

М. Д. Кацман¹, В. І. Мацюк², П. В. Лапін¹

¹ Акціонерне товариство «Українська залізниця», Київ, Україна

² Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ РАЦІОНАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ОРГАНІЗАЦІЇ ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ПОДІЙ

Анотація. **Мета роботи** – побудова математичних моделей процесів організації ліквідації наслідків залізничних транспортних подій на основі багатоступінних і багатокомпонентних моделей теорії систем масового обслуговування (СМО). **Результати** – в статті розглянуті математичні моделі СМО з розподілом вхідного потоку розподільних вимог одночасно по кількох каналах обслуговування з визначенням ймовірності обслуговування цих вимог та інших характеристик таких СМО. Модель реалізовано за допомогою агентної симуляції у середовищі AnyLogic University Researcher та компілятора Java. У результаті проведених експериментів на чутливість моделі встановлені закономірності впливу інтенсивностей надходження заявок у СМО та здійснення компонент обслуговування на час перебування заявок в СМО, завантаженість приладів обслуговування та каналів обслуговування. **Висновки.** Використання запропонованих математичних моделей дозволить встановлювати області прийнятних значень ймовірності успішного виконання поставлених з метою прийняття управлінського рішення щодо раціонального використання сил і засобів для організації проведення різнобічних заходів з ліквідації наслідків транспортних подій, проведення ремонтних робіт і технічного обслуговування різноманітної техніки, приладів та озброєння.

Ключові слова: залізничний транспорт, ліквідація наслідків, транспортна подія, ремонтні роботи, система масового обслуговування, система масового обслуговування немарковського типу, компонент системи масового обслуговування, імітаційне моделювання.

Вступ

Ефективне управління процесами ліквідування наслідків аварій і катастроф, проведення різних видів технічного обслуговування різноманітної техніки та обладнання є однією з ключових передумов сталого функціонування залізничного транспортно-го комплексу, промислових підприємств, логістичних систем тощо.

Для удосконалення процесів управління матеріальними, людськими, фінансовими та інформаційними потоками під час проведення відновних і ремонтних робіт застосовуються процедури математичного моделювання та комп'ютерної симуляції (імітаційного моделювання) з використанням методів дослідження операцій і теорії систем масового обслуговування.

В роботі [1] проведено дослідження дій аварійних підрозділів залізничного транспорту як процесів функціонування систем масового обслуговування. Авторами встановлені кількісні співвідношення між інтенсивністю впливу небезпечних чинників залізничної аварійної ситуації, часом прибуття, розгортання та продуктивності дій ліквідаційних підрозділів і ефективного виконання ліквідаційних робіт.

В роботі [2] описано цехи з ремонту локомотивів у вигляді багатоканальних систем масового обслуговування (СМО) з обмеженою чергою. Розроблена імітаційна модель такого цеху як об'єкта СМО, що дозволено раціонально використовувати обладнання, робочу силу, а також розподілити час проведення ремонтних робіт.

В роботі [3] розглянуто питання моделювання процесів технічного обслуговування і ремонту технічних систем розподіленої інформаційної системи. Модель оснований на спільному поданні системи, що

обслуговується та її системи технічної експлуатації у вигляді закритої неоднорідної СМО, що складається із СМО двох типів. СМО першого типу моделює процеси функціонування ремонтних органів щодо задоволення отриманих вимог.

Види організації робіт з технічного обслуговування і ремонту обладнання на гірничо-збагачувальних комбінатах розглянуто в роботі [4]. Запропоновано три моделі таких видів організації робіт:

самостійне виконання робіт – одноканальна замкнута СМО,

підрядна форма – багатоканальна СМО з очікуванням,

аутсорсінг – багатоканальна СМО з очікуванням без обмежень на довжину черги з рівномірною взаємодопомогою між каналами.

Це дозволило проаналізувати характеристики кожного виду організації робіт із застосуванням імітаційного моделювання.

Розгляд системи імітаційного моделювання GPSS WORLD задля моделювання роботи багатоканальної СМО з урахуванням відмов здійснено в роботі [5]. Проведено розрахунок середньої зайнятості каналу обслуговування і середньої зайнятості пункту відновлення, а також максимальної черги на відновлення каналів обслуговування.

В роботі [6] розглянута формалізована схема функціонування виробництва, технічного обслуговування і ремонту техніки та обладнання, що складається з двох основних частин і формалізовано опису зовнішнього середовища, поданого вхідним потоком вимог і процесів, як складної СМО з нестаціонарним і неоднорідним потоком вимог, з різнорідними каналами та із пріоритетним обслуговуванням.

Процес обслуговування та ремонту обладнання на машинобудівному підприємстві з позицій багато-

каналної СМО з чергою розглянуті у роботі [7]. Основні показники СМО дозволили проаналізувати та оптимізувати процес ремонту за умови економії витрат робочого часу.

В роботі [8] описано результати математичного та імітаційного моделювання вузла концентрації (розподілу) транзакцій в логістичній системі формалізовано як СМО типу G/M/1. Результати дослідження свідчать про можливість використання створених моделей для адекватного опису процесу функціонування вузла концентрації транзакцій.

В роботі [9] розглянуто різноманітні типи СМО з неординарними вимогами, які відповідають різним способам протидії зловмисникам з боку підрозділу охорони об'єкту. Дослідження таких СМО дає змогу визначити раціональні значення співвідношень величин кількісного складу підрозділів охорони, інтенсивностей застосування засобів протидії та зосередження додаткових сил і засобів охорони з інтенсивністю проникнення на об'єкт зловмисних угруповань з випадковим числом зловмисників у групі задля забезпечення прийнятної ймовірності виявлення, запобігання і нейтралізації таких угруповань.

Проведений у роботі [10] аналіз характеристик СМО, як характеристик роботи комбайнів у сталому і несталому режимах роботи дав змогу отримати прийнятні час очікування в черзі, її довжину тощо, що дало змогу точніше планувати витрати на технічних сервіс збиральних загонів.

В роботі [11] запропоновано використання моделей теорії систем масового обслуговування для дослідження випробувальних процесів з метою оптимізації управління випробуванням. За основу взята модель багатоканальної СМО безпріоритетного та пріоритетного типів, що дало можливість здійснювати раціональне управління чергою заявок.

В роботі [12] авторами запропонована модель радіо та програмно-комп'ютерного подавлення комп'ютерних мереж армійського корпусу противника в операціях, у якій комп'ютерні мережі представлені як сукупність ієрархічно об'єднаних СМО, а засоби програмно-комп'ютерного подавлення та передавачі перешкод впливають на їх функціонування шляхом перевантаження. Основним комплексним показником ефективності комплексу подавлення обґрунтована ймовірність несвоєчасного отримання штабами противника інформації про оперативно-тактичну обстановку.

В роботі [13] ланцюг постачання зернових формалізовано як агентну імітацію. Зазначений підхід дозволив оптимізувати багатопараметричну задачу стохастичного програмування достатньо складного процесу за критерієм мінімального часу доставлення вантажів. Разом з тим модель справедлива тільки для сталих маршрутів транспортування послідовного ланцюга постачання і не може використовуватись для розгалуженої моделі шляхів сполучення.

На відміну від роботи [13], у роботах [14] та [15] представлено імітаційні моделі для розгалужених мереж залізниць із багатозафазними системами масового обслуговування для централізованого управління парком локомотивів. Моделі дозволяють

оптимізувати розмір парку локомотивів та вагонів вантажного парку, однак не можуть адекватно описати багатоелементні процеси ланцюгів постачання. В роботі [16] також формалізовано процес руху поїздів розгалуженою мережею, однак представлена модель справедлива тільки для залізничного транспорту, оскільки у більшості формалізує послідовний технологічний процес.

Таким чином, задля моделювання процесів технічного обслуговування різноманітної техніки, проведення відповідних робіт, а також у деяких актах військової справи використовується широкий спектр моделей теорій масового обслуговування та апарат імітаційного моделювання.

Результати досліджень моделювання процесів

Під час моделювання процесів ремонтних і відновних робіт іноді зустрічаються випадки розподілу за певним алгоритмом вимог одночасно ПО кількох каналів (напрямоків) обслуговування, наприклад, надходження до ремонтного органу різних видів техніки, що потребують проведення поточного середнього та інших видів робіт, проведення ліквідації наслідків залізничних транспортних подій для відновлення руху поїздів тощо.

Задля розв'язування таких завдань застосовуються багатоконпонентні СМО, які можуть бути як марковського, так й немарковського типів, здатні обслуговувати потоки безпріоритетних у загальному випадку неоднорідних (змішаних) вимог. При цьому у системі може бути довільна кількість загальних однотипних каналів обслуговування, а у кожному компоненті ще й місць у черзі.

Одні й ті ж канали обслуговування можуть мати різну продуктивність у залежності від типу вимог до обслуговування яких вони залучаються: при надходженні у j -ту компоненту системи однорідних вимог з інтенсивністю λ_j , визначено через інтенсивність λ джерела, у загальному випадку, змішаних вимог. Величина джерела змішаних вимог, що надходять у систему, має інтенсивність

$$\lambda = \sum_{j=1}^L \lambda_j, \quad j = \overline{1, L},$$

де L – кількість компонентів у системі (\cdot).

По суті, багатоконпонентні СМО, у загальному випадку є прикладом СМО, канали якої обслуговують вхідні потоки різнорідних вимог.

Процес обслуговування у СМО кожного компонента складається з кількох етапів (фаз, стадій, періодів) з відповідною тривалістю T_i , повний термін обслуговування

$$T_{\text{обсл}} = \sum_{i=1}^{\zeta} T_i,$$

де ζ – кількість таких етапів, T_i певні розподіли ймовірності з відповідними параметрами, тоді $T_{\text{обсл}}$ буде мати узагальнений розподіл Ерланга з параметрами розподілів ймовірності етапів порядку ζ .

При організації складних різнобічних одночасних заходів, спрямованих на ліквідацію наслідків залізничних аварійних ситуацій, проведення різнопланових робіт і технічного обслуговування техніки, приладів, озброєння тощо настає необхідність встановлення області прийнятних значень ймовірності успішного виконання поставлених завдань для пода-

льного прийняття управлінського рішення щодо раціонального використання необхідних сил і засобів.

Розглянемо декілька прикладів.

1. Двокомпонентна СМО з М/Е₄/2/3 у першому компоненті та з М/Е₃/1/2 у другому компоненті без обмежень.

Граф станів СМО представлено на рис. 1.

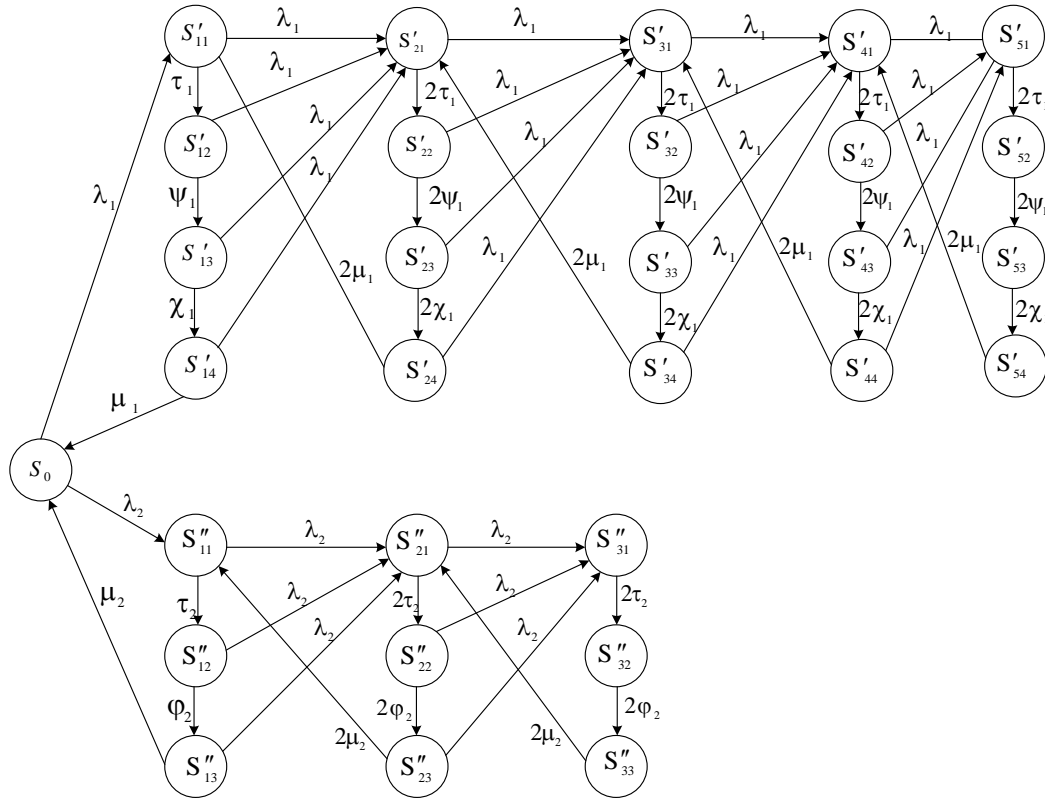


Рис. 1. Граф станів СМО с М/Е₄/2/3 у першому компоненті та з М/Е₃/1/2 у другому компоненті без обмежень

Відсутність обмежень полягає у тому, що вимоги не покидають канал обслуговування під час обслуговування та чергу у період очікування обслуговування внаслідок відсутності браку часу їхнього перебування на обслуговуванні та у черзі.

Використовуючи відомий алгоритм розв'язання рівнянь Колмогорова отримуємо значення ймовірностей станів системи:

$$P'_{1i}, P'_{2i}, P'_{3i}, P'_{4i}, P'_{5i} \quad (i = \overline{1,4})$$

$$\text{та } P''_{1i}, P''_{2i}, P''_{3i} \quad (i = \overline{1,3}).$$

Обслуговування у СМО першого компонента складається з чотирьох фаз T'_1, T'_2, T'_3 і T'_4 , повний час обслуговування

$$T_{обсл} = \sum_{i=1}^4 T'_i.$$

де T'_i мають показові розподіли з параметрами $\tau_1, \eta_1, \psi_1, \chi_1$ та μ_1 відповідно.

Обслуговування у СМО другого компонента складається з трьох фар T''_1, T''_2 і T''_3 повний час обслуговування:

$$T''_{обсл} = \sum_{i=1}^3 T''_i$$

де T''_i мають показові розподіли з параметрами τ_2, ϕ_2 і μ_2 відповідно. Тоді $T'_{обсл}$ має узагальнений розподіл Ерланга четвертого порядку, а $T''_{обсл}$ - третього порядку. Стани СМО першого компонента характеризуються такими ймовірностями:

$P'_1 = \sum_{j=1}^4 P'_{1j}$ – ймовірність того, що обслуговуванням зайнятий один канал (у системі – 1 вимога);

$P'_2 = \sum_{j=1}^4 P'_{2j}$ – ймовірність того, що обслуговуванням зайняті обидва канали (у системі на обслуговуванні знаходяться дві вимоги);

$P'_3 = \sum_{j=1}^4 P'_{3j}$ – ймовірність того, що у системі знаходяться три вимоги, з них дві обслуговуються, третя – очікує у черзі;

$$P_4^i = \sum_{j=1}^4 P_{4j}^i \text{ — ймовірність того, що у системі}$$

знаходяться чотири вимоги, з них дві обслуговуються, дві – очікують у чергах;

$$P_5^i = \sum_{j=1}^4 P_{5j}^i \text{ — ймовірність того, що у системі}$$

знаходяться п'ять вимог, з них дві обслуговуються, три – очікують у чергах.

Стани СМО другого компонента характеризуються такими ймовірностями:

$$P_1'' = \sum_{j=1}^3 P_{1j}'' \text{ — ймовірність того, що обслугову-$$

ванням зайнятий один канал (у системі – одна вимога);

$$P_2'' = \sum_{j=1}^3 P_{2j}'' \text{ — ймовірність того, що у системі}$$

знаходяться дві вимоги, з них одна обслуговується, друга чекає у черзі;

$$P_3'' = \sum_{j=1}^3 P_{3j}'' \text{ — ймовірність того, що у системі}$$

знаходяться три вимоги, з них одна обслуговується, а дві знаходяться у чергах.

Кількість зайнятих каналів:

$$\bar{k}_1 = \frac{P_1^i + 2 \sum_{i=2}^5 P_i^i}{4}; \bar{k}_2 = \frac{P_1'' + 2 \sum_{i=2}^3 P_i''}{3}.$$

Ймовірність обслуговування

$$P'_{обс} = 1 - (P'_{emp} + P_1'' + P_2'' - P_3''),$$

де

$$P'_{emp} = P_5^i - \sum_{i=2}^5 P_{i0}^i / 4$$

$$P'_{20} = P'_{12} + 2P'_{13} + 3P'_{14}, P'_{30} = P'_{22} + 2P'_{23} + 3P'_{24},$$

$$P'_{40} = P'_{32} + 2P'_{33} + 3P'_{34},$$

$$P'_{50} = P'_{42} + 2P'_{43} + 3P'_{44};$$

$$\text{Тоді } P'_{обс} = 1 - P_5^i + \frac{\sum_{i=2}^5 P_{i0}^i}{4} - \left(\sum_{i=1}^3 P_i'' \right).$$

$$P''_{обс} = 1 - P''_{emp} - \sum_{i=1}^5 P_{i0}'' ,$$

де

$$P''_{emp} = P''_{відм} = P_3'' - \frac{P''_{20} + P''_{30}}{3};$$

$$P''_{20} = P''_{12} + 2P''_{13}; P''_{30} = P''_{22} + 2P''_{23};$$

$$P''_{обс} = 1 - P_3'' + \frac{P''_{20} + P''_{30}}{3} - \sum_{i=1}^5 P_i''.$$

2. Двокомпонентна СМО з М/Е₄/2/2 у першому компоненті та з М/Е₃/1/2 у другому компоненті з обмеженнями на ас перебування в період обслуговування β_{1,2} та очікування γ_{1,2}.

Граф станів СМО представлено на рис. 2.

