

УДК 629.4.053

*О. Б. Бабанін, д. т. н, професор
(професор кафедри «Експлуатація та ремонт рухомого складу», Український державний університет залізничного транспорту,
м. Харків)*

*О. М. Горобченко, к. т. н, доцент
(докторант кафедри «Експлуатація та ремонт рухомого складу»,
Український державний університет залізничного транспорту,
м. Харків)*

**ВИЗНАЧЕННЯ ЦІЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ
ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ В ЕРГАТИЧНІЙ СИСТЕМІ
«МАШИНІСТ – СППР – ПОЇЗД» НА ПІДСТАВІ КРИТЕРІЮ
КОРИСНОСТІ**

Розроблено математичний апарат для визначення корисності рішень, що виробляються інтелектуальною СППР для локомотивних бригад. Перевагою даного критерію є можливість обліку та прогнозування не тільки показників ефективності використання локомотивів, а і безпеки руху. Величина корисності виражена в грошовому еквіваленті. Отримана цільова функція для оптимізації управління поїздом за критерієм корисності. Для реалізації вибирається рішення, при якому вартість експлуатації на найближчий прогнозний відрізок часу мінімальна.

Ключові слова: потяг, СППР, локомотивна бригада, корисність рішення, інтелектуальне управління.

Разработан математический аппарат для определения полезности решений, вырабатываемых интеллектуальной СППР для локомотивных бригад. Преимуществом данного критерия является возможность учета и прогнозирования не только показателей эффективности использования локомотивов, но и безопасности движения. Величина полезности выражена в денежном эквиваленте. Получена целевая функция для оптимизации управления поездом по критерию полезности. Для реализации выбирается решение, при котором стоимость эксплуатации на ближайший прогнозный отрезок времени минимальна.

Ключевые слова: поезд, СППР, локомотивная бригада, полезность решения, интеллектуальное управление

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями. Раціональне керування транспортною системою є складним багатofакторним завданням.

© Бабанін О. Б., Горобченко О. М., 2014

Математичний апарат, що є теоретичним підґрунтям для його вирішення, постійно розширюється і розвивається разом з розвитком самого транспорту. Традиційний математичний апарат вже не повною мірою виконує свої функції з опису керування системою складних транспортних об'єктів.

Для уникнення надмірної складності (а відтак і труднощів практичного впровадження) все більше науковців використовують інструменти теорії штучного інтелекту. Розробка та впровадження інтелектуальних систем керування на транспорті є актуальним завданням, що дозволить підвищити ефективність експлуатації транспортних засобів.

Аналіз досліджень і публікацій. Теорія штучного інтелекту і основ інтелектуальних систем керування постійно розширюються і вдосконалюються [1 – 3]. Впровадження інтелектуальних систем на залізничному транспорті є одним з пріоритетних напрямів досліджень [4, 5]. У роботі [6] описані сутність, призначення та принципи побудови інтелектуальних технологій, характерні для сучасного залізничного транспорту. Однак у порівнянні з проблемою керування транспортними системами в цілому, питанням розробки бортових локомотивних інтелектуальних керівних систем в теперішній час приділяється значно менше уваги.

Визначення мети та задачі дослідження. Розробка СППР для локомотивних бригад є перспективним завданням для підвищення безпеки та ефективності використання тягового рухомого складу. Оцінка якості рішень, що виробляються СППР, проводиться за абстрактним критерієм корисності. Для підвищення якості оцінки рішень та визначення напрямків зниження собівартості перевезень в статті визначається цільова функція для оптимізації процесу керування поїздом на підставі критерію корисності.

Основна частина дослідження. В роботі [7] було отримано вираз для визначення корисності рішень, що приймає локомотивна СППР:

$$|P| = \sqrt{X_{\text{НС}}^2 + G_{\text{П}}^2 + \Delta t^2} \quad (1)$$

де P – умовна величина корисності рішення;

$X_{\text{НС}}$ – складність нештатної ситуації (НС), яка прогнозується у разі реалізації рішення;

$G_{\text{П}}$ – прогнозовані витрати палива (енергії) на рух поїзда;

Δt – прогнозоване відхилення від графіка руху.

