

УДК 656.2

## РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВПЛИВУ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ МАШИНІСТА НА ПРОЦЕС КЕРУВАННЯ ЛОКОМОТИВОМ

Д-р філософії О. В. Неведров, д-р техн. наук О. М. Горобченко,  
аспіранти В. В. Білоцький, В. С. Терещенко

## DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE INFLUENCE OF THE DRIVER'S PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATE ON THE LOCOMOTIVE CONTROL PROCESS

PhD O.V. Nevedrov, Dr. Sc. (Tech.) O. M. Gorobchenko,  
postgraduate student V. V. Bilotsky, postgraduate student V. S. Tereshchenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362544>



**Анотація.** У статті розглянуто аспекти впливу стресового стану на ефективність роботи машиніста залізничного транспорту, зокрема в умовах критичних поїзних ситуацій. Окрему увагу приділено формалізації параметра напруженості машиніста за допомогою математичного аналізу. Розглянуто роль психофізіологічних факторів для ухвалення рішень, які впливають на безпеку руху поїздів. Запропоновано застосування математичних моделей для оцінювання рівня стресу та напруженості машиніста в різних ситуаціях, а також можливість використання цих моделей для удосконалення систем управління.

**Ключові слова:** залізничний транспорт, напруженість машиніста, стреси, критичні поїзні ситуації, психофізіологічні параметри, безпека руху.

**Annotation.** The article examines the aspects of the influx of stress on the effectiveness of the work of an emergency transport driver, especially in critical situations. Respect is given to the formalization of the driver's stress parameter with the help of mathematical analysis. The role of psychophysiological factors in making decisions regarding the safety of trains is examined. The development of mathematical models for assessing the level of stress and strain of the driver in various situations, as well as the possibility of using these models for the development of control systems, has been demonstrated. Stressful situations can result from unforeseen circumstances, such as a breakdown in storage, loss of weather consciousness, technical problems on the track or on the route. In such situations, the driver may become overwhelmed by the need to make quick decisions, which will increase the level of stress. Under stress, the physiological state of the driver's body changes: the heart rate increases, blood pressure increases, workload decreases to the concentration of respect and the acceptance of urgent decisions. This can be brought to pardon, which in turn will advance the risk of accidents or delays. Therefore, it is important to consider stress as a critical factor in the process of assessing safety in emergency transport. In the current minds of the intense movement of trains, the increased burden of transportation has led to an increase in the safety of emergency transport, an important role is played by the reliability and efficiency of the functioning of emergency transport. The role of the driver plays. Psychophysiological parameters, combined with tension and stress, may have a direct impact on the driver's ability to take decisions in critical situations. The driver's stress can be caused by various factors, both external (bad weather, bad

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Неведров О. В., Горобченко О. М., Білоцький В. В., Терещенко В. С., 2026.

*routes, technical failures) and internal (automation, stress, physiological impairment). The revealed assessment of the level of tension is important for ensuring the safety of the situation, while the level of stress is high, and then we can reduce the tension to adequately cope with the situation and quickly reach a solution. Today, there are sufficiently effective methods for objective assessment and prediction of the level of stress of the machine in real operation, which creates significant difficulties for the development of adaptive systems management that reduces the risks of critical situations.*

**Keywords:** railway transport, driver tension, stress, critical training situations, psychophysiological parameters, traffic safety.

**Вступ.** Для сучасної епохи залізничних перевезень характерний динамічний розвиток зі збільшенням кількості поїздів і вантажів, а також зростанням вимог щодо безпеки і стабільності транспортної системи. На цьому тлі основним фактором, що впливає на ефективність роботи, є психофізіологічний стан машиніста. Саме від його здатності зберігати чіткість думки, спокій і зосередженість залежить успішність ухвалення рішень у складних і непередбачуваних ситуаціях на залізничній колії. Високий рівень напруженості та стресу, який виникає з впливом зовнішніх (погода, стан маршруту, технічні несправності) і внутрішніх факторів (втома, емоційне виснаження, фізичні обмеження), може суттєво обмежити здатність машиніста адекватно оцінювати ситуацію і оперативно діяти. Вчасне виявлення та оцінювання таких станів є запорукою безпеки руху, своєчасне реагування на ознаки перевтоми чи стресу допомагає уникнути фатальних помилок. На жаль, на сьогодні бракує достатньо точних і практичних методик, які допомагали б у реальних умовах експлуатації об'єктивно визначати рівень напруженості машиніста. Це перешкоджає впровадженню адаптивних систем, здатних автоматично реагувати на зміни стану оператора та знижувати ризик виникнення небезпечних ситуацій. Особливо складною є робота машиніста в період воєнних дій, коли до традиційних професійних викликів додані нові, пов'язані з постійною небезпекою для життя, невизначеністю і необхідністю ухвалювати рішення під тиском часу. У таких

екстремальних умовах психоемоційне напруження зростає, а хронічна втома, порушення сну та зниження концентрації уваги стають майже постійними супутниками праці. Це безпосередньо впливає на якість роботи і надійність машиніста, адже втома настає непомітно і може призвести до фатальних наслідків.

Разом із цим не зникають і звичні виробничі навантаження — шум, вібрація, несприятливий мікроклімат кабіни, обмежена видимість. У воєнний час ці фактори можуть ще більше загострюватися через пошкодження інфраструктури, що підвищує ризик виникнення аварійних ситуацій. Технічна складова роботи ускладнена частими відмовами обладнання, перебоями в роботі систем сигналізації та зв'язку, а також необхідністю діяти в нестандартних або аварійних режимах, де кожна помилка може мати серйозні наслідки.

Організаційні фактори також відіграють свою роль зі збільшення навантаження на персонал, зміни у графіках роботи, скорочення часу на відпочинок і відновлення. До цього додано соціально-психологічні обставини — відповідальність за життя і безпеку пасажирів, участь в евакуаційних перевезеннях, а також особисті тривоги і переживання, пов'язані з воєнною ситуацією.