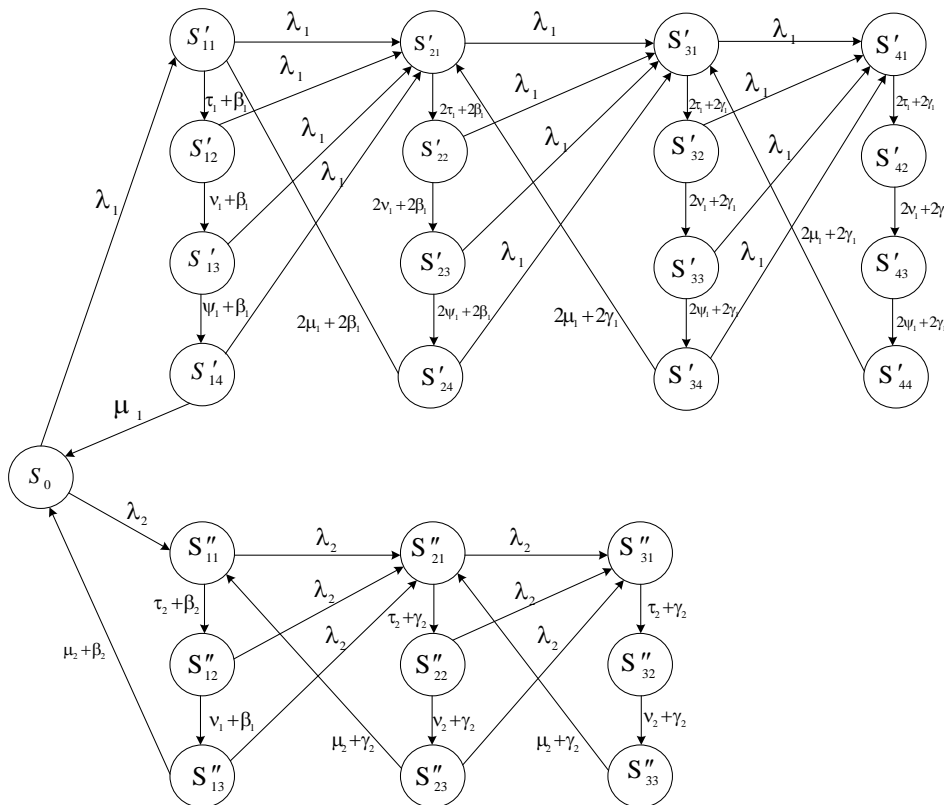


Рис. 2. СМО з М/Е₄/2/2 у першому компоненті та з М/Е₃/1/2 у другому компоненті β_{1,2} ≠ 0, γ_{1,2} ≠ 0

Інтенсивність простіших потоків фаз обслуговування та очікування системи масового обслуговування першого компонента $\tau_1, \nu_1, \psi_1, \mu_1$ та фаз другого компонента τ_2, ν_2, μ_2 :

$$P_1' = \sum_{j=1}^4 P_{1j}' \text{ — ймовірність того, що обслуговуванням зайнятий один канал першого компонента, у системі знаходиться одна вимога;}$$

випадку зайняти один канал першого компонента, у системі знаходиться одна вимога;

$$P_2' = \sum_{j=1}^4 P_{2j}' \text{ — ймовірність того, що обслуговуванням зайняті два канали першого компонента, в системі знаходяться на обслуговуванні дві вимоги;}$$

першого компонента знаходяться три вимоги: з них дві обслуговуються, третя – очікує у черзі;

$$P_3' = \sum_{j=1}^4 P_{3j}' \text{ — ймовірність того, що у системі першого компонента знаходяться чотири вимоги: дві з них дві на обслуговуванні, дві – очікують у чергах;}$$

першого компонента знаходяться чотири вимоги: дві з них дві на обслуговуванні, дві – очікують у чергах;

$$P_4' = \sum_{j=1}^4 P_{4j}' \text{ — ймовірність того, що у системі першого компонента знаходяться чотири вимоги: дві з них дві на обслуговуванні, дві – очікують у чергах;}$$

першого компонента знаходяться чотири вимоги: дві з них дві на обслуговуванні, дві – очікують у чергах;

$$P_1'' = \sum_{j=1}^3 P_{1j}'' \text{ — ймовірність того, що обслуговуванням зайнятий один канал другого компонента, в системі знаходиться одна вимога;}$$

випадку зайняти один канал другого компонента, в системі знаходиться одна вимога;

$$P_2'' = \sum_{j=1}^3 P_{2j}'' \text{ — ймовірність того, що в системі другого компонента знаходяться дві вимоги, одна з них а обслуговуванні, друга очікує в черзі;}$$

другого компонента знаходяться дві вимоги, одна з них а обслуговуванні, друга очікує в черзі;

$$P_3'' = \sum_{j=1}^3 P_{3j}'' \text{ — ймовірність того, що в системі другого компонента знаходяться три вимоги: з них одна – на обслуговуванні, дві – очікують у чергах.}$$

Кількість зайнятих каналів:

$$\bar{k}_1 = \frac{P_1' + P_2' + P_3' + P_4'}{4};$$

$$\bar{k}_2 = \frac{P_1'' + P_2'' + P_3''}{3};$$

Ймовірність обслуговування для першого компонента:

$$P_{обс}' = 1 - P_{втр}' - \sum_{i=1}^3 P_i'';$$

$$P_{втр}' = P_{відм}' + P_{пок.обсл.}' + P_{пок.черг.}'$$

де

$$P_{відм}' = P_4' - \sum_{i=2}^4 P_{i0}';$$

$$P_{20}' = \frac{P_{12}' + 2P_{13}' - 3P_{14}'}{4};$$

$$P_{30}' = \frac{P_{22}' + 2P_{23}' - 3P_{24}'}{4};$$

$$P_{40}' = \frac{P_{32}' + 2P_{33}' - 3P_{34}'}{4}$$

$$P_{пок.обсл.}' = \frac{\beta_1 \bar{k}_1}{\lambda_1}.$$

Середня чисельність вимог, що знаходяться у черзі

$$\bar{r}_1 = \frac{\sum_{r=1}^m r \cdot P_{(n+r)'}}{\zeta_1} = \frac{P_3' + P_4'}{4};$$

якщо $\beta_1 = \gamma_1$, то $P_{пок.черг.}' = \frac{\beta_1 \bar{r}_1}{\lambda_1}$.

$$\text{Тоді } P_{втр}' = P_4' - \sum_{i=2}^4 P_{i0}' + \frac{\beta_1 \bar{k}_1}{\lambda_1} + \frac{\gamma_1 \bar{r}_1}{\lambda_1},$$

$$P_{обсл.}' = 1 - P_4' - \left(\sum_{i=2}^4 P_{i0}' - \frac{\beta_1 \bar{k}_1}{\lambda_1} - \frac{\gamma_1 \bar{r}_1}{\lambda_1} \right) - \sum_{i=1}^3 P_i''.$$

Ймовірність обслуговування для другого компонента:

$$P_{обс}'' = 1 - P_{втр}'' - \sum_{i=1}^4 P_i',$$

$$\text{де } P_{втр}'' = P_{відм}'' + P_{пок.обсл.}'' + P_{пок.черг.}''$$

$$P_{відм}'' = P_3'' - \frac{P_{20}'' + P_{30}''}{3}$$

$$\text{де } P_{20}'' = \frac{P_{12}'' + 2P_{13}''}{3}; \quad P_{30}'' = \frac{P_{22}'' + 2P_{23}''}{3}$$

$$P_{пок.обсл.}'' = \frac{\beta_2 \bar{k}_2}{\lambda_2}.$$

Середня чисельність вимог, що знаходяться у черзі:

$$\bar{r}_2 = \frac{P_2'' + P_3''}{3}; \text{ тоді } P_{пок.черг.}'' = \frac{\gamma_2 \bar{r}_2}{\lambda_2},$$

При умові, що $\beta_2 = \gamma_2$

$$P_{пок.черг.}'' = \frac{\beta_2 \bar{r}_2}{\lambda_2},$$

$$P_{обсл.}'' = 1 -$$

$$\left(P_3'' + \frac{P_{20}'' + P_{30}''}{3} - \frac{\beta_2 \bar{k}_2}{\lambda_2} - \frac{\gamma_2 \bar{r}_2}{\lambda_2} \right) - \sum_{i=1}^4 P_i'.$$

З метою узагальнення поданого вище матеріалу можна помітити, що у L -компонентній системі у сталому режимі функціонування значення ймовірності обслуговування вимог у ζ -му компоненті можна визначити таким чином:

$$P_{обс\zeta}'' = 1 - P_{вмп\zeta}'' - \sum_{\varepsilon \neq \zeta}^L \left(\sum_{c=1}^{n+m} P_{c\varepsilon} \right)_{\varepsilon}$$

де у загальному випадку

$$P_{вмп\zeta} = P_{відм\zeta} + P_{пок.обсл.\zeta} + P_{пок.черг.\zeta};$$

$$P_{відм\zeta} = P_{(n+m)\zeta} - \sum_{v=2}^{n+m} r_{v0\zeta} / \zeta,$$

ζ_{ε} – кількість фаз обслуговування при знаходженні системи в одному з «укрупнених» станів.

$$P_{v0\zeta} = \sum_{k=2, j=2}^{\zeta} (k-1) P_{(v+1)\zeta},$$

$$v = \overline{2, (n+m)}.$$

Для СМО без обмежень, коли $P_{пок.обсл.\zeta} = 0$ та

$P_{пок.черг.\zeta} = 0$, маємо:

$$P_{обс\zeta} = 1 - P_{(n+m)\zeta} - \frac{\sum_{v=2}^{(n+m)} P_{v0\zeta}}{\zeta} - \sum_{\varepsilon \neq \zeta}^L \left(\sum_{c=1}^{n+m} P_c \right)_{\varepsilon},$$

де $\left(\sum_{c=1}^{n+m} P_c \right)_{\varepsilon}$ – сума усіх ймовірностей $P_{c\varepsilon}$ «укрупнених» станів ε -компонента,

якщо $\varepsilon = \zeta$, то

$$P_{c\varepsilon} = \sum_{j=1}^{\zeta} P_{cj}, c = \overline{1, (n+m)}.$$

Середня кількість каналів обслуговування розраховується як

$$\bar{k}_{\zeta} = \frac{\sum_{i=0}^n P_{c\varepsilon} + n \sum_{r=1}^m P_{(n+r)\zeta}}{\zeta_{\varepsilon}} = \frac{\sum_{L \neq 0}^{(n+m)} P_{c\varepsilon}}{\zeta_{\varepsilon}}.$$

Для СМО з обмеженням:

– ймовірність $P_{пок.обсл.\zeta}$ покидання вимогами

каналу обслуговування в період їхнього знаходження на обслуговуванні визначається як

$$P_{пок.обсл.\zeta} = \frac{\beta_{\zeta}}{\lambda_{\zeta}} \bar{k}_{\zeta},$$

– ймовірність $P_{пок.черг.\zeta}$ покидання вимогами черги в період їхнього очікування у черзі:

$$P_{пок.черг.\zeta} = \frac{\gamma_{\zeta}}{\lambda_{\zeta}} \cdot r_{\zeta},$$

$$r_{\zeta} = \sum_{r=1}^m r P_{(n+r)\zeta} / \zeta_{\varepsilon},$$

β_{ζ} – інтенсивність покидання вимогами каналу обслуговування внаслідок браку часу на період обслуговування;

γ_{ζ} – інтенсивність покидання вимогами черги внаслідок браку часу на очікування;

Тоді

$$P_{вмп\zeta} = \sum_{k=2}^{n+m} P_{v0\zeta} / \zeta + \frac{\beta_{\zeta}}{\lambda_{\zeta}} \bar{k}_{\zeta} + \frac{\gamma_{\zeta}}{\lambda_{\zeta}} r_{\zeta},$$

$$P_{обсл\zeta} = 1 - P_{вмп\zeta}.$$

При застосуванні запропонованих математичних моделей доцільно враховувати такі зауваження:

– у багатокомпонентних СМО продуктивність будь-якого компонента знижується у порівнянні з однокомпонентною системою при однакових інтенсивностях етапів обслуговування. Якщо кожен компонент буде мати однакові значення цих інтенсивностей, то продуктивності багатокомпонентної та однокомпонентної СМО будуть однаковими;

– якщо один з компонентів багатокомпонентної системи є СМО з чергою, то його продуктивність є великою, але це значення продуктивності інших компонентів СМО з відмовами, що викликає «перекос» у роботі усієї системи. Це може бути причиною відмови від застосування у конкретному випадку багатокомпонентної системи.

– при малих значеннях ($0 \leq P_{обсл} \leq 0,1$) вплив на систему в цілому або на окремий компонент інтенсивностей величин покидання вимог у період обслуговування і знаходження у черзі є незначним. При зміні цих величин значення $P_{обсл}$ буде коливатися відносно свого середнього значення.

Реалізація моделі двокомпонентної СМО (рис. 3) здійснено за допомогою агентної симуляції та компілятора Java у середовищі AnyLogic University Researcher.

Процес обслуговування заявок у системі імітується дискретно-подієвим переходом блоків бібліотеки моделювання процесів (рис. 4).



Рис. 3. Агент багатоканальної СМО

Блок *source* є генератором випадкових подій, що імітує надходження заявок у СМО.

Блок *queue* формує чергу із заявок.

Блок *delay* формує обслуговування заявок.

Блок *sink* формує завершення перебування заявок у СМО.

У моделі реалізовано процес паралельного обслуговування заявок відповідно до встановленої кількості каналів обслуговування.

Кількість місць в черзі (блок *queue*) не обмежена.

При надходженні кожної заявки до блоку *delay* реалізується *Java*-код «*sourceServ.inject(1);*» що

відповідає створення нового інформаційного повідомлення щодо потреби в обслуговуванні вільним приладом обслуговування.

Сам процес двокомпонентного обслуговування – залучення приладу – реалізовано у вигляді окремої популяції агентів (рис. 4).

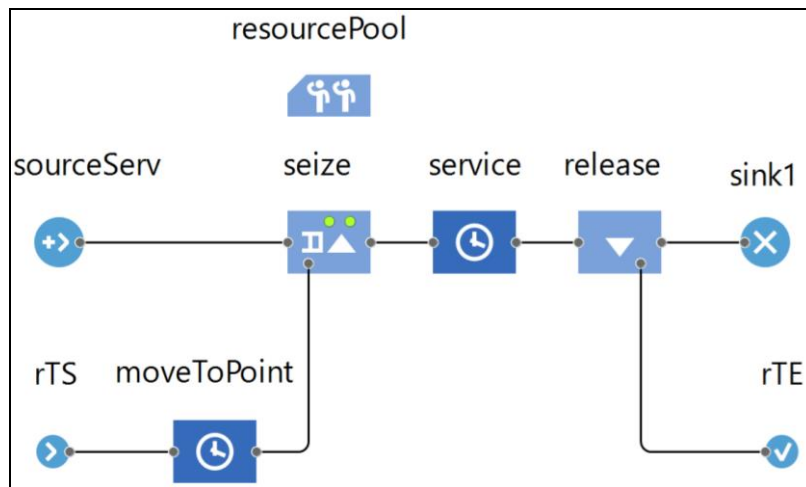


Рис. 4. Агент двокомпонентного процесу обслуговування

Після реалізації *Java*-коду «*sourceServ.Inject(1);*» з блоку *delay* (рис. 3), блок *sourceServ* генерує нове інформаційне повідомлення на потребу в обслуговуванні заявки, що надійшла до СМО (блок *delay*, рис. 3).

Інформаційне повідомлення потрапляє до блоку *seize*, у якому формується черга із відповідних повідомлень.

Разом з тим, блок *seize* керує набором приладів обслуговування, що представлені у вигляді «набору ресурсів» (блок *resourcePool*). При наявності вільного ресурсу, блоком *seize* здійснюється його «захоплення» із подальшою імітацією концентрації (перша компонента, рух до місця обслуговування заявки у СМО – блок *moveToPoint*) та імітацією безпосереднього обслуговування (друга компонента, обслуговування – блок *service*). Після відпрацювання інформаційного повідомлення – надходження його у блок *sink1* – через реалізацію *Java*-коду «*delay.stopDelay(delay.get(0));*» заявка, яку було обслуговано у СМО (блок *delay*, рис. 3) «випускається» з блоку *delay*, що імітує закінчення перебування заявки у СМО.

Для можливості фіксування часу знаходження заявок у СМО, здійснюється замір моменту надходження заявки у СМО (момент виходу агента з блоку *source*, рис. 3 «*agent.timeIn = time();*»). Даний алгоритм дає можливість зафіксувати тривалість знаходження кожної заявки у черзі СМО (блок *queue*) та під обслуговуванням (блок *delay*).

Для пошуку закономірностей впливу інтенсивності надходження заявок до СМО (λ), інтенсивності першої компоненти (ν) та інтенсивності обслуговування (μ) створено експерименти чутливості моделі.

Базова кількість каналів обслуговування прийнята 5, приладів обслуговування 3.

У результаті експерименту досліджувався вплив зміни ν та μ на показники СМО при незмінному значенні λ :

$$\begin{cases} \lambda = const; \\ \nu \in (0\lambda; 3, 0\lambda], \text{ крок } 0,005\lambda; \\ \mu \in (0\lambda; 3, 0\lambda], \text{ крок } 0,005\lambda. \end{cases}$$

Для можливості детального аналізу у екстремальних умовах завантаження системи проводилися додаткові експерименти чутливості із зменшеним шагом зміни λ :

$$\begin{cases} \lambda = const; \\ \nu \in (0\lambda; 0,5\lambda], \text{ крок } 0,002\lambda; \\ \mu \in (0\lambda; 0,5\lambda], \text{ крок } 0,002\lambda. \end{cases}$$

Значення λ прийнято як одна подія в умовну одиницю часу. У результаті отримані результати, наведені на рис. 5 – 7.

Висновок

Використання запропонованих математичних моделей дозволить при організації одночасних різнобічних заходів, наприклад, під час ліквідації наслідків залізничних транспортних подій, проведення ремонтів і технічного обслуговування різноманітної техніки та озброєння, встановлювати області прийнятних значень імовірності успішного виконання поставлених завдань для подальшого прийняття управлінських рішень щодо раціонального використання необхідних сил і засобів.

Подальші дослідження доцільно спрямовувати на розроблення багатокомпонентних і багатоетапних математичних моделей з частковою і повною взаємодопомогою між каналами обслуговування та СМО замкнутого типу.

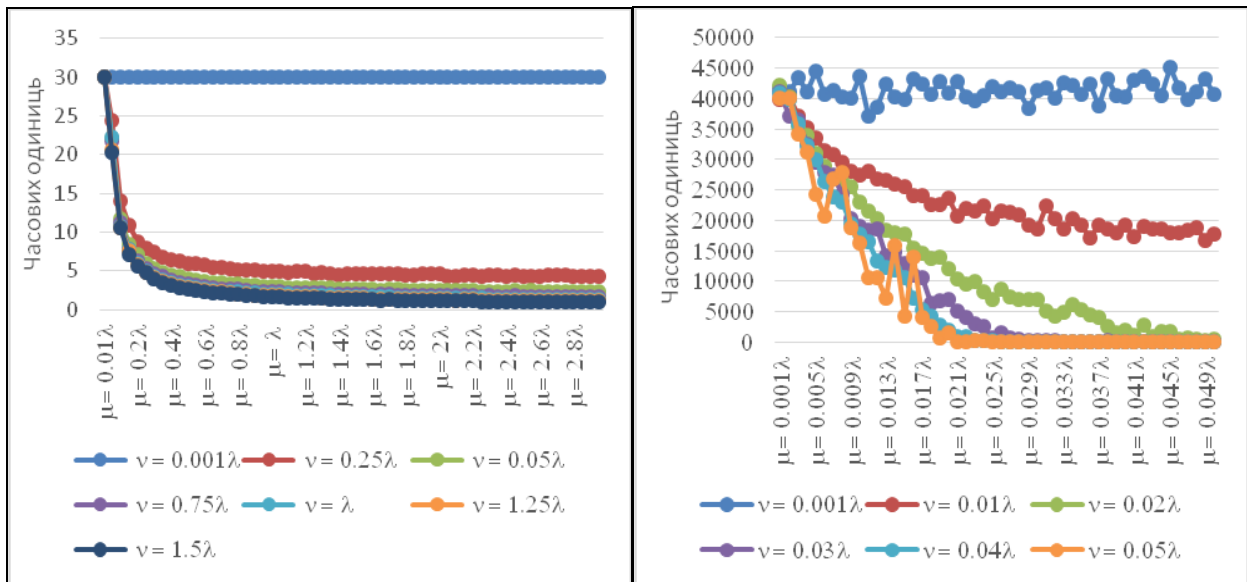


Рис. 5. Час в системі

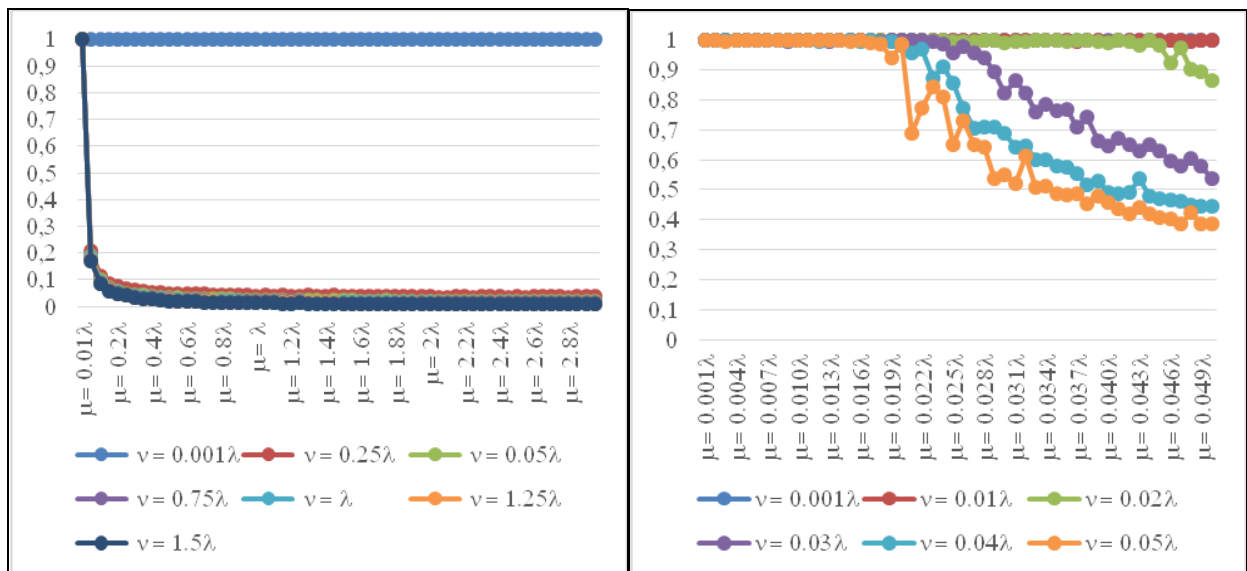


Рис. 6. Завантаження каналів обслуговування

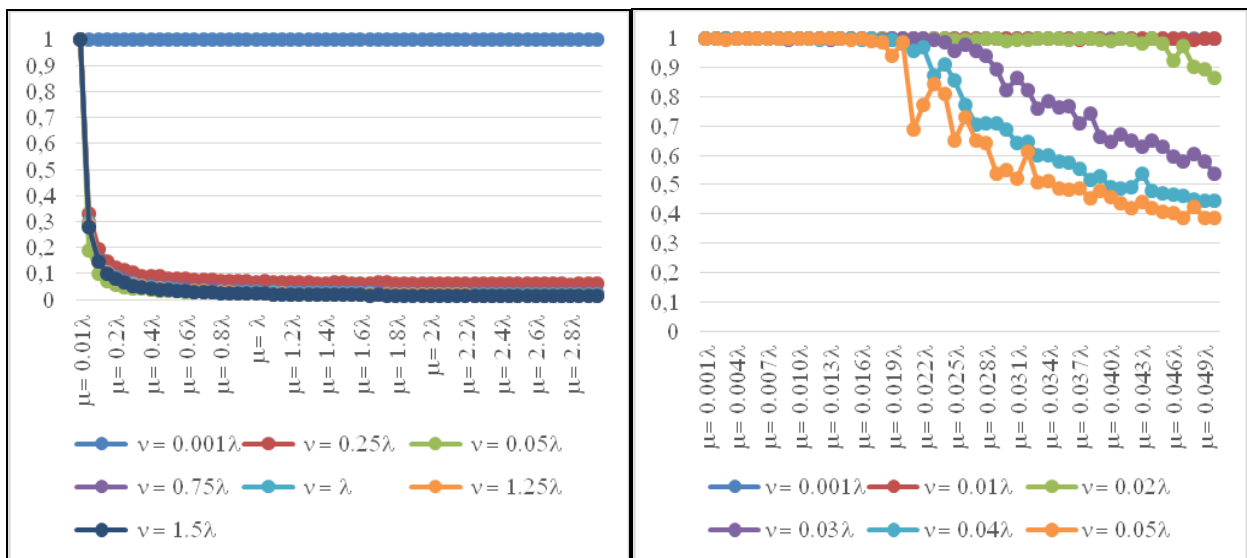


Рис. 7. Завантаження приладів обслуговування

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Управління екологічною безпекою на залізничному транспорті (прикладні аспекти) /М.Д. Кацман, О.І. Запорожець, В.К. Мироненко, В.І. Мацюк, О.В. Третьяков. Київ: ФОП Лук'яненко В.В., ТПК «Орхідея», 2021. 980 с. – ISBN 978-617-7609-61-1
2. Бондарь Б.Е., Очкасов А.Б., Бондарь Е.Б., Гришечкина Т.С., Очеретюк М.В. Моделирование организации ремонта локомотивов методами теории систем массового обслуживания. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. №5 (77), 2018. Режим доступу: <http://eadnurt.diit.edu.ua>bistream.pdf>.
3. Гузенко В.Л., Миронов Е.А., Шестопалова О.Л. Моделирование процессов технического обслуживания и ремонта технических средств распределенной информационной системы. Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования: Научный интернет-журнал. № 6 (22). 2014. Режим доступу: http://iea.gostim-jo.ru >2014_66/2014_06_11.pdf.
4. Смірнов В.В., Клименко О.О. Обґрунтування застосування моделей теорії систем масового обслуговування щодо систем технічного обслуговування і ремонту гірничо-збагачувальних комбінатів. Економічний вісник НТУ №4.2006. Режим доступу: <http://ev.nmu.org.ua > docs>.
5. Дехтярук М.Т. Комп'ютерне моделювання надійності багатоканальних СМО. Проблеми інформатизації та управління. НТУ, м. Київ, №2 (24). 2008. С. 51-56.
6. Ларін О.М., Субочев О.І., Погорелов М.Г. Формалізація виробничих процесів автосервісних підприємств. Вісті Автомобільно-дорожнього інституту №2(5). 2007. Режим доступу <http://repositse.nuczu.edu>bistream>Ларин>
7. Решетняк Т.В., Нечволода Л.В., Крикуненко К.М. Застосування теорії систем масового обслуговування для оптимізації управління технічним обслуговуванням і ремонтом обладнання. Науковий журнал «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво». НТУ, Луцьк, Вип. № 43. 2021. С. 115-122.
8. Підгурський О.І. Математичне та імітаційне моделювання процесів функціонування вузла концентрації гібридних логістичних потоків транзакцій. Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики. №10.2018.С. 92-107.
9. Надточій О.В., Тітова Л.Л. Аналіз багатоканальної системи масового обслуговування при сталому і несталому режимах роботи зернозбиральних комбайнів. Національний університет біоресурсів і природокористування України. Режим доступу: <http://dglip.nubip.edu.ua>jspui/ pdf>.
10. Katsman M. Approach to Determining the Parameters of Physical Security Units for a Critical Infrastructure Facility /M. Katsman, V. Myronenko, V. Matsiuk, V. Lapin. – San Diego, USA. – Reliability: theory & applications. – Vol. 1.№ 01(61). – 2021. – P. 71–80.
11. Корнієнко І.В., Корнієнко С.П., Троцюк С.М., Казначей С.М., Жирна О.В. Функціональна схема модулю управління вхідним потоком вимог на випробування ОБТ. Збірник наукових праць Державного науково-дослідницького інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Випуск № 3 (5). 2021. С. 41-49. ISSN № 2706-7386.
12. Лучук Е.В. Модель радіо та програмно-комп'ютерного подавлення комп'ютерних мереж противника в операціях. Академія сухопутних військ імені Петра Сагайдачного. Режим доступу: <http://vtz.asv.gov.ua>article>download.pdf>.
13. A. Mazaraki, V. Matsiuk, N. Ilchenko, O. Kavun-Moshkovska, and T. Grygorenko, “Development of a multimodal (railroad-water) chain of grain supply by the agent-based simulation method,” Eastern-European J. Enterp. Technol., vol. 6, no. 3 (108), pp. 14–22, Dec. 2020, doi: 10.15587/1729-4061.2020.220214.
14. V. Matsiuk, O. Galan, A. Prokhorchenko, and V. Tverdomed, “An Agent-Based Simulation for Optimizing the Parameters of a Railway Transport System.” ICTERI-2021, Vol I: Main Conference, PhD Symposium, Posters and Demonstrations, September 28 – October 2, 2021, Kherson, Ukraine. 121-128 pp.
15. V. Matsiuk et al., “Improvement of efficiency in the organization of transfer trains at developed railway nodes by implementing a ‘flexible model,’” Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2019, doi: 10.15587/1729-4061.2019.162143.
16. S. Panchenko, A. Prokhorchenko, O. Dekarchuk, D. Gurin, D. Mkrtychian, and V. Matsiuk, “Development of a method for studying the impact of the time reserve value on the reliability of the train schedule based on the epidemiological SIR model,” IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1002, no. 1, p. 012016, Dec. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/1002/1/012016.

Received (Надійшла) 12.03.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.05.2022

**Mathematical models for rationalization of liquidation the consequences
of the railway accidents**

M. Katsman, V. Matsyuk, P. Lapin

Abstract. The purpose of the article is to build mathematical models for liquidation the consequences of the railway accidents based on multistage and multicomponent queuing system. **Results.** Mathematical models of queuing system (QS) with the distribution of the input flow of distribution requirements simultaneously on several service channels to determine the probability of service of these requirements and other characteristics of such QS are considered. The models are implemented using agent simulation in the Any Logic University Researcher environment and the Java compiler. As a result of the experiments on the sensitivity of the model, the regularities of the influence of the intensities of applications in the queuing system and the implementation of service components during the stay of applications in the, the load of service devices and service channels. **Conclusions.** The use of proposed models allows establishing areas of acceptable values of the probability of successful implementation of the set management decisions on the rational use enable recourses to organize a variety of measures to eliminate the consequences of railway accidents, repairs and maintenance of various equipment, devices and weapons.

Keywords: railway transport, consequences of the railway accidents, repairs, queuing system, QS component, non-Markov type QS, imitation modeling.