Вираз (1) вказує на структуру показника корисності P , але потребує доробки з метою приведення всіх складових до єдиної системи вимірювання. Вираження параметрів складності НС, витрати палива (електроенергії) та відхилення від графіка руху у безрозмірних коефіцієнтах на перший погляд виглядає найпростішим виходом. Але ці коефіцієнти не достатньо інформативні і не явно виражають процеси під час ведення поїзда. Однією з основних вимог до використання засобів транспорту є висока ефективність, яка пов'язана з таким важливим показником, як вартість експлуатації. Тобто пропонується корисність дії інтелектуального агента зв'язати з вартістю експлуатації рухомого складу на прогнозний період і прагнути до зменшення цієї вартості.

Найбільш просто визначається вартість витраченого пального на прогнозний період:

$$B_{\text{П}} = G_{\text{П}} \cdot \epsilon_{\text{П}} \quad (2)$$

де $G_{\text{П}}$ – витрата палива (електроенергії) на прогнозний період часу, кг (кВт·год);

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$v_{\text{п}}$ – вартість одиниці палива, грн/кг (грн/кВт•год)

Втрати від невиконання графіку руху для вантажних поїздів обчислюються наступною сумою:

$$V_{\text{ГР}}(\Delta t) = V_{\text{ЛГ}} + V_{\text{ПГ}} + V_{\text{БГ}} \quad (3)$$

Складові цього виразу визначаються таким чином.

Витрати по локомотиво-годинам для одного затриманого на станції поїзда, грн, будуть складати:

$$V_{\text{ЛГ}} = E_{\text{ЛГ}}^{\text{вант}} \cdot \Delta t \quad (4)$$

де Δt – час затримки одного вантажного поїзда, год;

$E_{\text{ЛГ}}^{\text{вант}}$ – питомі витрати на одну тепловозо-годину вантажного руху, грн.

Витрати по поїздо-годинам одного затриманого вантажного поїзда, грн, будуть складати:

$$V_{\text{ПГ}} = E_{\text{ПГ}}^{\text{вант}} \cdot \Delta t \quad (5)$$

де Δt – час затримки одного вантажного поїзда, год;

$E_{\text{ПГ}}^{\text{вант}}$ – питомі витрати на одну поїздо-годину вантажного руху, грн.

Витрати по бригадо-годинам одного затриманого вантажного поїзда, грн., будуть складати:

$$V_{\text{БГ}} = E_{\text{БГ}}^{\text{вант}} \cdot \Delta t \quad (6)$$

де Δt – час затримки одного вантажного поїзда, год;

$E_{\text{БГ}}^{\text{вант}}$ – питомі витрати на одну тепловозо-годину вантажного руху, грн.

Визначення складності НС через грошовий вимір можливе з використання теорії ризиків. Оцінка ризику складається в його кількісному вимірі, тобто визначенні можливих наслідків реалізацій небезпек.

В рамках технократичної концепції після ідентифікації небезпек (виявлення принципово можливих ризиків) потрібно оцінити їхній рівень і наслідки, тобто імовірність відповідних подій і пов'язаний з ними потенційний збиток [8]. Існують три методи оцінювання ризику: феноменологічний, детерміністський та імовірнісний. Для процесу руху поїзда необхідно використовувати останній метод, що передбачає як оцінку імовірності виникнення аварії, так і розрахунок відносних імовірностей того або іншого шляху розвитку процесів. При цьому аналізується розгалужені ланцюги подій і відмов вузлів та агрегатів локомотива та вагонів. Розрахункові математичні моделі в цьому випадку можна значно спростити у порівнянні з детерміністськими схемами розрахунку.

