2015/012015/RTA_1_2015-03.pdf)

### **Праці апробаційного характеру:**

26. Мироненко В.К. Автоматизація процесу розподілу порожніх вагонів при організації місцевої роботи на дільниці. // Тези доповідей на V Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка, технології» (м. Київ, ДЕУТ, 24-25 березня 2011 р.) / В. К. Мироненко, В. І. Мацюк. – 2011 р. – С. 196 – 197.

27. Мироненко В. К. Формалізація відносин учасників сучасного ринку залізничних вантажних перевезень // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми розвитку транспортних систем і логістики» (Євпаторія 3 – 8 травня 2012 р.) / В. К. Мироненко, В. І. Мацюк. – 2012 р. – С. 58 – 60.

28. Мацюк В. І. Підвищення ефективності функціонування системи організації поїздопотоків на залізницях України. // Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми економіки та управління на залізничному транспорті ЕКУЗТ 2012» (м. Судак, АР Крим, 11 – 13 жовтня 2012 р.) / В. І. Мацюк. – 2012 р. – С. 261.

29. Мацюк В.І. Розробка моделей дослідження кореспонденції пасажиропотоків у приміському залізничному сполученні // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології» (м. Київ, ДЕУТ, 2013 р.) / В. І. Мацюк. – 2013 р. – С. 175 – 176.

30. Мацюк В. І. Надійність перевізного процесу в умовах недискримінаційного доступу до інфраструктури залізничного транспорту // Матеріали X Ювілейної міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми економіки та управління на залізничному транспорті (ЕКУЗТ, 30 червня – 1 липня 2015 р., м. Одеса) / В. І. Мацюк. – 2015 р. – С. 97 – 98.

31. Мацюк В. І. Технологічна надійність залізничних транспортних систем // Матеріали XI Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми економіки та управління на залізничному транспорті (ЕКУЗТ, 9 – 15 вересня 2016 р., м. Київ) / В.І. Мацюк, В.К. Мироненко. – 2016 р. – С. 65 – 66

32. Мацюк В. І. Зростання ролі сортувальних станцій для організації вагонопотоків в умовах реструктуризації ринку транспортних послуг // Збірник тез науково-практичної конференції викладачів, аспірантів і магістрів Державного економіко-технологічного університету транспорту «Шляхи та напрями структурної реформи залізничного транспорту України» (Київ, ДЕУТ, 23-24 лютого 2012 р.) / В. І. Мацюк. – 2012 р. – С. 92 – 93.

### **Додаткові праці:**

33. Мироненко В. К. Скорочення часу знаходження місцевого вагона у вузлі шляхом оптимізації системи передавального руху поїздів / В. К. Мироненко, В. І. Мацюк // Транспортні інновації: науково-практичний журнал. – 2011. – № 9. – С. 19 – 25.

34. Кириченко Г. І. Удосконалення обслуговування пасажирів на залізничних вокзалах / Г. І. Кириченко, В. І. Мацюк, О. Г. Стрелко // Збірник наукових праць ДЕУТ. Серія «Транспортні системи і технології». – К., 2010. – Вип. 17. – С. 256 – 261.

35. Шевченко О. В. Удосконалення процесу розподілу порожніх вагонів при організації місцевої роботи на дільниці / О. В. Шевченко, В. І. Мацюк // Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». – К., 2010. – Вип. 17. – С. 268 – 272.

## АНОТАЦІЯ

*Мацюк В.І.* Розвиток наукових основ організації залізничних транспортних процесів та систем. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.01 – транспортні системи. – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2018.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню науково-прикладної проблеми підвищення ефективності організації залізничних транспортних процесів та систем шляхом встановлення та дослідження причин формування технологічних відмов залізничного транспорту загального користування всіх ієрархічних рівнів.

В дисертаційній роботі: формалізовано функціонування залізничних транспортних систем на рівні залізничних напрямків у вигляді циклічного переходу між працездатним станом – звичайним (безпечним) функціонуванням та непрацездатним станом; формалізовано технологічний процес обробки наскрізних (зі зміною локомотивів) поїздів на технічних станціях у вигляді імітаційної моделі, що дозволяє комплексно врахувати та оцінити стохастичну природу вхідних поїздопотоків і станційних технологічних процесів. Удосконалені: наукові основи взаємодії технічних станцій та прилеглих дільниць в частині формування мінімально-необхідних резервів наявної пропускної спроможності міжстанційних перегонів та дільниць; наукові основи проектування залізничних станцій та вузлів в частині розрахунку ємності колійного розвитку приймально-відправних парків технічних станцій; наукові основи організації залізничних транспортних процесів та систем в частині обґрунтування технологічних норм опрацювання наскрізних (зі зміною локомотивів) вантажних поїздів на технічних станціях які, на відміну від існуючих, дозволяють забезпечити потрібну ефективність взаємодії залізничних станцій і прилеглих дільниць за критеріями потрібної технологічної безвідмовності та мінімуму сукупних операційних витрат.

*Ключові слова:* залізнична транспортна система, технологічна безвідмовність, технологічна відмовостійкість, середній час безвідмовної роботи, моделювання Java.

## АННОТАЦИЯ

*Мацюк В.И.* Развитие научных основ организации железнодорожных транспортных процессов и систем. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.01 – транспортные системы. – Украинский



государственный университет железнодорожного транспорта МОН Украины, Харьков, 2018.

В диссертационной работе: формализовано функционирование железнодорожных транспортных систем на уровне железнодорожных направлений в виде циклического перехода между работоспособным и неработоспособным состоянием; формализовано технологический процесс обработки сквозных (с заменой локомотивов) поездов на технических станциях в виде имитационной модели, позволяющей комплексно учесть и оценить стохастическую природу входящих поездопотоков и станционных технологических процессов. Усовершенствованы: научные основы взаимодействия технических станций и прилегающих участков в части формирования минимально-необходимых резервов наличной пропускной способности межстанционных перегонов и участков; научные основы проектирования железнодорожных станций и узлов в части расчета емкости путевого развития приёмо-отправочных парков технических станций; научные основы организации железнодорожных транспортных процессов и систем в части обоснования технологических норм обработки сквозных (с заменой локомотивов) грузовых поездов на технических станциях которые, в отличие от существующих, позволяют обеспечить необходимую эффективность взаимодействия железнодорожных станций и прилегающих участков по критериям технологической безотказности и минимума совокупных операционных затрат.

Ключевые слова: железнодорожная транспортная система, технологическая безотказность, технологическая отказоустойчивость, среднее время безотказной работы, моделирование Java.

## ABSTRACT

*Matsiuk V. I.* Development of scientific foundations for the organization of railway transport processes and systems. – Manuscript.

Dissertation is to obtain the Degree of Doctor of Technical Sciences, speciality 05.22.01 – transportation systems (275 – transport technology). – Ukrainian State University of Railway Transport MES of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The dissertation is aimed to solving scientific and applied problems of improving the efficiency of railway transportation process through the development of scientific and technological bases and principles and mechanisms of technological reliability of rail transportation systems at various levels.

A system of criteria, models and methodology for assessing the technological reliability of rail transportation systems at levels of stations, railway lines and national rail network has been developed.

Serviceable conditions (normal and safe operation) and non-serviceable conditions (action of hazardous factors in emergency, localization and liquidation of consequences of emergencies) of railway lines have been formalized. This is the basis of the methodology of forming a network dislocation of rebuilding and fire trains and determining their necessary technological parameters. The developed approach allows to provide the necessary level of fault-tolerance of operation of the railway transport network.

Formalized and brought to the level of practical implementation the simulation model of technology process in yards of technical railway stations, which unlike existing fully takes into account the stochastic nature of the process and allows to estimate the typical rules of design and operation of station's yards. Dependences of the influence of train arrival and departure intervals, the number of crews of technical service and train locomotives to technological failure probability of timely arriving, timely service and uptime of stations have been found. Dependences of the influence of train arrival intervals to full and systematic technological failures of station yards have been researched.

For practical implementation the method of justification minimum reserve capacity has been created, which, unlike existing, ensures appropriate probability of timely acceptance of trains and their reasonable time delay on station's tracks. In addition, a methodology for assessing the efficiency of investments for the organization of railway transport processes and systems is developed, depending on the variable component of operating costs (is due to inter-operational expectations).

The methodology of the "fair price" of infrastructure access has been created, which has been based on the assumption that among all sets of cases matching the interests of the transport market (cargo owners, transport market operators and infrastructure operator) there is a case of coincidence of interests.

The result of the dissertation research is to improve existing technological processes of technical and other railway stations, instructions on the calculation of the existing capacity of Ukrainian railways, State building standards for railways design, in parts:

- definition of the required structure - the number of arrival and departure tracks, train locomotives, allocated available bandwidth of inter-station races and sections-transport and technological lines for the organization of transit trains (with the change of locomotives);
- standardization of technological operations on the processing of freight trains in the arrival and dispatching yards of technical stations;
- substantiation of the minimum-necessary reserve of available capacity of railway lines.

The methodology of forming a network dislocation of the wreck and fire trains and establishing the necessary technological parameters of these trains is developed, in which the required level of the functioning of railway transport network fault-tolerance will be ensured, is the basis for the implementation of Directive 2004/49 / EC of April 29, 2004 "On the safety of railways in the Community".

The methodology for determining the conditions for equitable access to the allocated capacity of railways is proposed, which is the scientific prerequisite for the implementation of Directive 91/440 / EC of 29 July 1991 "On the development of the Community's railways" and Directive 2001/14 / EC of 26 February 2001 "On the allocation of railway infrastructure capacity, charging for rail infrastructure and security certification".

*Keywords:* railway transport system, technological failure, technological fault tolerance, mean time between technological failures, Java modeling.

**МАЦЮК ВЯЧЕСЛАВ ІВАНОВИЧ**

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ  
ОРГАНІЗАЦІЇ ЗАЛІЗНИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ  
ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ**

Спеціальність: 05.22.01 – транспортні системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск



доц. Щербіна Р.С.

Підписано до друку 26 травня 2018 р.  
Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний. Друк – цифровий.  
Умовн.-друк. арк. 1,8. Обл.-вид. арк. 1,9  
Замовлення № 637-00/18. Наклад 150 прим.

Надруковано у редакційно-видавничому відділі  
Державного університету інфраструктури та технологій  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої  
продукції Сепія ДК № 6148 від 18.04.2018 р.  
03049, м. Київ – 49, вул. Івана Огієнка, 19.