

О. Ю. Каменєв¹
 А. О. Лапко¹
 О. В. Щєбликіна¹

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВЕРИФІКАЦІЇ ЕРГАТИЧНИХ СИСТЕМ ЗАСОБІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ

¹Український державний університет залізничного транспорту, Харків

Опрацьовані питання, пов'язані з урахуванням впливу оперативного, технічного й інспекційного персоналу на безпеку використання ергатичних систем залізничної автоматики. В умовах інтерактивної взаємодії всіх видів персоналу і техніки розроблено математичні моделі для розрахунку параметрів безпеки використання таких систем, які враховують їх функціонування в штатному та допоміжному режимі в різних контекстах співвідношень людського і технічного чинників. Встановлено і доведено, що різні режими інтерактивної взаємодії формують диференційовану структуру розрахунково-логічних схем для оцінки безпеки використання ергатичних систем керування на залізничному транспорті.

Функціонування ергатичних систем керування на залізничному транспорті має суттєві особливості, пов'язані з неприпустимістю простою технологічного процесу на об'єктах інфраструктури. У зв'язку з цим у таких системах існує допоміжний режим керування, в рамках якого повністю або частково усуваються блокувальні залежності, що забезпечують технологічну безпеку використання таких систем. В дослідженні встановлено кусково-заданий характер математичних моделей, на основі якого може бути проведена чисельна оцінка безпеки використання таких систем керування, що зумовлено врахуванням технічного та людського чинників у різних режимах функціонування таких систем. Водночас розвиток форм інтерактивної взаємодії між різними типами персоналу в активних режимах роботи систем керування вимагає принципово нового підходу до оцінки безпеки — з урахуванням впливу диференційованих людських та інтегрованих технічних факторів. У зв'язку з цим у цьому дослідженні розроблені математичні моделі, що дозволяють врахувати інтерактивну взаємодію людини і техніки в процесі оцінки безпеки використання ергатичних систем залізничної автоматики. Побудовані на їх основі графічні 3D-залежності дозволяють проводити прогнозу оцінку безпеки різних систем у процесі їх функціонування протягом однієї робочої зміни експлуатаційного, технічного та інспекційного персоналу. Зокрема, формування математичних моделей для розрахунку безпеки через різні інтервали часу, які визначають допоміжний та штатний режими роботи систем керування, забезпечує диференціацію врахування різних факторів, коли вони домінують. Підхід, оснований на врахуванні впливу всіх типів персоналу під час їх інтерактивної взаємодії з технічними засобами, зводиться до врахування різних типів елементних зв'язків у розрахунково-логічних схемах функційної безпечності систем, що зводиться до різних типів формул в остаточному кусково-заданому виразі для оцінки безпеки використання таких систем.

Ключові слова: залізнична автоматика, ергатична система, безпека використання, розрахунково-логічна схема, програмно-апаратні засоби, режими функціонування, експоненціальний закон розподілу.

Вступ

Впровадження і використання технічних засобів залізничної автоматики, що реалізуються системами керування та регулювання руху поїздів (КРП), потребує їх доексплуатаційної, періодичної та епізодичної верифікації на предмет відповідності заданим показникам призначення [1].

Задачі верифікації систем та засобів КРП на предмет відповідності їх побудови та функціонування заданим вимогам (ПТЕ, типовим проектним рішенням, інструкціям, регламентам тощо) були актуальними на всіх етапах становлення та розвитку відповідних систем [2]—[7].

Для релейно-контактних систем та засобів КРП основні заходи з верифікації зводяться до пе-

ревірки залежностей на об'єктах впровадження й експлуатації (для систем у комплексі) або до випробувань елементної бази в заводських умовах або умовах ремонтно-технологічних дільниць (РТД) [7], [9]—[11].

Методи та засоби, що використовуються для верифікації релейно-контактних систем КРРП, є неприйнятними або малопринятними для їх мікропроцесорних аналогів через суттєві відмінності в елементній базі та техніці забезпечення виконання покладених функцій [12], [13].

Для сучасніших цифрових систем КРРП, що відповідають тенденціями Четвертої світової промислової революції (Industry-4.0), ще більшою мірою є неприйнятними методи та засоби верифікації, характерні для релейно-контактних систем, проте повністю або частково є реалізованими відповідні підходи, сформовані для мікропроцесорних технічних засобів. Повнота відповідності при цьому визначається ступенем взаємної інтеграції або уніфікації системи КРРП з суміжними системами [14].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням верифікації мікроелектронних систем та засобів керування технологічними процесами на залізничному транспорті та в інших відповідальних сферах займалися багато вітчизняних та закордонних вчених. Аналіз відповідних наукових та прикладних праць, зокрема робіт [7], [9]—[13], [15]—[21], а також нормативно-технічних документів [22], [23], вказує на те, що ключовим предметом верифікації є функційна безпечність систем КРРП. Нормативні документи та науково-прикладні підходи, що їх імплементують, спрямовані в такому випадку на дослідження та доказ функційної безпечності (ФБ) відповідних систем керування.

В роботах в [2], [3], [10], [13] зокрема запропоновано в контексті убезпечення із застосуванням ергатичних систем КРРП самого процесу руху потягів перейти від проблематики «функційної безпечності» до концепції «безпеки використання», яка охоплює не тільки показники ФБ, але й безвідмовності відповідних систем. В обґрунтуваннях такого підходу в цих працях зазначається та доводиться, що ергатичні системи КРРП передбачають перехід у позаштатний режим функціонування, в якому нівелюється частина блокувальних залежностей систем. У таких умовах людина-оператор системи в визначенні безпеки функціонування системи враховується як повноцінний її компонент, що послідовно включається до розрахунково-логічної схеми функційної безпечності (РЛСФБ). Виходячи з того, що інтенсивність небезпечних помилок людини-оператора становить $10^{-3} \dots 10^{-4}$ 1/год, у відповідних роботах встановлено, що верифікація таких систем КРРП на предмет безпеки функціонування повинна враховувати безвідмовність компонентів, захисна відмова яких призводить систему до допоміжного режиму функціонування, в якому людина-оператор враховується при визначенні показників безпечності. Стан системи, в якому вона продовжує (повністю або частково) виконувати свої функції, але без достатньої мінімізації людського фактора, класифікується при цьому не як захисний, а як «потенційно небезпечний» [2], [9], [11], [24], [25].

Подальший розвиток КРРП з урахуванням тенденцій Industry-4.0, особливо — в комплексі тотальної цифровізації, передбачає становлення інтерактивної взаємодії систем КРРП не тільки з експлуатаційним персоналом (людиною-оператором), але й з технічним (обслуговуючим), а в деяких випадках — і з контрольно-ревізійним (інспекційним) персоналом. Зокрема, в роботі [26] закладені основи, згідно з якими відбувається зазначена взаємодія в рамках систем залізничної автоматики з використанням алгоритмів самодіагностики та зворотного зв'язку між представниками персоналу всіх категорій. Реалізація режимів функціонування при цьому безпосередньо пов'язана з санкціонуванням з боку належних посадових осіб та діагностичних висновків технічних засобів.

У роботах [18], [26] здійснено прикладну адаптацію наукових положень, наведених у роботі [26], до систем КРРП, що впроваджуються або знаходяться в експлуатації в Україні. Для мікропроцесорних систем КРРП розвиток такого роду взаємодії передбачається, перш за все, за рахунок можливостей системного та прикладного програмного забезпечення і т.д.

Отже, важливим напрямком розвитку методології верифікації ергатичних систем залізничної автоматики є вдосконалення підходів щодо врахування диференційованого людського фактора на підсумкові показники безпеки використання.

Метою дослідження є розробка математичних моделей оцінювання безпеки використання ергатичних систем керування та регулювання руху поїздів, які враховують інтерактивну взаємодію всіх видів персоналу і технічних засобів залізничної автоматики. Такі моделі мають враховувати функціонування систем як у штатному, так і в допоміжному режимах, а також характер взаємної інтерактивної взаємодії її людських і технічних ресурсів.

Основна частина дослідження

З розвитком інтерактивної взаємодії між технічними засобами та персоналом КРРП підходи до визначення безпеки використання систем залізничної автоматики (ЗА) повинні враховувати такі фактори:

- врахування показників надійності та безпечності представників не тільки оперативного, але й технічного та інших видів персоналу (залежно від типу системи, що використовується);
- перехід від оцінювання функційної безпечності до безпеки використання не тільки ергатичних (автоматизованих), але й автоматичних систем КРРП.

У такому випадку узагальнена функціональна схема формування, передачі та виконання команди керування довільної системи КРРП з урахуванням штатного та різних варіацій допоміжного режимів керування виглядає як на рис. 1.

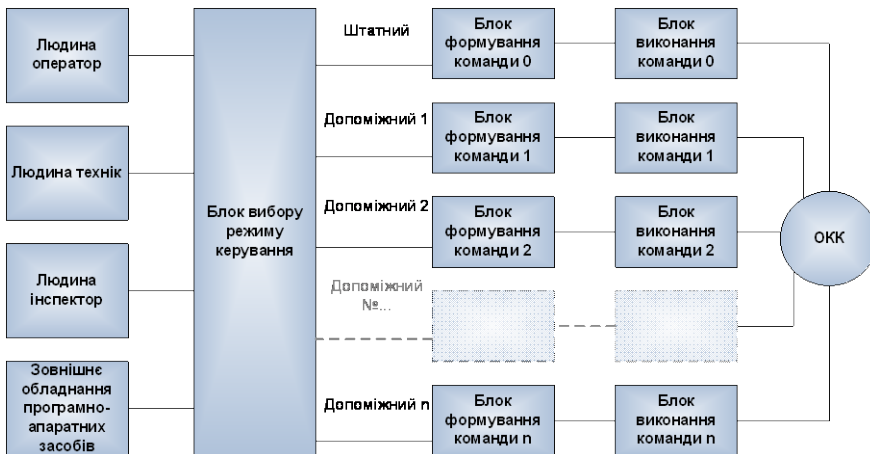


Рис. 1. Узагальнена функціональна схема реалізації команди керування системою КРРП з урахуванням інтерактивної взаємодії з персоналом штатний (режим № 0) або один чи декілька з допоміжних (№№ 1 – n).

У штатному режимі функціонування системи (режим № 0) через відповідні блоки керування та виконання команди з перевіркою всіх умов безпеки (програмно-апаратними засобами) здійснюється необхідна комутація керуючих кіл ОКК. У такому випадку людський фактор не задіяний в безпосередньому процесі реалізації команди керування, тому не враховується у верифікації процесів забезпечення руху потягів технічними засобами. У разі виявлення засобами технічного діагностування необхідних ознак, згідно з якими передбачено перехід системи (в аспекті реалізації конкретної команди або групи команд) в один або декілька допоміжних режимів, відбувається реалізація цього переходу, після чого необхідним є врахування людського фактора в контексті забезпечення руху потягів.

З урахуванням результатів робіт [2], [3], зокрема — параметра допустимого простою в роботі системи КРРП після захисної відмови, ймовірність небезпечної відмови системи КРРП за експоненціального закону надійності, у разі нехтування параметрами безпечності технічних компонентів системи в допоміжному режимі, визначається таким чином [25]:

$$Q_{H_СКРРП} = \begin{cases} Q_{H_ПАЗ}(t), t \in [t_0; t_3) \cup [t_3 + T_{nn} + \Delta t; t_k], \\ 0, t \in [t_3; t_3 + T_{nn}), \\ \left\{ \begin{array}{l} \prod_{i=1}^n X_i Q_{H_pi}(t), L_{РЛСФБ} = seq, \\ 1 - \prod_{i=1}^n Y_i P_{\bar{\sigma}_pi}(t), L_{РЛСФБ} = par, \\ 1 - \prod_{j=1}^m \left[1 - \prod_{k=1}^r Y_k P_{\bar{\sigma}_pjk}(t) \right], L_{РЛСФБ} = mix, \end{array} \right. , t \in [t_3 + T_{nn}; t_3 + T_{nn} + \Delta t), \end{cases} \quad (1)$$

$$\sum_j j + \sum_k k = \sum_i i = m + r = n,$$

Підсистема технічного діагностування, інтегрована в блок вибору режиму функціонування, визначає конкретний режим з урахуванням вихідних даних, наданих представниками всіх видів персоналу (оперативного, технічного та інспекційного) та зовнішніх технічних засобів у рамках інтерактивної взаємодії визначає конкретний режим функціонування системи при виконанні команди об'єкта керування та контролю (ОКК) —

де $Q_{H_ПАЗ}(t)$ — ймовірність небезпечної відмови програмно-апаратних засобів (ПАЗ) системи КРРП протягом часу експлуатації t ; t_0 — вихідний опорний час експлуатації системи КРРП (визначається початком експлуатації або початком попередньої верифікації системи КРРП); t_3 — момент виникнення захисної відмови системи КРРП; T_{mn} — тривалість припустимого простою в роботі системи КРРП після виникнення захисної відмови (до переходу системи в допоміжний режим); Δt — перевищення часу відновлення ПАЗ системи КРРП над часом її допустимого простою після захисної відмови; $Q_{n_pi}(t)$ — ймовірність небезпечної відмови людських ресурсів та ПАЗ при реалізації допоміжного режиму функціонування № i ($i = \overline{1, n}$) та їх послідовному з'єднанні в розрахунково-логічній схемі функційної безпечності (РЛСФБ); $P_{\bar{o}_pi}(t)$ — ймовірність безпечної роботи людських ресурсів та ПАЗ при реалізації допоміжного режиму функціонування № i ($i = \overline{1, n}$) та їх паралельному з'єднанні в РЛСФБ; $P_{\bar{o}_pjk}(t)$ — ймовірність безпечної роботи людських ресурсів та ПАЗ при реалізації допоміжного підрежиму функціонування № k ($k = \overline{1, r}$) режиму № j ($j = \overline{1, m}$) та їх змішаному з'єднанні в РЛСФБ; X_i, Y_i, X_k — параметри, що визначають включення або відсутність включення відповідних людських ресурсів та ПАЗ відповідних режимів функціонування системи КРРП до РЛСФБ; $L_{РЛСФБ}$ — параметр, що визначає характер включення людських ресурсів та ПАЗ системи КРРП до РЛСФБ (*seq, par, mix* — відповідно послідовне, паралельне та змішане з'єднання елементів у схемі).

Параметри X_i, Y_i, X_k у формулі (1) визначаються як значення, що зберігають або невілюють ймовірності небезпечних відмов або безпечної роботи залежно від наявності/відсутності впливу відповідних режимів на безпеку використання системи КРРП

$$X_i = \begin{cases} 1, M_{pi} \subset M_{РЛСФБ}, \\ \frac{1}{Q_{n_pi}(t)}, M_{pi} \not\subset M_{РЛСФБ}; \end{cases} \quad Y_i = \begin{cases} 1, M_{pi} \subset M_{РЛСФБ}, \\ \frac{1}{P_{\bar{o}_pi}(t)}, M_{pi} \not\subset M_{РЛСФБ}; \end{cases}$$

$$Y_k = \begin{cases} 1, M_{pjk} \subset M_{РЛСФБ}, \\ \frac{1}{P_{\bar{o}_pjk}(t)}, M_{pjk} \not\subset M_{РЛСФБ}, \end{cases} \quad (2)$$

де M_{pi}, M_{pjk} — відповідно множини елементів (людських ресурсів та ПАЗ), що забезпечують функціонування режиму № i та під режиму № k режиму № j функціонування системи КРРП; $M_{РЛСФБ}$ — множина елементів РЛСФБ для певного режиму або групи режимів функціонування КРРП.

Значення ймовірностей безпечної роботи та небезпечних відмов у формулах (1) і (2) при експоненціальному законі розподілу, за умови послідовного з'єднання елементів у складі РЛСФБ для кожного окремого режиму (під режиму), відповідно до [1], [2], [25] визначаються як

$$Q_{H_ПАЗ}(t) \Big|_{L_{РЛСФБ}=seq} = 1 - P_{\bar{o}_ПАЗ}(t) \Big|_{L_{РЛСФБ}=seq} = 1 - e^{-\sum_{a=1}^b \lambda_{n_ПАЗ_a} t};$$

$$Q_{n_pi}(t) \Big|_{L_{РЛСФБ}=seq} = 1 - P_{\bar{o}_pi}(t) \Big|_{L_{РЛСФБ}=seq} = 1 - e^{-\left(\sum_{l=1}^s \lambda_{ЛР_l} + \sum_{u=1}^w \lambda_{ПАЗ_u}\right) t}; \quad (3)$$

$$P_{\bar{o}_pjk}(t) \Big|_{L_{РЛСФБ}=seq} = 1 - Q_{n_pjk}(t) \Big|_{L_{РЛСФБ}=seq} = e^{-\left(\sum_{h=1}^g \lambda_{ЛР_h} + \sum_{o=1}^v \lambda_{ПАЗ_o}\right) t},$$

де $P_{\bar{o}_ПАЗ}(t)$ — ймовірність безпечної роботи ПАЗ системи КРРП у штатному режимі функціонування системи КРРП (режим № 0); $Q_{n_pjk}(t)$ — ймовірність небезпечної роботи ресурсів і засобів підрежиму № k режиму № j функціонування системи КРРП; $\lambda_{ЛР}$, $\lambda_{ПАЗ}$ — відповідно, інтенсивності небезпечних відмов (помилки) елементів людських ресурсів та ПАЗ (індекс у формулі визначає порядковий номер елемента у складі ресурсів); b, w, v — кількість елементів ПАЗ, включених до фрагментів РЛСФБ відповідно до режиму № 0, режиму № i , підрежиму № k режиму № j ; s, g — кількість людських ресурсів, включених до фрагментів РЛСФБ відповідно до режиму № i , підрежиму № k режиму № j .

У разі паралельного та/або змішаного характеру з'єднань елементів у фрагментах РЛСФБ для окремих режимів, вирази (3) перетворюються відповідно до правил, зазначених у [25].

За умови нехтування ПАЗ системи КРРП у складі режиму за наявності в ньому включених до РЛСФБ людських ресурсів ($\lambda_{н_ЛР} \gg \lambda_{н_ПАЗ}$), нижні два вирази у формулі (3) набувають вигляду

$$Q_{н_pi}(t) \Big|_{L_{РЛСФБ}=seq, \lambda_{ЛР} \ll \lambda_{ПАЗ}} = 1 - e^{-\sum_{l=1}^s \lambda_{ЛР_l} t};$$

$$P_{\sigma_pij}(t) \Big|_{L_{РЛСФБ}=seq, \lambda_{ЛР} \ll \lambda_{ПАЗ}} = e^{-\sum_{h=1}^g \lambda_{ЛР_h} t}.$$
(4)

З урахуванням максимальної тривалості робочої зміни оперативного й технічного персоналу на залізничному транспорті на рівні 12 годин відповідно до формул (1)—(4) у програмному середовищі MathCAD_15.0 побудовано сімейство графіків залежностей ймовірності небезпечної відмови системи КРРП у допоміжному режимі функціонування від часу (протягом зміни) та кількості представників людського ресурсу, задіяних у інтерактивній взаємодії з системою, з такими припущеннями:

- інтенсивність небезпечних відмов ПАЗ $\lambda_{н_ПАЗ} = 0$;
- однакове постійне значення інтенсивності небезпечних відмов для кожного представника людського ресурсу $\lambda_{н_ЛР_l} = const = 10^{-6}, 10^{-5}, \dots, 10^{-2}$ 1/год.

Побудовані графічні залежності показані на рис. 2.

Аналогічно з використанням того ж програмного середовища з тими самими припущеннями побудовано також графіки залежності $Q_{н_СКРРП}(\lambda_{н_ЛР}, N_{ЛР}, t)$ відповідно при $N_{ЛР} = const = 3, 5, 10, 15, 20$ осіб; $t = const = 1, 3, 6, 8, 12$ год. (рис. 3, 4).

З аналізу всіх трьох сімейств залежностей вбачається, що навіть за мінімальних значень часу експлуатації системи, задіяного людського ресурсу та показників його функційної безпечності ризик використання системи КРРП відповідно до Міжнародної шкали визначається як винятково високий. Вже за середніх значень аргументів функції $Q_{н_СКРРП}(\lambda_{н_ЛР}, N_{ЛР}, t)$ ймовірність небезпечної відмови системи КРРП у допоміжних режимах коливається в діапазоні від 0,4 до 0,6, а з граничними значеннями, зокрема — наприкінці робочої зміни, досягає значення 1.

Порівнюючи отримані результати опосередкованого впливу безвідмовності на безпеку використання системи КРРП при інтерактивній взаємодії всіх видів персоналу з системою з результатами дослідження взаємодії системи тільки з оперативним персоналом, опублікованих у працях [2], [3], вбачається значно вищий ступінь такого впливу, враховуючи крутизну відповідних графіків.

Встановлення кореляційного або безпосереднього зв'язку між показниками безвідмовності техні-

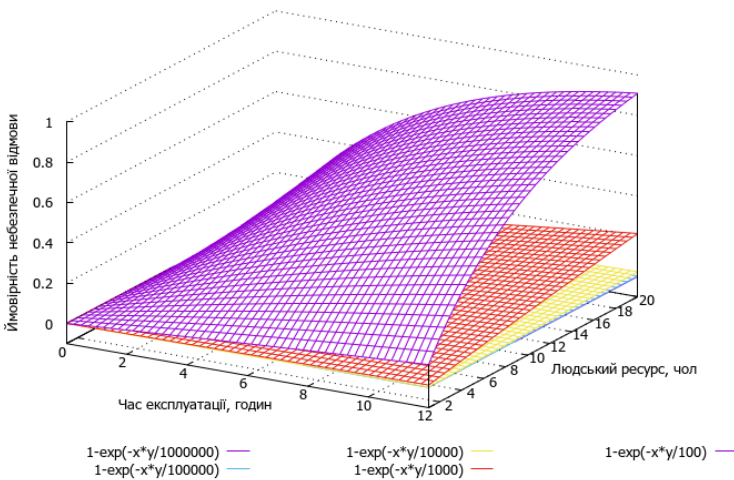


Рис. 2. Сімейство поверхневих графіків залежності ймовірності небезпечної відмови системи КРРП від часу та обсягу людського ресурсу протягом робочої зміни

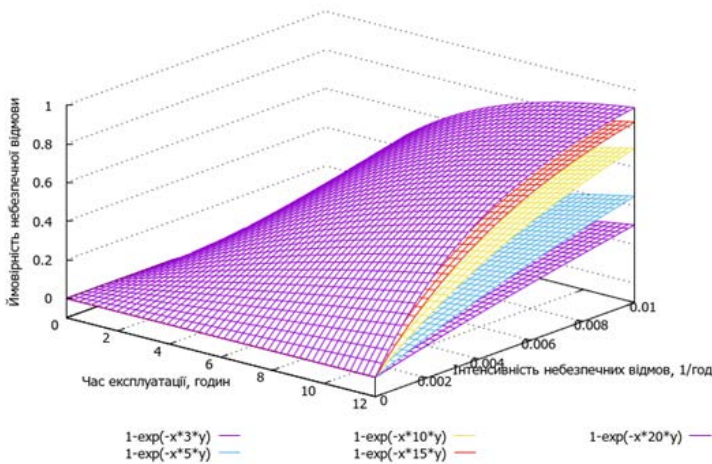


Рис. 3. Сімейство поверхневих графіків залежності ймовірності небезпечної відмови системи КРРП від часу та інтенсивності небезпечних відмов елементів людського ресурсу протягом робочої зміни

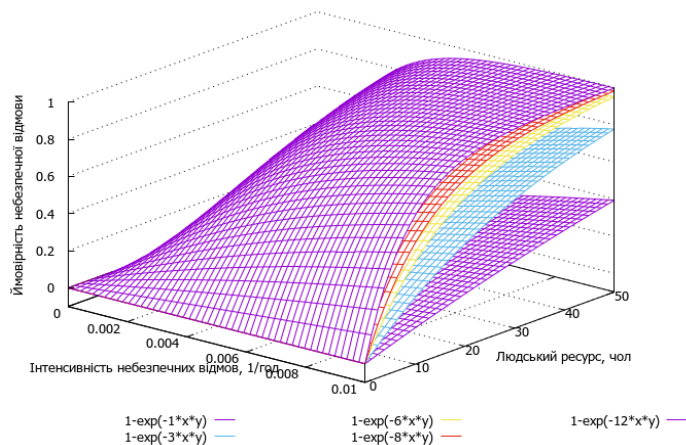


Рис. 4. Сімейство поверхневих графіків залежності ймовірності небезпечної відмови системи КРПІ від обсягу та інтенсивності небезпечних відмов людського ресурсу протягом робочої зміни значення з позиції задоволення клієнтів у якісних пасажирських та вантажних перевезеннях. Таким чином, забезпечення заданих показників призначення становить не менш важливу функцію верифікації таких систем, зокрема у контексті імітації та моделювання елементів і процесів КРПІ на різних етапах життєвого циклу відповідних систем.

Висновки

Розроблені математичні моделі верифікації ергатичних засобів залізничної автоматики в контексті удосконалення підходу до оцінки їх безпеки використання мають стати підставою для оновлення технології їх проектування, виробництва та сертифікації. Подальший розвиток у цьому напрямі полягає в формуванні відповідних моделей тестування прикладного програмного забезпечення й випробувань апаратно-технічних засобів з урахуванням інтерактивної взаємодії всіх видів персоналу й техніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] N. Aripov, R. Aliyev, D. Baratov, and E. Ametova, "Features of Construction of Systems of Railway Automatics and Telemechanics at the Organization of High-Speed Traffic in the Republic of Uzbekistan," *Procedia Engineering*, vol. 134, pp. 175-180, 2016.
- [2] О. Ю. Каменев, «Проблематика підходів до дослідження безпеки використання ергатичних систем керування на залізничному транспорті. Наука та прогрес транспорту.» *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*, вип. 44, с. 7-16, 2013.
- [3] *Дослідження функційної безпеки та електромагнітної сумісності мікропроцесорної системи електричної централізації станції «Вугільна» на етапі імітаційних та стендових випробувань*, звіт з НДР (пром.ж.). Харків. Укр-ДАЗТ; керівник А. Б. Бойнік, 2012. Номер держ. реєстр. 0112U006925; інв. номер 0713U007283.
- [4] K. Kanso, F. Moller, and A. Setzer, "Automated Verification of Signalling Principles in Railway Interlocking," *Electronic Notes in Theoretical Computer Science Systems*, vol. 250, issue 2, pp. 19-31, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.entcs.2009.08.015>.
- [5] I. S. Ener, O. T. Kaymakç, Usto Glu 'I, and G. Cansever, "Specification and formal verification of safety properties in a point automation System," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 24, pp. 1384-1396, 2016. <https://doi.org/10.3906/elk-1311-27>.
- [6] M. Aanæs and Hoang Phuong Thai, *Modelling and Verification of Relay Interlocking Systems*. Technical University of Denmark Informatics and Mathematical Modelling Denmark. Kongens Lyngby, 2012, pp. 360.
- [7] A. Fantechi, T. Lecomte, and A. Romanovsky, "Reliability, Safety, and Security of Railway Systems. Modelling, Analysis, Verification, and Certification," in *Second International Conference, RSSRail, 2017 Pistoia, Italy, November 14-16, 2017 Proceedings*. 2017. Pistoia. Italy. pp. 217. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68499-4>.
- [8] M. Kans, D. Galar, and A. Thaduri, *Maintenance 4.0 in Railway Transportation Industry. A data fusion approach of multiple maintenance data sources for real-world reliability modeling*, 2016, pp. 317-331. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-27064-730>.
- [9] Kameniev O., Lapko A., and Shcheblykina E. "Improvement of technologies for the development of modern rail automation systems," in *Proceedings II International Scientific Conference "Industry 4.0". Borovets, Bulgaria, 13-16 december 2017*. Sofia, Bulgaria: *Scientific technical union of mechanical engineering "Industry-4.0"*, 2017, vol. 1/1. pp. 107-110.
- [10] Rojko A., "Industry 4.0 Concept: Background and Overview," *ECPE European Center for Power Electronics e.V. Nuremberg*. Germany, vol. 11, № 5, pp.77-90, 2017.
- [11] J. Marais, J. Beugin, and M. Berbineau, "A Survey of GNSS-Based Research and Developments for the European Railway Signaling," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 10 (18). pp. 2602-2618, 2017.
- [12] Fei Yan, Chunhai Gao, Tao Tang, and Yao Zhou, "A Safety Management and Signaling System Integration Method for Communication-Based Train Control System," *Urban Rail Transit*, vol 3, issue 2, pp. 90-99, 2017.
- [13] V. Markevicius, D. Navikas, A. Idzkowski, D. Andriukaitis, A. Valinevicius, and M. Zilys, "Practical Methods for Vehicle Speed Estimation Using a Microprocessor-Embedded System with AMR Sensors," *Sensors (Basel)*, vol. 18(7), 2225, pp. 1-12,

ки, надійності людини (оперативного, технічного та інспекційного персоналу) та безпекою використання системи виходить за межі цієї роботи та потребує окремого дослідження.

Так чи інакше, отримані результати додатково підтверджують недостатність врахування виключно показників функційної безпеки техніки при вирішенні питань її верифікації в умовах сучасного розвитку науково-технічного прогресу.

Крім того, в умовах розвитку потреб суспільства, зокрема — в контексті потреб та досягнень Industry-4.0 у сфері залізничного транспорту, не менш важливими параметрами систем КРПІ ніж показники безпеки використання становлять показники їх при-

2018. <https://doi.org/10.3390/s18072225>.

[14] А. Ю. Каменев, А. Б. Бойник, и В. Ф. Кустов, «Вопросы взаимной интеграции систем железнодорожной автоматики.» *тезисы Междунар. науч.-практ. конференции «Современные информационные и коммуникационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании»* (14-15 декабря, 2015, г. Днепр.). Днепр: ДНУЖТ им. академика В. Лазаряна, 2016, с. 15-16.

[15] В. І. Мойсеєнко, «Методи та моделі підвищення безпеки використання систем керування залізничної автоматики шляхом оперативного виявлення порушень.» дис. ... д-ра. техн. наук: 05.22.20 - експлуатація та ремонт засобів транспорту, Харків, Українська державна академія залізничного транспорту: УкрДАЗТ, 2011, 356 с.

[16] А. Н. Либерман, *Техногенная безопасность: человеческий фактор*. Санкт-Петербург: изд-во "ВИС", 2006, 104 с.

[17] В. І. Мойсеєнко, ред. Г. І. Загарія, *Мікропроцесорні системи залізничної автоматики. Ч. 1. Централізація стрілок та сигналів*. Харків, 1999, 147 с.

[18] В. І. Мойсеєнко, О. М. Огар, і В. В. Гаєвський, «Розвиток залізничних цифрових систем та технологій у контексті інженерії 4.0.» *Українські залізниці*, вип. 16, с. 9-14, 2019.

[19] J.-G. Hwang, J.-H. Baek, H.-J. Jo, and K.-M. Lee, "Black-box testing tool of railway signalling system software with a focus on user convenience," *WIT Transactions on The Built Environment*. Korea, vol 135, pp. 99-108, 2014. <https://doi.org/10.2495/CR140081>.

[20] R. C. Short, "Software Validation for a Railway Signalling System," *IFAC Proceedings*, vol. 16, issue 18, pp. 183-193. 1983.

[21] X. Chen, D. Wang, H. Huang, and Z. Wang, "Verification and validation in railway signalling engineering – an application of enterprise systems techniques," *Enterprise Information Systems*, vol. 8:4, pp. 490-511, 2014. <https://doi.org/10.1080/17517575.2013.835071>.

[22] РД РБ БЧ 19.055-99. *Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики*. Общие положения, порядок и методы проведения испытаний на безопасность. Минск, 1999, 20 с.

[23] РД РБ БЧ 19.057-99. *Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики*. Общие положения, порядок и методы доказательства безопасности систем и устройств ЖАТ. Минск, 1999, 20 с.

[24] ДСТУ 4178-2003. *Комплекси технічних засобів систем керування та регулювання руху поїздів. Функційна безпечність і надійність. Вимоги та методи випробовування*. Київ: Держспоживстандарт України, 2003, 32 с.

[25] *Методика доказу функціональної безпеки мікроелектронних комплексів систем керування та регулювання рухом поїздів*. Затв. наказом «Укрзалізниці» від 17.08.2002 р. № 452-Ц. Київ.: Вид. ПП «Алькор», 2002, 106 с.

[26] "Interactive approaches to the organization off staff interaction with automated control systems," *Proceedings V International Scientific and Technical Conference «Engineering. Technologies. Education. Security'2017»* (Veliko Tarnovo, Bulgaria, 31 May – 03 June 2017). Sofia, Bulgaria: Scientific technical union of mechanical engineering "Industry-4.0", vol. 2, pp. 221-224, 2017.

Рекомендована кафедрою автомобілів та транспортного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 19.08.2020

Каменєв Олександр Юрійович — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, e-mail: alexstein@kart.edu.ua ;

Ланко Антон Олександрович — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, e-mail: a.o.lapko@kart.edu.ua ;

Щебликіна Олена Вікторівна — аспірантка кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, e-mail: sov@kart.edu.ua .

Український державний університет залізничного транспорту, Харків

O. Yu. Kameniev¹
A. O. Lapko¹
O. V. Shcheblykina¹

Mathematical Models for Verification of Ergatic Systems of Railway Automation

¹Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv

Issues related to the impact of operational, technical and inspection personnel on the safety of the use of ergatic railway automation systems have been addressed. In the conditions of interactive interaction of all types of personnel and equipment mathematical models for calculation of parameters of safety of use of such systems which consider their functioning in a regular and pre-auxiliary mode in various contexts of relations of human and technical factors are developed. It is established and proved that different modes of interactive interaction form a differentiated structure of calculation and logic schemes for assessing the safety of the use of ergatic control systems in railway transport.

The functioning of ergatic control systems in railway transport has significant features associated with the inadmissibility of technological process downtime at infrastructure facilities. In this regard, in such systems there is an auxiliary control mode, in the framework of which blocking dependencies are completely or partially removed, which ensures the technological safety of the use of such systems. In recent years, a piecewise-defined character of mathematical models has been established on the basis of which a numerical safety assessment of the use of such control systems can be performed, which is due to the predominance of technical and human factors in different modes of functioning of such systems. At the same time, the development of forms of interactive interaction between different types of personnel in the active modes of operation of control systems requires a fundamentally new approach to safety assessment – taking into account the influence of differentiated human and integrated technical factors. In this regard, in this study, mathematical models are developed that allow you to take into account the interactive interaction of man and technology in the process of assessing the safety of the use of automated ergatic systems of railway automation. The graphical 3D dependencies built on their basis

make it possible to carry out a predictive safety assessment of different systems in the process of their functioning during one working shift of operational, technical and audit personnel. In particular, the formation of mathematical models for calculating safety at different time intervals, which determine the auxiliary and standard operating modes of control systems, provides a differentiation of accounting for various factors when they dominate. An approach based on taking into account the influence of all types of personnel during their interaction with technology is reduced to considering different types of element connections in the calculation and logic schemes of the functional safety of systems, which reduces to different types of formulas in the final piecewise-defined expression for assessing the safety of using such systems.

Keywords: railway automation, ergatic system, safety of use, calculation and logic circuit, software and hardware, operating modes, exponential distribution law.

Kameniev Oleksandr Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Automatic and Computer Remote Control of Train Traffic, e-mail: alexstein@kart.edu.ua ;

Lapko Anton O. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Automatic and Computer Remote Control of Train Traffic, e-mail: a.o.lapko@kart.edu.ua ;

Shcheblykina Olena V. — Post-Graduate Student of the Chair of Automatic and Computer Remote Control of Train Traffic, e-mail: sov@kart.edu.ua

А. Ю. Каменев¹
А. О. Лапко¹
Е. В. Щеблыкина¹

Математические модели верификации эргатических систем средств железнодорожной автоматики

¹Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, Харьков

Проработаны вопросы, связанные с учетом влияния оперативного, технического и инспекционного персонала на безопасность использования эргатической систем железнодорожной автоматики. В условиях интерактивного взаимодействия всех видов персонала и техники разработаны математические модели для расчета параметров безопасности использования таких систем, учитывающих их функционирование в штатном и во вспомогательном режимах в различных контекстах соотношений человеческого и технического факторов. Установлено и доказано, что различные режимы интерактивного взаимодействия формируют дифференцированную структуру расчетно-логических схем для оценки безопасности использования эргатических систем управления на железнодорожном транспорте.

Функционирование эргатических систем управления на железнодорожном транспорте имеет существенные особенности, связанные с недопустимостью простоя технологического процесса на объектах инфраструктуры. В связи с этим в таких системах существует вспомогательный режим управления, в рамках которого полностью или частично устраняются блокировочные зависимости, обеспечивающие технологическую безопасность использования таких систем. В исследовании установлен кусочно-заданный характер математических моделей, на основе которого может быть проведена численная оценка безопасности использования таких систем управления, что обусловлено учетом технического и человеческого факторов в различных режимах функционирования таких систем. В то же время развитие форм интерактивного взаимодействия между различными типами персонала в активных режимах работы систем управления требует принципиально нового подхода к оценке безопасности — с учетом влияния дифференцированных человеческих и интегрированных технических факторов. В связи с этим в исследовании разработаны математические модели, позволяющие учесть интерактивное взаимодействие человека и техники в процессе оценки безопасности использования эргатических систем железнодорожной автоматики. Построенные на их основе графические 3D-зависимости позволяют проводить прогнозную оценку безопасности различных систем в процессе их функционирования в течение одной рабочей смены эксплуатационного, технического и инспекционного персонала. В частности, формирование математических моделей для расчета безопасности через различные интервалы времени, которые определяют вспомогательный и штатный режимы работы систем управления, обеспечивает дифференциацию учета различных преобладающих факторов. Подход, основанный на учете влияния всех типов персонала во время их интерактивного взаимодействия с техническими средствами, сводится к учету различных типов элементных связей в расчетно-логических схемах функциональной безопасности систем, что, в свою очередь, сводится к различным типам формул в конечном кусочно-заданном выражении для оценки безопасности использования таких систем.

Ключевые слова: железнодорожная автоматика, эргатическая система, безопасность применения, расчетно-логическая схема, программно-аппаратные средства, режимы функционирования, экспоненциальный закон распределения.

Каменев Александр Юрьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и компьютерного телеуправления движением поездов, e-mail: alexstein@kart.edu.ua ;

Лапко Антон Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и компьютерного телеуправления движением поездов, e-mail: a.o.lapko@kart.edu.ua ;

Щеблыкина Елена Викторовна — аспирант кафедры автоматики и компьютерного телеуправления движением поездов, e-mail: sov@kart.edu.ua