Основні обмеження імовірнісного аналізу безпеки пов'язані з недостатніми відомостями про функції розподілення параметрів, а також недостатніми статистичними даними про відмови обладнання. Однак імовірнісний метод вважається одним з найперспективніших. На його базі можуть бути побудовані різноманітні методики оцінки ризиків на транспорті, що, залежно від використовуваної інформації, поділяються на статистичні, теоретико-імовірнісні та евристичні.

Для оцінювання ризику необхідні кількісні показники. Вони повинні забезпечувати порівнянність ступеня небезпечності різних ситуацій [9,10]. Поняття ризику пов'язується з можливістю виникнення достатньо рідкісних подій, а саме: інцидентів, аварій або катастроф на залізничному транспорті. В нашому розу-

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

мінні ризик – це імовірність $Q(T_{np})$ настання події за інтервал часу, на який робиться прогноз T_{np} . Цю величину пропонується розрахувати таким чином:

$$Q(T_{np}) = X_{НС}(T_{np}) \cdot k_{ЛФ} \quad (7)$$

де $X_{НС}(T_{np})$ – прогнозне значення параметру складності НС на період T_{np} ;

$k_{ЛФ}$ – коефіцієнт, що враховує вплив людського фактора на розвиток транспортної події $k_{ЛФ}$ (0; 1).

Смисл виразу (7) полягає в тому, що на імовірність виникнення транспортної події впливають два основних чинника: несприятливі обставини, що можуть скластися під час ведення поїзда ($X_{НС}$), та дії локомотивної бригади в цих обставинах ($k_{ЛФ}$).

Величина коефіцієнта $k_{ЛФ}$ отримана в роботі [11]:

$$k_{ЛФ} = 1 - \frac{5}{C_{\delta}} e^{\frac{x_{ze}}{\mu_{po}}} \quad (8)$$

де C_{δ} – середній бал за результатами навчання в дортехшколі або технічних навчань в депо;

5 – максимальний бал за п'ятибальною шкалою оцінювання знань;

x_{ze} – коефіцієнт зовнішніх впливів на локомотивну бригаду;

μ_{po} – узагальнений показник психофізіологічного стану робітника за даними обстеження [12, 13].

Також ризик характеризується розміром збитку w від події у вартісному вираженні. Загальним показником ризику є математичне очікування збитку від події:

$$\bar{W} = Q(T_{np}) \cdot w \quad (9)$$

де w – оцінний збиток при виникненні транспортної події.

Вводячи до розрахунку величини $X_{НС}$, отримуємо такий вираз:

$$\bar{W} = X_{НС}(T_{np}) \cdot k_{ЛФ} \cdot w \quad (10)$$

Беручи до уваги вищенаведені способи корегування розрахунку корисності дії та вираження корисності через грошовий еквівалент, з урахуванням роботи [7] модель подамо в такому вигляді:

$$\begin{aligned} |P| &= \sqrt{\bar{W}^2 + B_{II}^2 + B_{ГР}^2} \Rightarrow \min \\ \bar{W} &= X_{НС}(T_{np}) \cdot k_{ЛФ} \cdot w, \\ B_{II} &= G_{II} \cdot b_{II}, \\ B_{ГР} &= B_{ЛГ} + B_{ПГ} + B_{БР} \end{aligned} \quad (11)$$

$$T_{np \max} \leq \frac{3600v_n}{\zeta(b_z(v_n/2) + w_o(v_n/2) + i(s_n))}$$

$$T_{np} = T_{np \max} / n, \text{ при } 1 \leq n \leq T_{np \max} / t_{нк \min}$$

$$X_{НС} = f(x_{лф}(T_{np}); (x_{тф}(T_{np}); (x_{зф}(T_{np})),$$

$$G_{II} = g_i \cdot T_{np}, \text{ при } F_{к \text{ пот}} \in (f_{к \text{ ср}}, \alpha', \beta') = \frac{4.17((v'_к - v'_н)^2), \alpha^2, \beta^2}{s} + w_{к \text{ ср}},$$

$$\Delta t = s/V_{гр} - s/V_{ф},$$

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

де $t_{\text{пк min}}$ – мінімальний час між переведеннями рукоятки контролера з позиції на позицію, с; $T_{\text{пр}}$ – розрахунковий прогнозний термін, с;

n – коефіцієнт, що вказує на скільки проміжків доцільно розбити прогнозний термін для подальшого розрахунку; $X_{\text{НС}}$ – складність можливої нештатної ситуації; \bar{W} – математичне очікування збитку від транспортної події, грн;

w – оцінний збиток при виникненні транспортної події, грн;

$G_{\text{П}}$ – витрати палива на тягу, кг;

$B_{\text{П}}$ – витрати на паливо впродовж прогнозного терміну, грн ;

$B_{\text{ГР}}$ – витрати від невиконання графіка руху, грн ;

$F_{\text{к пот}}$ – поточне значення дотичної сили тяги локомотива, кН;

$(f_{\text{к ср}}, \alpha', \beta')$ – середнє значення дотичної сили тяги, яка потрібна для руху поїзда на даній ділянці (у непарного числа), кН;

$V_{\text{гр}}$ – графікова швидкість руху поїзда, м/с;

$V_{\text{ф}}$ – фактична швидкість руху поїзда, м/с;

s – довжина ділянки, на якій знаходиться поїзд, м;

Δt – відхилення від графіка руху, с;

P – корисність дії інтелектуального агента, грн.

Величина P базова для визначення подальших дій інтелектуального агента. Процес вибору найкращого рішення зводиться до перебирання всіх можливих керівних дій, що можуть бути використані машиністом в поточний проміжок часу і знаходження дії, параметр P якої буде мінімальним.

Метою оптимізації керування локомотивом є визначення такого керування тяговим $F(t)$ та гальмівним $B(t)$ зусиллями і відповідної траєкторії руху поїзда $v(t)$ та $s(t)$, що забезпечують мінімальну вартість перевізного процесу (мінімальне значення критерію P).

Функціонал, що мінімізується, з урахуванням (11) має вигляд:

$$P = \int_0^{T_{\text{пр}}} \sqrt{\bar{W}^2 + B_{\text{П}}^2 + B_{\text{ГР}}^2} dt \quad (12)$$

де $T_{\text{пр}}$ – повний час руху поїзда по ділянці.

Висновки та пропозиції. В роботі отримана модель визначення корисності рішення СППР для локомотивних бригад, що містить цільову функцію мінімізації витрат на експлуатацію рухомого складу на прогнозний період часу. Такий підхід дозволяє оцінити якість вироблених рішень не тільки з точки зору безпосередніх витрат на тягу, але і врахувати показник безпеки руху. Приведення показника P до грошового еквіваленту найбільш наочно показує вплив змін кожного критерію на кінцевий результат корисності дії, що прогнозується.

ЛІТЕРАТУРА

1. Рассел С., Искусственный интеллект. Современный подход. Пер. с англ. [Текст] / С. Рассел, П. Норвиг. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1408 с.
2. Колесников А. В. Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки. [Текст] / А. В. Колесников – СПб: Издательство СПб ГТУ, 2001. – 700 с.
3. Negenborn R.R. Intelligent Infrastructures (Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering) [Текст] / R.R Negenborn, Z. Lukszo, H. Hellendoorn – NY.:Springer, 2009 – 529 p.
4. Intelligent Transport Systems (ITS) for sustainable mobility. [Текст] / UN, Economic Commission for Europe, UNECE. Geneva, February 2012. – 120 pp.
5. Modern Transport Telematics / Ed. Jerzy Mikulski //11th International Conference on Transport Systems Telematics, [Текст] / TST 2011. Katowice-Ustron, Poland, October 19-22, 2011. – 418 p.

6. Скалозуб В. В. Интеллектуальные транспортные системы железнодорожного транспорта (основы инновационных технологий) [Текст] / В. В. Скалозуб, В. П. Соловьев, И. В. Жуковицкий, К. В. Гончаров. – Д.: Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2013. – 207 с.
7. Горобченко О. М. Формалізація задачі поточної оцінки безпеки руху при управлінні локомотивом [Текст] / О. М. Горобченко // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – Вип. 24. – К.: ДЕТУТ, 2014. – С. 214 – 221
8. Акимов В.А. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах [Текст] / В.А. Акимов, В.В. Лесных, Н.Н. Радаев. – М.: Деловой экспресс, 2004
9. Королев В.Ю. Математические основы теории риска. [Текст] / В.Ю. Королев, В. Е. Бенинг, С. Я. Шоргин. – М.: Физматлит, 2011. – 591 с.
10. Радаев Н. Н. Прогноз вероятности аварии при перевозках радиационно опасных объектов железнодорожным транспортом [Текст] / Н. Н. Радаев // Атомная энергия, – 1998. Т. 85. – Вып. 5. – С. 400 – 407.
11. Ломотько Д. В., Горобченко О. М. Аналітичне вираження ступеня впливу людського фактора на імовірність транспортної події [Текст] / Д. В. Ломотько, О. М. Горобченко // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – Вип. 26 – Донецьк, 2011. – С. 115 – 119.
12. Самсонкин В. Н. Прогнозирование надежности железнодорожных операторов [Текст] / В. Н. Самсонкин // Информационно-управляющие системы на ж. д. трансп. – Х., 1996. – № 5. – С. 54–55.
13. Самсонкин В. Н. Автоматизированный психофизиологический комплекс для профессионального отбора операторов железнодорожного транспорта [Текст] / В. Н. Самсонкин, И. Г. Мартыненко, И. М. Фисько // Материалы Первого междунар. симпозиума «Актуальные проблемы транспортной медицины», посвященного 25-летию Украинского НИИ медицины транспорта (27–28 июля 2000 г.). – Одесса: Друк, 2000. – С. 234 – 236.

Oleksandr B. Babanin, Doctor of Science (Technical Sciences), Professor (Professor of Maintenance and Repair of Rolling Stock Chair, Ukrainian State University of Railway Transport)

Oleksandr M. Gorobchenko, PhD (Technical Sciences) (Doctoral Candidate, Maintenance and Repair of Rolling Stock Chair, Ukrainian State University of Railway Transport)

DEFINITION OF THE OBJECTIVE FUNCTION FOR THE OPTIMIZATION OF PROCESS CONTROL IN THE HUMAN-MACHINE SYSTEM «DRIVER-DSS-TRAIN» ON THE BASIS OF THE CRITERION OF UTILITY

Development and implementation of intelligent transport management systems is an important task that will improve the operational efficiency of vehicles. To improve the quality assessment solutions in the sector and reduce the cost of transport in the article the objective function to optimize control train based on the criterion of utility.

A mathematical apparatus for determining the usefulness of decisions made in intelligent decision support system for locomotive crews. The value of criterion of utility base to determine further action intelligent agent. The process of selecting the best solution is reduced to taking over all possible control measures that could be used by the driver in the current time period and of the action parameter criterion of utility which will be minimal. The advantage of this criterion is the ability to inventory and forecasting not only performance using locomotives, but also safety. Prediction safety is performed using the theory of risk. Calculated expectation damages that may arise in the implementation of the decisions being checked. Bringing index

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

P monetary equivalent to most clearly shows the effect of changes in each criterion on the final result of utility actions that predicted. The resulting objective function for optimizing train the criterion of utility. To implement the chosen solution in which the operating cost forecast for the next period of time is minimal.

Keywords: train, DSS, the locomotive crew, utility solutions, intelligent control

REFERENCES

1. S. Rassel, P. Norvig .Iskusstvennyj intellekt. Sovremennyj podhod. Per. s angl. [Artificial Intelligence. The modern approach]. – Moscow: Publ. «Vil'jams», 2006. – 1408 p.
2. Kolesnikov A. V. Gibridnye intellektual'nye sistemy. Teorija i tehnologija razrabotki. [Hybrid intelligent systems. Theory and technology development.] – St. Pererburge: Publ. SPb GTU, 2001. – 700 p.
3. Negenborn R.R. Intelligent Infrastructures (Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering) / R.R. Negenborn, Z. Lukszo, H. Hellendoorn. – NY.: Springer, 2009. – 529 p.
4. *Intelligent Transport Systems (ITS) for sustainable mobility.* / UN, Economic Commission for Europe, UNECE. – Geneva, February 2012. – 120 p.
5. *Modern Transport Telematics* / Ed. Jerzy Mikulski //11th International Conference on Transport Systems Telematics, / TST 2011. Katowice-Ustron, Poland, October 19-22, 2011. – 418 p.
6. V.V. Skalozub V. P. Solov'ev, I. V. Zhukovickij, K. V. Goncharov. Intellektual'nye transportnye sistemy zheleznodorozhnogo transporta (osnovy innovacionnyh tehnologij) [Intelligent transport rail system (based on innovative technologies)]. – Dnipropetrovsk: Publ. DNURT, 2013. – 207 p.
7. Gorobchenko O. M. Formalizacija zadachi potocnoji ocinki bezpeki ruhu pri upravlinni lokomotivom [Formal analysis of current assessment of safety in the management engine] / O. M. Гогобченко // Collected Works of the State Economic and Technological University of Transport Ministry of Education and Science of Ukraine series «Transport Systems and Technologies». – Vol. 24. – Kyiv: DETUT, 2014. – P. 214-221
8. V.A. Akimov, V.V. Lesnyh, N.N. Radaev. Osnovy analiza i upravlenija riskom v prirodnoj i tehnogennoj sferah [Principles of analysis and risk management of natural and man-made areas]. – Moscow: Publ. Delovoj jekspress, 2004.
9. V.Ju. Korolev, V. E. Bening, S. Ja. Shorgin. Matematicheskie osnovy teorii riska. [Mathematical foundations of the theory of risk.] – Moscow, Fizmatlit Publ., 2011. – 591 p.
10. Radaev N. N. Prognoz verojatnosti avarii pri perevozkah radiacionno-opasnyh ob#ektov zheleznodorozhnym transportom [Forecast the probability of an accident involving hazardous radiation facilities by rail. – Moscow: Atomnaja energija Publ., 1998. – V. 85. – P. 400 – 407.
11. Lomot'ko D. V., Gorobchenko O. M. Analitichne virazhennja stupenju vplivu ljuds'kogo faktoru na imovirmist' transportnoi podii [Analytical expression level of human factor on the probability of traffic accident] // Collected Works of DonIZT. – vyp. 26. – Donetsk, 2011. – P. 115 – 119.
12. Samsonkin V. N. Prognozirovanie nadezhnosti zheleznodorozhnyh operatorov [Predicting the reliability of rail operators] / Information management systems for rail transp. – Kharkov, 1996. – № 5. – P. 54–55.
13. V. N. Samsonkin, I. G. Martynenko, I. M. Fis'ko. Avtomatizirovannyj psihofiziologicheskij kompleks dlja professional'nogo otbora operatorov zheleznodorozhnogo transporta [Automated psychophysiological complex for professional selection of operators of rail transport] / Proceedings of the First Int. Symposium «Actual problems of transport medicine» devoted 25 letiyu Ukrainian Research Institute of Transport Medicine (27-28 July 2000) . Odessa. – P. 234–236.