Отже, у воєнний період професійна діяльність машиніста залізничного транспорту набуває багатогранного характеру, вона поєднує психофізіологічні, технічні та соціальні навантаження, що значно підвищує вимоги щодо стійкості, надійності та готовності до швидких рішень. Саме тому важливо не тільки оцінювати

стан машиніста, а і забезпечувати його підтримку і створювати умови для ефективної роботи навіть у найскладніших обставинах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вивчення проблеми напруженості та стресу машиніста залізничного транспорту є важливим напрямом досліджень, спрямованих на підвищення безпеки та ефективності функціонування залізничного транспорту. Різні аспекти цієї проблеми досліджено в багатьох наукових працях, серед яких можна виокремити кілька основних напрямів. Одним з основних напрямів є дослідження впливу психофізіологічного стану машиніста на якість його роботи і безпеку руху. За даними різних авторів, стан стресу і втрати негативно впливає на здатність машиніста ухвалювати швидкі та правильні рішення, що може призвести до аварійних ситуацій. Наприклад, у роботах [1-4] розглянуто основні психофізіологічні аспекти, що впливають на здатність машиніста концентрувати увагу та реакцію на несподівані події, такі як технічні несправності на колії чи погодні умови. Відомо, що в умовах підвищеного стресу здатність оцінювати ситуацію та ухвалювати рішення знижується, що підвищує ймовірність помилок. Проблема формалізації параметра напруженості машиніста за допомогою математичних моделей є важливою складовою вчених, які займаються розвитком інтелектуальних систем управління та автоматизацією. У ряді робіт із математичного моделювання, зокрема дослідженнях [5, 6], розглянуто методи оцінювання та прогнозування рівня напруженості машиніста через застосування методів теорії ймовірностей, нечіткої логіки та алгоритмів машинного навчання. Зокрема, моделі, засновані на теорії ймовірностей, допомагають оцінити ймовірність виникнення стресу та його вплив на оперативність і точність ухвалення рішень. Велика кількість досліджень зосереджена на впливі стресових факторів у критичних поїзних ситуаціях. У статтях [7-

9] описано, як стресові фактори (наприклад несподівана технічна несправність або погані погодні умов) можуть погіршити реакцію машиніста і збільшити ймовірність помилок з ухваленням рішень. У роботі проаналізовано методи діагностики рівня стресу в реальному часі та можливості застосування адаптивних систем для попередження критичних ситуацій. Інший аспект досліджено в роботі [10] - проаналізовано роль стресу в управлінні локомотивом в умовах підвищених навантажень. Автор розглядає зв'язок між рівнем стресу і здатністю машиніста реагувати на несподівані події, зокрема виявляючи, що навіть незначне підвищення стресу значно знижує ефективність ухвалення рішень. Використання спеціальних моніторингових систем, що дають змогу виявляти ознаки стресу в реальному часі, є важливою складовою майбутнього розвитку безпеки на залізничному транспорті. Сучасні дослідження виявляють потребу в інтеграції адаптивних систем управління, які здатні враховувати фізіологічний та психологічний стан машиніста в реальному часі [11, 12], описують методи інтеграції сенсорних технологій, які дають змогу отримати дані про фізіологічний стан машиніста (наприклад частота серцевих скорочень, рівень втоми) і вплив цих показників на ефективність роботи. Використання таких систем допомагає адаптувати алгоритми керування поїздом до поточного стану машиніста, що може значно знизити ймовірність помилок, пов'язаних із високим рівнем стресу. Використання математичних моделей для оцінювання рівня стресу машиніста активно досліджують у контексті застосування нечіткої логіки і теорії ймовірностей. У роботах [13, 14] розглянуто моделі на основі нечітких множин для оцінювання рівня стресу, що дає змогу враховувати не тільки фізіологічні, а й психологічні аспекти напруженості. Застосування таких моделей допомагає ефективно оцінити рівень стресу

і вжити необхідних заходів для корегування роботи машиніста в реальному часі. Незважаючи на значний прогрес у цій галузі, багато питань залишаються невирішеними. Зокрема, необхідно удосконалити методи математичного моделювання для точнішого визначення параметрів, що впливають на стрес і напруженість машиніста в умовах реальної експлуатації. Подальші дослідження мають бути зосереджені на інтеграції сенсорних систем із математичними моделями для прогнозування та моніторингу стану машиніста в реальному часі, а також на створенні адаптивних систем управління, що знижують ризик виникнення аварійних ситуацій. Аналіз існуючих досліджень показує, що проблема оцінювання та управління рівнем стресу та напруженості машиніста є важливою складовою забезпечення безпеки залізничного транспорту. Існують численні методи математичного моделювання, що дають змогу формалізувати параметри напруженості, однак більшість із них потребують удосконалення для більш точного врахування різних факторів, що впливають на роботу машиніста у критичних ситуаціях. Використання сучасних сенсорних технологій і адаптивних систем управління є основою покращення безпеки на залізничному транспорті.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою дослідження є розроблення теоретичного обґрунтування визначення впливу психофізіологічного стану машиніста (як оператора складної технічної системи) на якість і ефективність керування локомотивом. Для досягнення мети потрібно вирішити такі завдання:

1. Оцінити поточний рівень втоми машиніста.
2. Визначити перелік факторів, що впливають на ймовірність помилок під час керування поїздом.
3. Формалізувати вплив визначеного спектра зовнішніх і внутрішніх факторів на якість керування поїздом.

Розв'язання цієї проблеми передбачає застосування методів математичного аналізу, теорії ймовірностей, нечіткої логіки для розроблення і застосування математичних моделей.

**Практична значущість отриманих результатів** полягає в розробленні обґрунтованих методів для оцінювання та передбачення психофізіологічного стану машиніста як основної ланки у взаємодії «машиніст – локомотив – навколишнє середовище». Саме від цього стану залежить як безпека, так і ефективність залізничних перевезень.

Запропоновані в дослідженні математичні підходи дають змогу визначити рівень втоми, стресу та когнітивного навантаження машиніста в режимі реального часу; оцінювати ймовірність помилок під час керування локомотивом з урахуванням впливу різних факторів; створювати основу для інтелектуальних систем підтримки ухвалення рішень, що пристосовуються до стану оператора; підвищувати надійність роботи локомотивних бригад і зменшувати ризики аварій.

Особливо важливими ці результати стають у період воєнних дій, коли робота машиніста ускладнена додатковими загрозами, які впливають на його стан і якість керування. До таких факторів належать постійна небезпека обстрілів, що провокує хронічний стрес і тривожність; пошкодження чи руйнування інфраструктури, що ускладнює прогнозування ситуації на маршруті; перебої в роботі зв'язку та сигналізації, які збільшують навантаження та відповідальність; зростання кількості нестандартних і аварійних випадків, що потребують оперативних рішень; порушення режиму праці та відпочинку, що призводить до накопичення втоми; емоційне навантаження, пов'язане з евакуаціями і відповідальністю за пасажирів; несприятливі умови роботи (обмежена видимість, нічні зміни, недостатнє освітлення, шум і вібрація через технічні проблеми).

Урахування зазначених факторів у розроблених моделях дає змогу пристосовувати алгоритми керування локомотивом до складних умов експлуатації; підвищити ефективність моніторингу стану машиніста; прогнозувати критичні стани оператора та попереджати небезпечні ситуації; удосконалювати організацію праці локомотивних бригад у складних обставинах; розробляти рекомендації зі зниження ризиків, пов'язаних із людським фактором.

Отримані результати можна застосовувати для створення інтелектуальних систем керування локомотивами; у системах віддаленого контролю стану машиністів; розроблення адаптивних алгоритмів безпеки; у навчальних програмах і тренажерах для підготовки машиністів до роботи в ризикованих умовах; підготовки нормативних документів із безпечної праці та експлуатації залізничного транспорту у воєнний час.

Отже, практична користь проведеного дослідження полягає в можливості врахувати людський фактор у сучасних системах управління рухом поїздів, що сприяє підвищенню безпеки, надійності та стійкості роботи залізничного транспорту, особливо в умовах підвищених ризиків, спричинених війною.

#### **Основна частина дослідження.**

Робота машиніста залізничного транспорту передбачає високий рівень відповідальності, оскільки від його рішень залежить не тільки безпека руху, а й безпека пасажирів, вантажів, а також збереження технічного стану рухомого складу та інфраструктури. Критичні ситуації, що виникають під час руху, можуть стати випробуванням для психофізіологічного стану машиніста, що у свою чергу впливає на його здатність ухвалювати правильні та оперативні рішення. У цьому контексті фізіологічні та психологічні фактори відіграють головну роль. Втома є одним з основних фізіологічних факторів, що

безпосередньо впливає на ефективність роботи машиніста. Під час тривалої роботи, особливо в умовах відсутності перерв для відпочинку, знижується здатність до концентрації уваги. Із фізіологічної точки зору, втома супроводжує зменшення ефективності нервових процесів у головному мозку, що призводить до погіршення здатності до швидкого прийняття рішень. Наприклад, дослідження [15, 16] показують, що утомлений організм стає менш здатним швидко адаптуватися і потребує більше часу для реагування. Стресові ситуації на роботі також мають фізіологічний вимір, зокрема через активацію симпатичної нервової системи. Стрес спричиняє викид адреналіну, що сприяє мобілізації організму для подолання загрози. Проте в умовах високого стресу можуть виникати негативні наслідки, зокрема підвищення частоти серцевих скорочень, артеріального тиску, що спричиняє порушення координації рухів і зниження уваги. Стрес може спричинити швидко, але не завжди обґрунтоване ухвалення рішень, що збільшує ймовірність помилок під час керування поїздом, особливо у критичних ситуаціях [17]. Фізіологічні характеристики машиніста також залежать від умов навколишнього середовища, таких як освітлення, температура, рівень шуму тощо. Низька видимість, погані погодні умови або інші зовнішні фактори можуть збільшити фізіологічне навантаження на машиніста, що знижує його здатність швидко та ефективно реагувати в екстремальних ситуаціях. Одним із важливих психологічних факторів є когнітивне навантаження, яке виникає, коли машиніст має одночасно обробляти великий обсяг інформації. Це може включати відстеження кількох параметрів руху поїзда, реагування на сигнали світлофорів, моніторинг стану технічних систем і реагування на аварійні ситуації. Когнітивне навантаження часто призводить до «когнітивної перевантаженості», коли машиніст не

здатний належно обробляти всю потрібну інформацію, що збільшує ймовірність помилок в ухваленні рішень. За результатами досліджень [18], когнітивне навантаження та перевантаження можуть значно знижувати ефективність ухвалення рішень у критичних ситуаціях. Стресовий стан впливає на психіку машиніста, знижуючи його здатність до ефективного аналізу ситуації та спокійного реагування. В умовах стресу чи емоційного перенавантаження (наприклад після інциденту чи аварії) здатність логічно мислити та оцінювати ризики може бути значно знижена. У дослідженнях зазначено, що психологічний стрес може спричиняти «ефект тунельного зору», коли машиніст концентрується лише на одній частині інформації, ігноруючи інші важливі деталі, що можуть призвести до ухвалення некоректних рішень у критичних ситуаціях. Емоційний стан машиніста, зокрема його рівень мотивації, може впливати на реакцію у критичних ситуаціях. Наприклад, високий рівень мотивації може покращити концентрацію уваги і здатність до швидкого реагування. Натомість, низька мотивація чи депресивні стани можуть призводити до зниження уваги та реакції. Для кількісного оцінювання впливу цих факторів на здатність ухвалювати рішення можна застосовувати математичні моделі.

**Моделі на основі нечіткої логіки** допомагають врахувати суб'єктивні оцінки психофізіологічного стану машиніста і прогнозувати його реакцію на змінені умови.

**Моделі на основі теорії ймовірностей** допомагають визначити ймовірність того, що машиніст ухвалить правильне рішення в умовах стресу або втоми з урахуванням специфічних параметрів його фізіологічного та психологічного стану.

**Алгоритми машинного навчання** можуть навчатися на історичних даних про ситуації, що призвели до помилок, і допомагати прогнозувати ймовірність виникнення стресу в майбутніх ситуаціях.

Для формалізації впливу фізіологічних і психологічних факторів на здатність машиніста ухвалювати рішення пропонується використовувати функцію, яка об'єднує основні параметри, що впливають на рівень втоми машиніста,

$$E_{fat}(t) = \varepsilon_1 T_{work}(t) + \varepsilon_2 \cdot HSS(t) + \varepsilon_3 \cdot E_{cog}(t), \quad (1)$$

де  $E_{fat}(t)$  — рівень втоми в момент часу  $t$ ;

$T_{work}(t)$  — час роботи без перерв;

$HSS(t)$  — частота серцевих скорочень у момент часу  $t$ ;

$E_{cog}(t)$  — рівень когнітивного навантаження в момент часу  $t$ ;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  — вагові коефіцієнти, що визначають важливість кожного фактора, дорівнюють 0.1, 0.2 або 0.3.

Когнітивне навантаження — це кількість інформації, яку машиніст має обробити за одиницю часу. Високе когнітивне навантаження може впливати на здатність машиніста зберігати концентрацію і швидко реагувати на змінні умови. Рівень когнітивного навантаження можна оцінити за допомогою кількох факторів.

**Кількість одночасно оброблюваної інформації:** машиніст може стежити за різними системами на поїзді, сигналами, станом колії тощо.

**Складність ситуації,** наприклад екстрені маневри або погані погодні умови, збільшують когнітивне навантаження.

**Час на реакцію:** чим менше часу є для ухвалення рішення, тим більше когнітивне навантаження.

Побудуємо модель, що включає основні фактори, які впливають на когнітивне навантаження:

$$E_{cog}(t) = \delta_1 \cdot N_{sig}(t) + \delta_2 \cdot S_{com}(t) + T_{rea}(t), \quad (2)$$

де  $E_{cog}$  — рівень когнітивного навантаження машиніста в момент часу  $t$ ;

$N_{sig}(t)$  — кількість одночасно оброблених сигналів або параметрів;

$S_{com}(t)$  — складність ситуації на момент часу  $t$  (наприклад інтенсивність руху поїзда, непередбачуваність змін);

$T_{rea}(t)$  — час, необхідний для реакції на зміни або сигнали;

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$  — коефіцієнти, які визначають важливість кожного з факторів у загальному когнітивному навантаженні, дорівнюють 0.1, 0.2 або 0.3.

#### Пояснення складових моделі

**Кількість одночасно оброблюваних сигналів**  $N_{sig}(t)$ : машиніст одночасно стежить за кількома системами: показниками швидкості, станом колії, індикаторами на панелі управління, сигналами від системи безпеки та зовнішніми сигналами (наприклад світлофори). Збільшення кількості цих сигналів збільшує когнітивне навантаження.

**Складність**  $S_{com}(t)$  **ситуації**: кожна ситуація на шляху прямування локомотива має свою складність. Наприклад, за великої кількості поїздів на маршруті, поганих погодних умов або необхідності здійснення екстрених маневрів ситуація стає складнішою, і машиністу доводиться обробляти більше інформації за менший час.

**Час реакції**  $T_{rea}(t)$ : когнітивне навантаження також залежить від того, скільки часу є у машиніста для ухвалення рішення і реакції на ситуацію. Чим коротший час на реакцію, тим більше когнітивне навантаження.

Приклад розрахунку рівня когнітивного навантаження. Припустимо, у нас є такі дані: машиніст одночасно обробляє п'ять сигналів ( $N_{sig}(t) = 5$ , для зручності проведемо нормалізацію, маючи верхній поріг 10 сигналів, нижній 0). Щоб нормалізувати число 5 на шкалу від 0 до 1, де верхній поріг  $x_{max} = 10$  і нижній поріг  $x_{min} = 0$ , можна використати формулу

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}, \quad (3)$$

де  $x = 5$  — значення, яке потрібно нормалізувати;

$x_{min} = 0$  — мінімальне значення;

$x_{max} = 10$  — максимальне значення.

Розрахунок:

$$x_{norm} = \frac{5-0}{10-0} = \frac{5}{10} = 0.5.$$

Нормалізоване значення числа 5 на шкалі від 0 до 1, де мінімум 0, а максимум 10, буде 0.5.

Складність ситуації оцінюють на рівні 0.8 (де 0 — проста ситуація, 1 — складна) ( $S_{com}(t) = 0.8$ ).

Час реакції на зміни складає 2 с ( $T_{rea}(t) = 2$  с).

Задаємо коефіцієнти:

$$\delta_1 = 0.2, \delta_2 = 0.1, \delta_3 = 0.1.$$

Тепер можемо розрахувати рівень когнітивного навантаження:

$$E_{cog}(t) = 0.2 \cdot 0.5 + 0.1 \cdot 0.8 + 0.1 \cdot 2.$$

Розрахуємо кожен компонент:

$$0.2 \cdot 0.5 = 0.1, 0.1 \cdot 0.8 = 0.08, 0.1 \cdot 2 = 0.2.$$

Отже, рівень когнітивного навантаження

$$E_{cog}(t) = 0.1 + 0.08 + 0.2 = 0.38.$$

Рівень когнітивного навантаження  $E_{cog}(t) = 0.38$ .

Проведемо приклад розрахунку рівня втоми.

Припустимо, ми маємо такі дані: час роботи без перерв:  $T_{work}(t) = 6$  год або 21600 с (проведемо нормалізацію, маючи верхній поріг 86400 с, що дорівнює одній добі, а нижній поріг 0 с).

Щоб нормалізувати число 21600 на шкалу від 0 до 1, де верхній поріг  $x_{max} = 86400$  (наприклад кількість секунд у добі), можна використати формулу (3), де  $x = 21600$  — значення, яке потрібно нормалізувати,  $x_{min} = 0$  — мінімальне значення (для

цього випадку),  $x_{\max} = 86400$  – максимальне значення (максимум для 86400 с).

Розрахунок:

$$x_{\text{norm}} = \frac{21600 - 0}{86400 - 0} = \frac{21600}{86400} = 0.25.$$

Нормалізоване значення числа 21600 на шкалі від 0 до 1 за максимального порогу 86400 буде 0.25.

Частота серцевих скорочень:  $HSS(t) = 95$  удар/хв (проведемо нормалізацію, маючи верхній поріг 130 удар/хв, а нижній поріг 60 удар/хв). Щоб нормалізувати число 95 на шкалу від 0 до 1, де верхній поріг  $x_{\max} = 130$  і нижній поріг  $x_{\min} = 60$ , використовуємо формулу (3), де  $x = 95$  — значення, яке потрібно нормалізувати,  $x_{\min} = 60$  — мінімальне значення,  $x_{\max} = 130$  — максимальне значення.

Розрахунок:

$$x_{\text{norm}} = \frac{95 - 60}{130 - 60} = \frac{35}{70} = 0.5.$$

Нормалізоване значення числа 95 на шкалі від 0 до 1, де мінімум 60, а максимум 130, буде 0.5.

Когнітивне навантаження:  $E_{\text{cog}}(t) = 0.38$  (оцінка на шкалі від 0 до 1).

Задаємо вагові коефіцієнти:

$$\varepsilon_1 = 0.1, \varepsilon_2 = 0.3, \varepsilon_3 = 0.2.$$

Тепер можемо підставити ці значення у формулу:

$$E_{\text{fat}}(t) = 0.1 \cdot 0.25 + 0.3 \cdot 0.5 + 0.2 \cdot 0.38.$$

Розрахуємо кожен компонент:

$$0.1 \cdot 0.25 = 0.05, 0.3 \cdot 0.5 = 0.15, 0.2 \cdot 0.38 = 0.076.$$

Отже, рівень втоми дорівнюватиме

$$E_{\text{fat}}(t) = 0.05 + 0.15 + 0.14 = 0.276.$$

Рівень втоми  $E_{\text{fat}}(t) = 0.276$  може бути використаний для оцінювання того, наскільки машиніст втомлений і чи потрібно йому відпочити або знизити навантаження.

Інтерпретація нормованих значень

- 0.0 — відсутність стресу, машиніст перебуває у спокійному фізіологічному та психологічному стані;
- 0.5 — середній рівень напруженості, машиніст має помірний стрес або втому, але здатний ефективно працювати;
- 1.0 — максимальний рівень напруженості, машиніст перебуває під великим стресом, втомою, що значно знижує його здатність ухвалювати рішення.

Тепер побудуємо математичну модель для оцінювання ймовірності помилки машиніста  $P_{\text{er}}(t)$ , яка може залежати від різних фізіологічних і психологічних факторів, таких як рівень стресу, втоми, когнітивного навантаження, а також від зовнішніх факторів (погодні умови, стан колії тощо). Математична модель для оцінювання ймовірності помилки може бути побудована на основі фізіологічних і психологічних показників, а також за допомогою підходів теорії ймовірностей. Одним із підходів для побудови математичної моделі для оцінювання ймовірності помилки є використання функції, що враховує важливість кожного з факторів. Залежно від цих факторів імовірність помилки може бути оцінена через комбінацію їхніх впливів, що дає змогу адаптувати рівень ризику в реальному часі. Математичну модель для ймовірності помилки можна виразити через формулу, яка цілісно описує ймовірність того, що машиніст зробить помилку в певний момент часу  $t$ , зважаючи на вплив фізіологічних і психологічних факторів на його стан:

$$P_{\text{er}}(t) = 1 - e^{-(\gamma_1 \cdot E_{\text{st}}(t) + \gamma_2 \cdot E_{\text{fat}}(t) + \gamma_3 \cdot E_{\text{cog}}(t) + \gamma_4 \cdot E_{\text{ext}}(t))}, \quad (4)$$

де  $P_{er}(t)$  - імовірність помилки;  
 $E_{st}(t)$  — рівень стресу в момент часу  $t$ ;  
 $E_{fat}(t)$  — рівень втоми в момент часу  $t$ ;  
 $E_{cog}(t)$  — рівень когнітивного навантаження в момент часу  $t$ ;  
 $E_{ext}(t)$  — рівень зовнішніх факторів у момент часу  $t$ ;  
 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  — коефіцієнти чутливості.

### **Імовірність помилки $P_{er}(t)$**

Це значення ймовірності того, що машиніст здійснить помилку в момент часу  $t$ . Імовірність помилки залежить від кількох факторів, які впливають на здатність машиніста ухвалювати правильні рішення. Чим вищий рівень стресу, втоми, когнітивного навантаження чи зовнішніх факторів, тим більша ймовірність помилки.

### **Експоненціальна функція $e^{-x}$**

Експоненціальна функція  $e^{-x}$  моделює нелінійне зростання ймовірності помилки з підвищенням рівня напруженості. Вона має такі властивості:

1. Якщо всі фактори мають низькі значення, ймовірність помилки буде низькою (близька до 0).
2. Коли значення факторів стають високими, ймовірність помилки різко зростає, наближаючись до 1.

Експоненціальну функцію використовують для точного моделювання такої залежності, оскільки невелике збільшення рівня стресу або втоми може сильно підвищити ймовірність помилки.

### **Фактори впливу на ймовірність помилки**

Фактори, що впливають на ймовірність помилки машиніста:

$E_{st}(t)$  — рівень стресу в момент часу  $t$ . Стрес може виникати через непередбачувані ситуації, технічні проблеми, складні погодні умови або проблеми з навантаженням. Стрес має великий вплив на здатність машиніста ухвалювати рішення.

$E_{fat}(t)$  — рівень втоми в момент часу  $t$ . Втома знижує здатність машиніста до концентрації та швидкої реакції, що збільшує ймовірність помилок.

$E_{cog}(t)$  — рівень когнітивного навантаження в момент часу  $t$ . Когнітивне навантаження зростає, коли машиністу потрібно обробляти велику кількість інформації за короткий час (наприклад слідувати за станом поїзда, погодними умовами, сигналами і т. п.).

$E_{ext}(t)$  — рівень зовнішніх факторів у момент часу  $t$ . Це можуть бути погодні умови (дощ, сніг, туман), стан колії, дорожні умови тощо. Зовнішні фактори також впливають на здатність машиніста ефективно реагувати.

### **Коефіцієнти чутливості $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$**

Ці коефіцієнти визначають чутливість імовірності помилки до кожного з факторів:

- $\gamma_1$  визначає, наскільки сильно рівень стресу впливає на ймовірність помилки;
- $\gamma_2$  визначає, наскільки сильно втома впливає на ймовірність помилки;
- $\gamma_3$  визначає вплив когнітивного навантаження;
- $\gamma_4$  визначає вплив зовнішніх умов.

Чим більші значення коефіцієнтів, тим більше впливають відповідні фактори на ймовірність помилки. Це дає змогу системі моделювати важливість кожного фактора.

Приклад розрахунку ймовірності помилки. Вхідні дані:

$E_{st}(t) = 0.8$  (високий стрес, оцінка на шкалі від 0 до 1), рівень втоми  $E_{fat}(t) = 0.6$ , рівень когнітивного навантаження  $E_{cog}(t) = 0.7$ , зовнішні умови  $E_{ext}(t) = 0.5$ .

Задаємо коефіцієнти:

$\gamma_1 = 1.0$  (стрес має великий вплив),  $\gamma_2 = 0.8$  (втома має помірний вплив),  $\gamma_3 = 0.9$  (когнітивне навантаження має середній вплив),  $\gamma_4 = 0.7$  (зовнішні умови мають менший вплив).

Підставимо значення в формулу:

$$E_{st}(t) = 1 - e^{-(1.0 \cdot 0.8 + 0.8 \cdot 0.6 + 0.9 \cdot 0.7 + 0.8 \cdot 0.5)}$$

Розрахуємо кожен компонент:

$$1.0 \cdot 0.8 = 0.64, 0.8 \cdot 0.6 = 0.48, 0.9 \cdot 0.7 = 0.63, 0.7 \cdot 0.5 = 0.35.$$

Тепер підставимо ці значення в загальну формулу:

$$E_{st}(t) = 1 - e^{-(0.64+0.48+0.63+0.35)} = 1 - e^{-2.1}.$$

Обчислюємо значення експоненціальної функції:

$$e^{-2.1} \approx 0.8775.$$

Отже, імовірність помилки дорівнюватиме

$$E_{st}(t) = 1 - 0.8775 = 0.1225.$$

Інтерпретація результату. Імовірність помилки машиніста в цей момент часу становить **12.2 %**.

**Висновки.** Проведене дослідження дало змогу досягти поставлену мету, а саме теоретично обґрунтувати, наскільки психофізіологічний стан машиніста впливає на якість і результативність керування локомотивом. Проаналізовано основні фактори, які формують цей стан, серед яких особливу увагу приділено втомі, стресу та рівню когнітивного навантаження. Встановлено, що саме взаємодія цих складових визначає, як машиніст реагує на виробничі події та ухвалює рішення у складних ситуаціях, що є критично важливим для безпеки руху.

Досягнення цієї мети стало можливим завдяки впровадженню математичних моделей, які дають змогу формалізувати зв'язок між окремими психофізіологічними характеристиками машиніста і ризиком допущення помилок під час керування потягом. Виявлено, що збільшення рівня

стресу, втоми та інформаційного навантаження негативно позначається на здатності зосереджуватися, знижує швидкість і точність ухвалення рішень. Це безпосередньо впливає на ймовірність виникнення аварійних ситуацій, а отже, загальний рівень безпеки залізничного транспорту.

Ретельний аналіз засвідчив, що для комплексного оцінювання стану машиніста потрібно враховувати не лише його фізіологічні та психологічні особливості, а й зовнішні фактори – умови руху, технічний стан локомотива, погодні умови тощо. Такий підхід є запорукою об'єктивного оцінювання готовності до роботи і гарантією безпеки на залізниці. Особливої ваги ці результати набувають у період воєнних дій, коли додаткові фактори стресу значно ускладнюють роботу оператора та підвищують ризики.

Зважаючи на отримані дані, можна стверджувати, що результати дослідження є науковою базою для розроблення сучасних систем моніторингу та підтримки рішень, які спрямовані на мінімізацію впливу людського фактора, підвищення надійності роботи локомотивних бригад і забезпечення безпеки експлуатації залізничного транспорту, особливо в умовах підвищених ризиків і нестабільності.

**Подяка.** Ця робота виконана в рамках проєкту «Методологічні засади підвищення ефективності та безперебійної роботи залізничного транспорту: людино-машинні системи в умовах воєнної економіки» (0126U002095), який виконано за кошти державного бюджету на замовлення Міністерства освіти і науки України.

### Список використаних джерел

1. Самсонкін, В. Н., Петінов, Я. П. (2015). Особливості роботи машиніста в сучасних умовах: погляд зсередини. *Східно-Європейський журнал підприємницьких технологій*, 6(3(78)), 40–45. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56659>
2. Самсонкін, В. М., Гончаренко, В. В., Клімова, О. М. та ін. (2004). *Методичні рекомендації щодо видів і порядку проведення психофізіологічних обстежень і добору працівників локомотивних бригад* (№ ЦТ-0109). Укрзалізниця.

3. Горобченко, О. М., Неведров, О. В. (2020). Аналіз та шляхи вдосконалення робочого місця машиніста локомотива. *Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті: Тези XIV Міжнар. наук.-практ. конфер.* (с. 50). ДІТ.
4. Fan, C., Huang, S., Lin, S., Xu, D., Peng, Y., & Yi, S. (2022). Types, risk factors, consequences, and detection methods of train driver fatigue and distraction. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 8328077. <https://doi.org/10.1155/2022/8328077>
5. Горобченко, О. М. (2013). Розробка методики оцінки інформаційного навантаження на локомотивну бригаду. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*, 36, 141–147.
6. Пузир, В. Г. (2001). Моделювання надійності роботи локомотивних бригад. *Збірник наукових праць ХарДАЗТ*, 45, 19–22.
7. Пузир, В. Г., Ремез, І. В. (2001). Оцінка надійності операторів людино-машинних комплексів залізничного транспорту. *Комунальне господарство міст: Серія «Архітектура і технічні науки»*, 47, 219–223.
8. Брусенцов, В. Г., Пузир, В. Г., Григор'єва, Є. С., Гармаш, Б. К., Серіков, Я. О., Крамчанин, І. Г. (2024). Вплив професійного стресу на рівень функціональної надійності транспортних операторів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 29(4). <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i4.320332>
9. Gorobchenko, O., & Nevedrov, O. (2020). Development of the structure of an intelligent locomotive DSS and assessment of its effectiveness. *Archives of Transport*, 56(4), 47–58. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5517>
10. Li, Y. (2016). On human factors in the design of locomotive cab: An investigation on driver's cognitive and behavioral characteristics. У *Proceedings of the 2nd Asia-Pacific Management and Engineering Conference (APME 2016)*. Atlantis Press.
11. Lall, M. (2010). Physiological understanding of human emotions for effective management. *Global Business and Management Research: An International Journal*, 1(3), 117–128.
12. Galán, F., Nuttin, M., Vanhooydonck, D., Lew, E., Philips, J., & Millán, J. del R. (2011). Continuous brain-actuated control of an intelligent wheelchair by human EEG. *Frontiers in Neuroscience* [препринт]. <https://www.researchgate.net/publication/41387131>
13. Ghose D., Gitelson O., Scassellati B. (2024). Integrating multimodal affective signals for stress detection from audio-visual data. У *Proceedings of the ACM International Conference on Multimodal Interaction (ICMI 2024)*. <https://doi.org/10.1145/3678957.3685717>
14. Юрков, О. С. (2018). *Психологія праці та інженерна психологія: навч. посіб.* Вид. 2-ге, перероб. і доп. Мукачєво: Мукачівський державний університет, 2018. 187 с.
15. Кириченко, В. В. (2015). *Психологічні основи професійної адаптації та вибору професії: навч. посіб.* Житомир: Видавництво ЖДУ ім. І. Франка, 2015. 110 с. ISBN 978-966-485-183-8
16. Sena, P., d'Amore, M., Pappalardo, M., Pellegrino, A., Fiorentino, A., & Vilecco, F. (2013). Studying the influence of cognitive load on driver's performances by a fuzzy analysis of lane keeping in a drive simulation. *IFAC Proceedings Volumes*, 46 (21), 151–156. <https://doi.org/10.3182/20130904-4-JP-2042.00029>
17. Zhang, X., Zhang, H., & Xu M. (2026). Multimodal classification algorithms for emotional stress analysis with ECG-centered framework: a comprehensive review AI 10.3390/ai7020063 7 :2(63) 6 <https://doi.org/10.3390/ai7020063>

### References

1. Samsonkin, V. N., & Petinov, Ya. P. (2015). Osoblyvosti roboty mashynista v suchasnykh umovakh: pohliad zseredyu. [Peculiarities of a machinist's work in modern conditions: a view from

the inside]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (3 (78)), 40–45. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56659>

2. Samsonkin, V. M., Honcharenko, V. V., & Klimova, O. M. ta in. (2004). *Metodychni rekomendatsii shchodo vydiv i poriadku provedennia psikhofiziologichnykh obstezhen i doboru pratsivnykiv lokomotyvnykh bryhad*. [Methodological recommendations on the types and procedure for conducting psychophysiological examinations and selecting locomotive crew employees]. (No. ЦТ-0109). Ukrzaliznytsia. [in Ukrainian].

3. Gorobchenko, O. M. & Nevedrov, O. V. (2020). Analiz ta shliakhy vdoskonalennia robochoho mistsia mashynista lokomotyva. [Analysis and ways to improve the locomotive driver's workplace]. *Modern information and communication technologies in transport, industry and education: Abstracts of the XIV International Scientific and Practical Conference* (p. 50). DIIT. [in Ukrainian].

4. Fan, C., Huang, S., Lin, S., Xu, D., Peng, Y. & Yi, S. (2022). Types, risk factors, consequences, and detection methods of train driver fatigue and distraction. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 8328077. <https://doi.org/10.1155/2022/8328077>

5. Gorobchenko, O. M. (2013). Rozrobka metodyky otsinky informatsiinoho navantazhennia na lokomotyvnu bryhadu. [Development of a methodology for assessing the information load on the locomotive crew.] *Collection of scientific papers of DonIZT*, 36Ю 141–147. [in Ukrainian].

6. Puzyr, V. H. (2001). Modeliuvannia nadiinosti roboty lokomotyvnykh bryhad. [Modeling the reliability of locomotive crews.] *Collection of scientific papers of the Kharkiv State Railways and Transport Administration*. 45. 19–22. [in Ukrainian].

7. Puzyr, V. H., & Remez, I. V. (2001). Otsinka nadiinosti operatoriv liudyno-mashynnykh kompleksiv zaliznychnoho transportu. [Reliability assessment of operators of human-machine complexes of railway transport.] *Municipal utilities: Series «Architecture and technical sciences»*, 47, 219–223. [in Ukrainian].

8. Brusentsov, V. H., Puzyr, V. H., Hryhorieva, Ye. S., Harmash, B. K., Sierikov, Ya. O. & Kramchanin, I. H. (2024). Vplyv profesiinoho stresu na riven funktsionalnoi nadiinosti transportnykh operatoriv. [The influence of professional stress on the level of functional reliability of transport operators.] *Information and control systems in railway transport*, 29(4). <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i4.320332> [in Ukrainian].

9. Gorobchenko, O. & Nevedrov, O. (2020). Development of the structure of an intelligent locomotive DSS and assessment of its effectiveness. *Archives of Transport*, 56 (4), 47–58. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5517> [in Ukrainian].

10. Li, Y. (2016). On human factors in the design of locomotive cab: An investigation on driver's cognitive and behavioral characteristics. У *Proceedings of the 2nd Asia-Pacific Management and Engineering Conference (APME 2016)*. Atlantis Press.

11. Lall, M. (2010). Physiological understanding of human emotions for effective management. *Global Business and Management Research: An International Journal*, 1 (3), 117–128.

12. Galán, F., Nuttin, M., Vanhooydonck, D., Lew, E., Philips, J., & Millán, J. del R. (2011). Continuous brain-actuated control of an intelligent wheelchair by human EEG. *Frontiers in Neuroscience* [препринт]. <https://www.researchgate.net/publication/41387131>

13. Ghose, D., Gitelson, O., & Scassellati, B. (2024). Integrating multimodal affective signals for stress detection from audio-visual data. У *Proceedings of the ACM International Conference on Multimodal Interaction (ICMI 2024)*. <https://doi.org/10.1145/3678957.3685717>

14. Yurkov, O. S. (2018). *Psykhohohiia pratsi ta inzhenerna psykholohiia: navchalnyi posibnyk* (2-he vyd., pererob. i dop.). Mukachivskiy derzhavnyi universytet. [Work Psychology and Engineering Psychology: Textbook (2nd ed., revised and supplemented).] Mukachevo State University. [in Ukrainian].

15. Kyrychenko, V. V. (2015). *Psykhologichni osnovy profesiinoi adaptatsii ta vyboru profesii: navchalnyi posibnyk*. Vydavnytstvo ZhDU im. I. Franka. ISBN 978-966-485-183-8. [*Psychological foundations of professional adaptation and choice of profession: a starting point.*] Publishing house of ZhDU im. I. Franka. ISBN 978-966-485-183-8 [in Ukrainian].

16. Sena, P., d'Amore, M., Pappalardo, M., Pellegrino, A., Fiorentino, A., & Villecco, F. (2013). Studying the influence of cognitive load on driver's performances by a fuzzy analysis of lane keeping in a drive simulation. *IFAC Proceedings Volumes*, 46 (21), 151–156. <https://doi.org/10.3182/20130904-4-JP-2042.00029>

17. Zhang, X., Zhang, H., & Xu, M. (2026). Multimodal classification algorithms for emotional stress analysis with ECG-centered framework: a comprehensive review *AI 10.3390/ai7020063 7 :2(63) 6* <https://doi.org/10.3390/ai7020063>

---

Неведров Олександр Вікторович, доктор філософії, старший викладач кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниці, Національний транспортний університет. ORCID 0000-0001-9347-0973. Тел.: +38 (097) 301 28 97. E-mail: [nvp2020lts@gmail.com](mailto:nvp2020lts@gmail.com).

Горобченко Олександр Миколайович доктор технічних наук, професор кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниці, Національний транспортний університет. ORCID 0000-0002-9868-3852. Тел.: +38 (050) 972 04 71. E-mail: [gorobchenko.a.n@gmail.com](mailto:gorobchenko.a.n@gmail.com).

Білоцький Владислав Віталійович аспірант кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниці, Національний транспортний університет. ORCID 0009-0009-0130-5803. Тел.: +38 (093) 746 52 36. E-mail: [bilotskiyvladyslav@gmail.com](mailto:bilotskiyvladyslav@gmail.com).

Терещенко Владислав Сергійович, аспірант кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниці, Національний транспортний університет. ORCID 0009-0006-7906-7284. Тел.: +38 (063) 613 13 77. E-mail: [vladshtik1@gmail.com](mailto:vladshtik1@gmail.com).

Nevedrov Oleksandr, Doctor of Philosophy, Senior Lecturer, Department of Electromechanics and Railway Rolling Stock, National Transport University. ORCID 0000-0001-9347-0973. Tel.: +38 (097) 301 28 97. E-mail: [nvp2020lts@gmail.com](mailto:nvp2020lts@gmail.com).

Gorobchenko Oleksandr, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electromechanics and Railway Rolling Stock, National Transport University. ORCID 0000-0002-9868-3852. Tel.: +38 (050) 972 04 71. E-mail: [gorobchenko.a.n@gmail.com](mailto:gorobchenko.a.n@gmail.com).

Bilotsky Vladislav, Postgraduate Student, Department of Electromechanics and Railway Rolling Stock. National Transport University. ORCID 0009-0009-0130-5803. Tel.: +38 (093) 746 52 36. E-mail: [bilotskiyvladyslav@gmail.com](mailto:bilotskiyvladyslav@gmail.com).

Tereshchenko Vladislav, postgraduate student of the Department of Electromechanics and Railway Rolling Stock, National Transport University. ORCID 0009-0006-7906-7284. Tel.: +38 (063) 613 13 77. E-mail: [vladshtik1@gmail.com](mailto:vladshtik1@gmail.com).

Дата надходження статті 10.03.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 12.05.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 29.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY