

УДК 656.23.03

Н. Б. Чернецька-Білецька, д. т. н., проф.; І. О. Баранов, к. т. н.;
М. В. Мірошникова; С. Г. Кужель

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ «МАШИНІСТ-ПОЇЗД-ДИСПЕТЧЕР»

У статті наведено математичну модель, яка відображає різні чинники негативного впливу на якість прийнятих рішень оператором транспортної системи, де складниками є: професійна підготовка, умови праці та організація робочого місця, режим праці та відпочинку, ступінь невизначеності інформації, що надходить до оператора. Запропоновано концепцію опису системи забезпечення безпомилкової роботи. Визначено алгоритм отримання різних варіантів захисту трудової діяльності операторів від появи помилок і алгоритм вибору найбільш раціонального варіанту. Виконано аналіз результатів соціологічного обстеження з питань найбільш трудомістких диспетчерських функцій. На підставі аналізу сукупності чинників, що впливають на якість прийнятих рішень оператором транспортної системи, запропоновано систему забезпечення безпомилкової роботи як поїзного диспетчера, так і машиніста локомотива, основою якої є математична модель. Розроблено математичну модель, яка моделює безпомилковість роботи перевізного процесу та технічних засобів із необхідною надійністю. Висвітлено методику підготовки оператора транспортної системи з метою отримання якісного навчання з необхідною надійністю. Отримано залежності надійності професійної підготовки оператора транспортної системи від кількості циклів навчання й різних матриць перехідних імовірностей, на підставі яких сформовано підхід щодо визначення необхідного часу (циклів навчання), необхідний для досягнення заданої надійності навчання. Визначено параметри середовища, за яких забезпечують необхідну ймовірність виконання диспетчером функцій безпомилковості. Виконано розрахунки результувальної функції безпомилковості роботи оператора транспортної системи з використанням усіх елементів. Оптимальну надійність диспетчера визначено на основі розгляду n -ї кількості різних варіантів параметрів середовища й вибору варіанта з мінімальними сумарними витратами.

Ключові слова: залізничний транспорт, оператор транспортної системи, математична модель, диспетчер, професійна підготовка, функція безпомилковості.

Вступ

Залізниця є однією з провідних галузей економіки України. Частка залізничного транспорту на ринку вантажних перевезень складає близько 80 %, а пасажирських – 40 %, тому, зважаючи на це, важливим завданням є організація чіткої роботи усіх галузей.

Порівняно з іншими видами, залізничний транспорт характеризують надійність і регулярність перевезень із високою швидкістю, а рівень енерговитрат, широкі можливості автоматизації перевізного процесу та здатність перевозити масові вантажі на далекі відстані висувають його на перше місце в транспортній системі країни.

Однак забезпеченню безпеки перевезень необхідно приділити особливу увагу як в утриманні технічних засобів транспорту, так і в підвищенні ефективності керівної діяльності машиністів локомотивів і поїзних диспетчерів.

Рух поїзда по ділянці є найвідповідальнішою динамічною частиною перевізного процесу, успішність якого визначають, з одного боку, чіткою взаємодією поїзного диспетчера й машиніста, а з іншого – рівнем професійної підготовки й злагодженістю в роботі локомотивної бригади. Від того, як взаємодіють машиніст і його помічник, як вони доповнюють один одного і компенсують недоліки, властиві кожній людині, залежить успішність і безпека поїздки. Саме злагодженість у роботі диспетчера й машиніста, пильність і винахідливість локомотивної бригади, правильна оцінка ситуації, пунктуальність,

висока відповідальність і витримка є важливими складниками безпеки руху.

Результати соціологічного обстеження щодо найбільш трудомістких диспетчерських функцій представлено у вигляді кругової діаграми на рис. 1. Вибір варіантів диспетчерського регулювання пропуску поїздів (1) і отримання інформації з роздільних пунктів і ведення графіка виконаного руху (ГВР) (2); план поїзної роботи (3). Додатковим є (4) узгодження роботи локомотивів і збір відомостей про стан на станціях (5) і установка маршрутів під час диспетчерської централізації (ДЦ) (6).

У результаті проведених досліджень встановлено, що для підвищення якості роботи поїзного диспетчера й полегшення його праці було автоматизовано такі функції [1]:

- ведення графіка виконаного руху;
- ведення додатків до графіка (отримання й запис даних про склад поїздів);
- вибір варіантів диспетчерського регулювання – оперативна розробка плану-графіка руху поїздів і його поточні коригування (розробка прогнозного графіка). Сюди ж додано й операцію «Складання плану пропуску поїздів по ділянці на початку зміни»;
- складання та реєстрація диспетчерських наказів;
- приготування маршрутів;
- отримання та передача інформації про підходи поїздів.

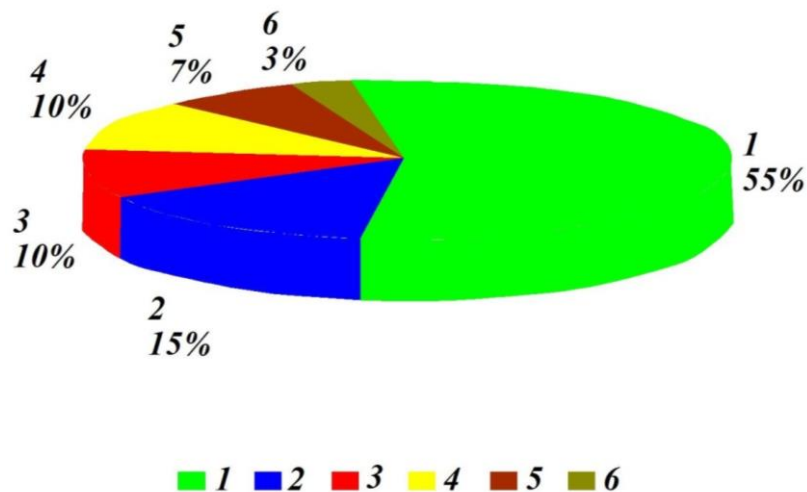


Рис. 1. Процентне співвідношення оцінок найбільш трудомістких диспетчерських функцій (за результатами соціологічного опитування)

Як показали дослідження, на виконання пропонованих для автоматизації функцій поїзні диспетчери витрачають загалом від 45% до 65% тривалості зміни на завантажених ділянках з автоматичним блокуванням або напівавтоматичним автоблокуванням і від 50% до 70% – на ділянках із диспетчерською централізацією.

За сукупністю чинників, що впливають на якість прийнятих рішень оператором транспортної системи (ОТС), можна говорити про розробку системи забезпечення безпомилкової роботи як поїзного диспетчера, так і машиніста локомотива, основою якої є математична модель.

Повністю виключити помилки оператора транспортної системи неможливо, можна лише звести їх до мінімуму, задавшись кількісним показником – імовірністю виконання оператором функцій безпомилковості й розглядаючи його помилки як наслідки відмов системи захисту, виконати покладені на неї функції.

Метою цієї статті є розробка науково обґрунтованого комплексу технічних засобів та їхніх складників, а також організаційно-технічних заходів щодо вдосконалення системи «машиніст-поїзд-диспетчер».

Моделювання процесу професійної підготовки оператора транспортної системи

Розроблена математична модель моделює безпомилковість роботи перевізного процесу та технічних засобів із необхідною надійністю.

Під системою забезпечення безпомилкової роботи (БР) оператора транспортної системи розуміють сукупність складників, що мають між собою зв'язки, взаємини й обмеження, які повинні підтримувати якість прийнятих диспетчером рішень на заданому рівні. Основними елементами-складниками системи є професійна підготовка (ПП); умови праці та організація робочого місця (УП і ОРМ); режим праці і відпочинку (РПВ); ступінь невизначеності інформації (СНІ), що можна виразити залежністю [2]:

$$БР = f(ПП, УП \text{ і } ОРМ, РПВ, СНІ) \quad (1)$$

Під час створення цієї математичної моделі використовували аналітичні залежності теорії математичної безпеки (МБ) [3, 4]. Такий підхід загалом виправданий, тому що з його допомогою можна математично описати клас складників системи захисту з достатньою для практичних розрахунків точністю. Імовірність виконання оператором функцій безпомилковості залежить від великої кількості різних чинників і загалом може бути визначена за формулою:

$$P_{БР} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot \dots \cdot P_n = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (2)$$

де P_i – імовірність виконання диспетчером функцій безпомилковості залежно від впливу i -го фактора; n – кількість факторів.

Надійність роботи цієї системи буде забезпечена за одночасного поєднання цих факторів. Однак за невиконання однією зі складників системи ефективність безпомилкової роботи буде мінімальна (при цьому передбачають, що оператор транспортної системи пройшов професійний відбір і рекомендований для роботи за цією спеціальністю). У нашому випадку $P_{БР}$ дорівнює [5, 6]:

$$P_{БР} = P_{ПП} \cdot P_{УП} \cdot P_{РПВ} \cdot P_{СНІ}, \quad (3)$$

де $P_{ПП}$, $P_{УП}$, ..., $P_{СНІ}$ – імовірність виконання оператором функцій безпомилковості залежно від стану відповідних факторів.

Проведені дослідження свідчать, що близько 60% усіх помилок у роботі припадає на диспетчерів, стаж роботи яких менше за рік або дорівнює одному рокові, це можна пояснити недостатньою професійною підготовкою. Нижче наведено методику підготовки оператора транспортної системи, яка дозволяє підвищити якість навчання.

Процес навчання розглядають як випадковий процес, для опису й вивчення якого застосовують теорію Марковських випадкових процесів, зокрема: однорідний Марковський процес із дискретними станами S_1, S_2, \dots, S_n і дискретним часом τ_0 .

Відповідно до цієї теорії процес навчання повністю визначається матрицею перехідних імовірностей:

$$P_{ij} = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{ij} & \dots & P_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & P_{ij} & \dots & P_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & P_{nn} \end{vmatrix}, \quad (4)$$

де P_{ij} – імовірність переходу процесу навчання зі стану i в стан j через інтервал часу τ_0 ; «0» – імовірність переходу з більш високого рівня на низький рівень; n – кількість різних чинників, що впливають на якість прийнятих рішень оператором транспортної системи.

Під станами S_1, S_2, \dots, S_n розуміють професійну підготовку оператора з ймовірністю виконання функцій безпомилковості (ймовірністю прийняття рішення високої якості) відповідно P_1, P_2, \dots, P_n . Граф станів професійної підготовки оператора транспортної системи представлено на рис. 2.

Ймовірності станів у процесі навчання змінюються, і через проміжок часу τ їх визначають за формулою:

$$P_i(k) = P_i(k-1) \sum_{j=1}^n P_{ij}(k-1), \tag{5}$$

де $P_i(k-1)$ – ймовірність професійної підготовки диспетчера за $(k-1)$ циклів.

Крива 1 позначає рівень професійної підготовки оператора транспортної системи під час поетапного переходу з 1-го стану в 5-й стан (див. рис. 3).

Крива 2 позначає рівень професійної підготовки оператора транспортної системи під час поетапного переходу з 1-го стану в 3-й стан, потім в 5-й стан.

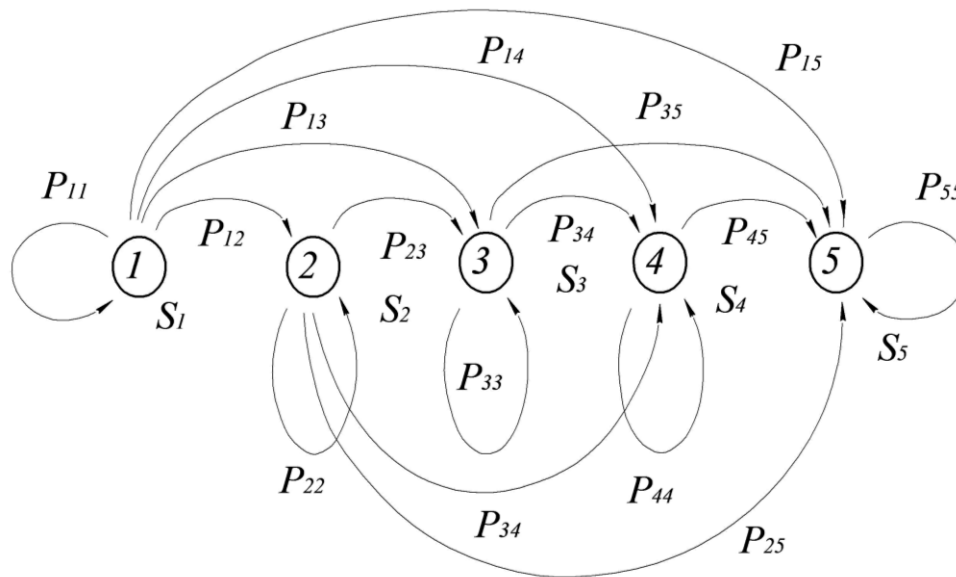


Рис. 2. Граф станів процесу професійної підготовки оператора транспортної системи

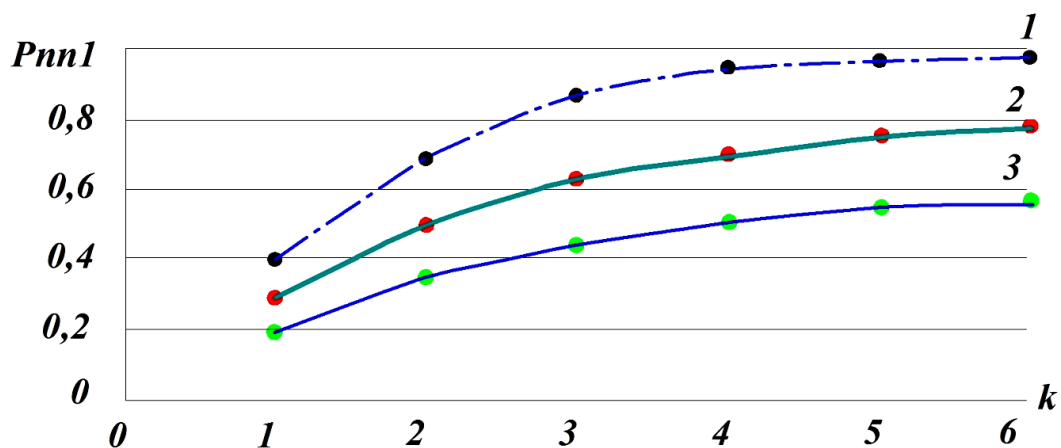


Рис. 3. Залежність надійності професійної підготовки оператора транспортної системи від кількості циклів навчання і різних матриць перехідних ймовірностей

Крива 3 позначає рівень професійної підготовки оператора транспортної системи під час поетапного переходу з 1-го стану у 2-й, з 2-го на 3-й, потім з 3-го стану в 4-й, з 4-го стану в 5-й стан.

Імовірність значення P_{III} під час k циклів навчання можна визначити за формулою:

$$P_{III}(k) = 1 - \prod_{j=1}^k (1 - P_{IIIj}), \quad (6)$$

де P_{IIIj} – імовірність професійної підготовки оператора транспортної системи на кожному циклі навчання.

З огляду на рівень початкових знань (задаємо ймовірність $p_l = 0,9$; і $0,8$) і кількість циклів навчання, можна за допомогою програми «STATISTIKA» знайти ймовірність професійної підготовки оператора на кожному циклі навчання.

Вихідні дані отримані в результаті статистичної обробки опитування операторів транспортної системи (відповіді на анкету з виявлення рівня професійної підготовки ОТС, що складається зі ста питань): «0,5; 0,8; 0,9» – імовірність того, що оператор транспортної системи після циклу навчання нічому не навчився; «0,5; 0,2; 0,1» – імовірність того, що ОТС після циклу навчання навчився; «1,0» – імовірність того, що оператор транспортної системи проходив курс навчання повторно й нічого не забув; «0» – імовірність того, що знання оператора транспортної системи після циклу навчання стали на рівень нижче.

Чим більша ймовірність переходу на останньому етапі за знаннями, тим менше різниця за ступенем надійності. Ці криві також дозволяють визначити, скільки часу (циклів навчання) буде потрібно для досягнення заданої надійності навчання.

У цьому випадку величина P_m відповідатиме значенню $P_m(k)$. Другим складником і водночас фактором, що визначає ймовірність виконання диспетчером функцій безпомилковості, є умови праці та організація робочого місця диспетчера.

У цьому випадку величина P_{VII} і OPM відповідатиме значенню $P_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Залежність інтенсивності виникнення помилок у роботі як диспетчера, так і машиніста від параметрів середовища можна апроксимувати рівнянням виду:

$$\lambda = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n, \quad (7)$$

де $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ – коефіцієнти регресії, які визначають на основі експериментальних даних; x_1, x_2, \dots, x_n – параметри середовища.

Імовірність виконання диспетчером функцій безпомилковості залежно від i -х параметрів умов праці й організації робочого місця може бути визначена за формулою:

$$P_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = \exp(-\lambda_i), \quad (8)$$

де λ_i – інтенсивність виникнення помилок у роботі диспетчера, відповідна i -му параметру умов праці та організації робочого місця.

Підбираючи параметри середовища, можна домогтися необхідної ймовірності виконання диспетчером функцій безпомилковості. Оптимальну надійність диспетчера визначають на основі розгляду n -ї кількості різних варіантів параметрів середовища й вибору варіанта з мінімальними сумарними витратами на формування середовища й соціально-економічними втратами, зумовленими виникненням помилок під час прийняття диспетчером управлінських рішень:

$$E_I = C_{COI} + v_i, \quad (9)$$

де C_{COI} – витрати на формування i -го середовища; v_i – соціально-економічні втрати, зумовлені виникненням помилок диспетчера під час прийняття управлінських рішень.

Режим праці й відпочинку має суттєвий вплив на працездатність диспетчера й на ймовірність виконання ним функцій безпомилковості [7, 8]. Режим праці й відпочинку характеризують два основні показники: тривалість безперервної роботи τ і перерви на відпочинок $t_{відп}$ [9]. Тривалість відпочинку залежить від часу безперервної роботи диспетчера й дорівнює:

$$t_{\text{відн}} = k \cdot \tau, \tag{10}$$

де k – коефіцієнт пропорційності, який визначають залежно від ступеня напруженості праці.

Інтенсивність виникнення помилок за тривалості безперервної роботи τ складе:

$$\lambda(\tau) = a + b\tau, \tag{11}$$

де a, b – коефіцієнти.

У цьому випадку величина $P_{\text{РПВ}}$ відповідатиме значенню $R_i(\tau_i)$. Надійність диспетчера щодо виконання функцій безпомилковості, відповідна i -му режиму праці та відпочинку, дорівнюватиме:

$$R_i(\tau_i) = \exp\left[-\int_0^{\tau_i} (a + b\tau) d\tau\right]. \tag{12}$$

Задаючись необхідною надійністю диспетчера R_{mp} , можна визначити допустиму тривалість безперервної роботи τ_{mp} . Отримаємо:

$$\ln R_{mp} = -\int_0^{\tau_{mp}} (a + b\tau) d\tau. \tag{13}$$

Підставивши отриманий вираз у рівняння й виконавши необхідні перетворення, отримаємо рівняння для визначення часу τ :

$$\tau^2 + \frac{2a}{b} \cdot \tau + \frac{2}{b} \cdot \ln R_{mp} = 0. \tag{14}$$

Звідки:

$$\tau_{1,2} = -\frac{a}{b} \pm \sqrt{\left(\frac{a}{b}\right)^2 - \frac{2}{b} \ln R_{mp}}. \tag{15}$$

Імовірність виконання диспетчером функцій безпомилковості залежить і від рівня невизначеності інформації. У системах диспетчерського управління джерелами невизначеностей є властивості так званого каналу зв'язку, фізичних середовищ і процесів, що забезпечують збір, передачу й перетворення безлічі повідомлень у задану безліч прийнятих повідомлень [10, 11, 12].

Спочатку визначимо, яка середня кількість інформації, переданої по каналу з кожним посланим повідомленням. Припустимо, що дано безліч входів $X=\{x\}$ і безліч виходів $Y=\{y\}$. Припустимо далі, що кожному надісланому x відповідає єдиний y і що послідовні пари $x - y$ незалежні.

Дослідження показали, що між кількістю помилок диспетчерів і ступенем невизначеності інформації, яка надходить до диспетчера, має місце пряма залежність (див. рис. 4).

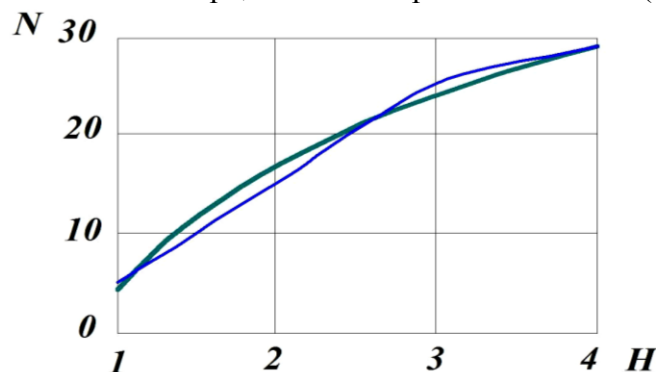


Рис. 4. Залежності кількості помилок в роботі оператора транспортної системи N від невизначеності інформації H , яка надходить до нього

За використання ступеня невизначеності для кількісної оцінки невизначеності інформації залежність інтенсивності помилок диспетчера носить криволінійний характер і може бути представлена на рис. 5.

На рис. 6 приведена залежність надійності диспетчера від ступеня невизначеності інформації та коефіцієнта b .

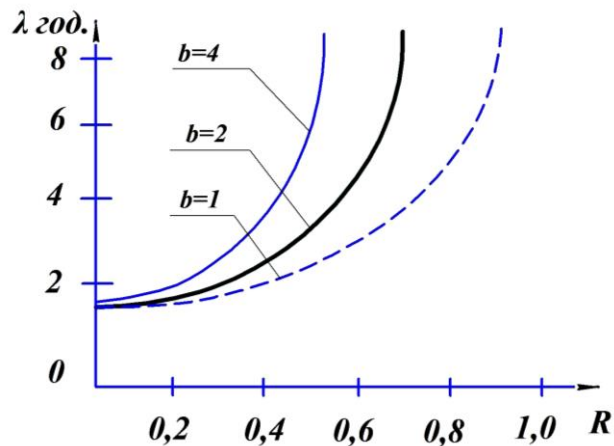


Рис. 5. Залежність інтенсивності помилок диспетчерів від ступеня невизначеності інформації (при $a = 1$)

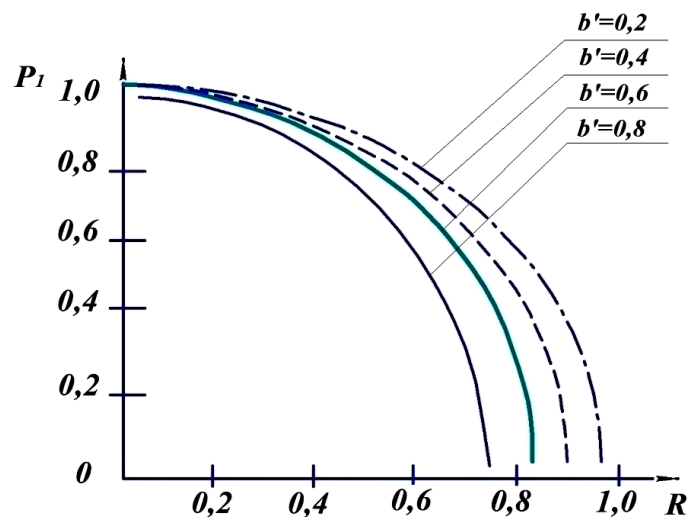


Рис. 6. Залежність імовірності виконання диспетчером функцій безпомилковості від ступеня невизначеності інформації (при $a=0$)

Результівну функції безпомилковості роботи оператора транспортної системи було розраховано з використанням усіх елементів. У результаті розрахунків було отримано коефіцієнт працездатності і надійності цієї системи, який дорівнює 0,97. У деяких випадках, коли один зі складників менше за задані, необхідно провести комплекс організаційно-технічних заходів для підвищення надійності й працездатності кожного складника окремо для цієї системи. У розробленій системі на диспетчера загалом можуть бути покладені різні за складністю функції безпомилковості. Диспетчер не повинен мати протипоказань до виконання функцій безпомилковості. Обов'язковою умовою є успішне проходження ним професійної підготовки (експериментальні дослідження з використанням новітніх комп'ютерних технологій). Пропонована математична модель опису системи забезпечення безпомилкової роботи дозволяє отримати різні варіанти захисту трудової діяльності операторів від появи помилок і вибрати з варіантів захисту найраціональніший.

Рекомендована модель може бути використана в розрахунках під час проектування прикладних задач у різних системах.

Висновки

У роботі запропоновано математичну модель, що дозволяє описати різні чинники негативного впливу на якість прийнятих рішень оператором транспортної системи (поїзним диспетчером і машиністом локомотиву), де складниками є: професійна підготовка, умови праці та організація робочого місця, режим праці та відпочинку, ступінь невизначеності інформації, що надходить до оператора. Пропонована математична модель опису системи забезпечення безпомилкової роботи дозволяє отримати різні варіанти захисту трудової діяльності операторів від появи помилок і обрати найраціональніший.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кармазіна О. О. Процентне співвідношення оцінок найбільш трудомістких диспетчерських функцій. Результати соціологічного обстеження / О. О. Кармазіна. – Вид-во “Транспорт”, Київ, 2018. – 142 с.
2. Безопасность жизнедеятельности на железнодорожном транспорте: учебник для вузов ж.-д. транспорта / [К. Б. Кузнецов, В. К. Васин, В. И. Купаев и др.] ; под ред. К. Б. Кузнецова. – М. : Маршрут, 2017. – 576 с.
3. Ененков В. Г. Влияние переменной шумовой нагрузки на надежность работы человека-оператора / В. Г. Ененков, А. А. Рессин // Теория и практика охраны труда. – 2010. – С. 37 – 41.
4. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: Исследование, проектирование, испытания : справочник / [А. Н. Адаменко, А. Т. Ашерев, И. А. Бердников и др.] ; под общ. ред. А. И. Губинского. – М. : Машиностроение, 2016. – 528 с.
5. Чернов Е. Д. Проектирование высоконадежных систем безопасности производственных процессов / Е. Д. Чернов. – Новосибирск : СГАПС, 2018. – 231 с.
6. Козубенко В. Г. Безопасное управление поездом: вопросы и ответы : учебное пособие [для образовательных учреждений ж.-д. транспорта, осуществляющих профессиональную подготовку] / В. Г. Козубенко. – М. : Маршрут, 2014. – 320 с.
7. Романова И. Ю. Влияние автоматизации рабочих мест на содержание и эффективность деятельности поездных диспетчеров : автореф. дис. на соис, учен. степ. канд. техн. наук : спец. 05.22.08. – Управление процессами перевозок / И. Ю. Романова. – СПб, 2001. – 28 с.
8. Рачинська А. В. Класифікація ризиків на залізничному транспорті як основа формування системи економічної безпеки його функціонування / А. В. Рачинська // Економіка і суспільство. – 2016. – № 6. – С. 81 – 87.
9. Себестоимость железнодорожных перевозок : учебник [для вузов ж.-д. транспорта] / [Н. Г. Смехова, А. И. Купоров, Ю. Л. Кожевников и др.] ; под ред. Н. Г. Смеховой и А. И. Купорова. – М. : Маршрут, 2015. – 494 с.
10. Чернецька-Білецька Н. Б. Впровадження єдиної системи кодування рухомого складу залізничного транспорту / Н. Б. Чернецька-Білецька, І. О. Баранов // Вісник Східноукраїнського Національного університету імені Володимира Даля. – 2019. – № 2 (250). – С. 116 – 119.
11. Чернецкая-Белецкая Н. Б. Анализ вариантов управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте в условиях неравномерности / Н. Б. Чернецкая-Белецкая, И. О. Баранов, Д. О. Солдаткин // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2015. – №1 (218). – С. 107 – 109.
12. Influence of use of energy storage on emissions of pollutant substances by a maneuver lokomotive [Electronic resource] / R. Yarovoy, N. Chernetskaya-Beletskaya, E. Mikhailov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 4, № 10 (100). – Access mode : <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/176908>.

Стаття надійшла до редакції 18.09.2020.

Стаття пройшла рецензування 25.09.2020.

Чернецька-Білецька Наталія Борисівна – д. т. н., професор, завідувачка кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті», e-mail: logistyka.snu.edu.ua@gmail.com.

Баранов Ігор Олегович – к. т. н., доцент кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті», e-mail: baranov_90@ukr.net.

Мірошникова Марія Володимирівна – старший викладач кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті», e-mail: citroen4ik@gmail.com.

Кужель Сергій Геннадійович – магістрант кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті».

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля.