УДК 656.2: 621.3: 614.8 DOI: 10.18664/ikszt.v28i2.283281

ПАНЧЕНКО С. В., д.т.н., професор (Український державний університет залізничного транспорту),
БУНЧУКОВ О. А. (Департамент автоматики та телекомунікацій Укрзалізниці),
КУСТОВ В. Ф., к.т.н., доцент,
СОТНИК В. О., к.т.н., доцент
(Український державний університет залізничного транспорту)

Удосконалення якості оцінювання функційної безпечності систем залізничної автоматики за наявності кратних небезпечних відмов у каналах резервування

У статті розглянуто питання удосконалення покращення якості оцінювання функційної безпечності систем залізничної автоматики, у яких внаслідок відмов і збоїв обладнання можуть виникати небезпечні стани і пов'язані з ними аварії та катастрофи поїздів, недопустимі збитки щодо здоров'я і життя людей, пошкодження майна та негативний вплив на довкілля. Наведено практичне і теоретичне обґрунтування можливості появи одночасних кратних небезпечних відмов у каналах резервування. Розроблено математичні моделі для розрахування показників функційної безпечності з урахуванням одночасного впливу дестабілізуючих чинників на всі канали резервування відповідальних пристроїв і систем. Сформульовано висновки про розроблення та експлуатацію пристроїв захисту від ударних впливів на всі канали резервування і кратних небезпечних відмов. Результати досліджень можуть бути корисними для електричних/електронних/програмованих електронних систем керування з підвищеними вимогами до функційної безпечності, у тому числі на атомних станціях, в авіації, космічній техніці, хімічній промисловості, медицині, системах воєнного призначення.

Ключові слова: *аварії, електричні/електронні/програмовані електронні системи керування, катастрофи, надійність, небезпечні відмови, небезпечні стани, системи залізничної автоматики, функційна безпечність.*

Вступ

Сучасні і перспективні системи залізничної автоматики (СЗА) будуються на основі використання електронних та електронних/програмованих пристроїв, у тому числі на базі мікропроцесорних контролерів та ЕОМ. У цих пристроях виникають не тільки захисні збої та відмови, що призводять до затримок поїздів, але й внаслідок симетричних відмов електронних елементів можуть формуватися небезпечні стани, які можуть призводити до несанкціонованих керуючих впливів (переведення стрілок під поїздом, відкриття дозвільних показань світлофорів на зайняті колійні дільниці, встановлення лобових маршрутів на станціях тощо). Тому головною умовою введення в експлуатацію електронних систем залізничної автоматики є забезпечення їхньої функційної безпечності (ФБ).

Постановка проблеми

Основні вимоги щодо ФБ і надійності СЗА наведено в національних стандартах [1-3] і нормативних документах АТ «Укрзалізниця» [4, 5]. Основою для впровадження та введення в експлуатацію СЗА є «Доказ функційної безпечності», розроблюваний виробником продукції, і «Висновок щодо функційної безпечності», що надається фаховою організацією галузі. Необхідним першочерговим етапом доведення ФБ є розрахування її показників. Очевидно, що якісне оцінювання і правильне розрахування ФБ є одним із чинників визначення на ранніх етапах розроблення СЗА можливості виникнення при експлуатації небезпечних станів і пов'язаних з ними недопустимих збитків, виникнення аварій і катастроф, а також проведення доопрацювання СЗА до вимог стандартів з ФБ.

При проведенні розрахунків показників ФБ СЗА згідно з затвердженою методикою в залізничній галузі [4] використовують математичні моделі, де враховують тільки незалежні відмови. Дійсно, у багатьох випадках відмови настають послідовно в часі і мають найпростіший потік відмов, у тому числі небезпечних. Але в реальних умовах експлуатації можуть бути і кратні відмови, тому необхідно визначити ймовірність появи таких відмов, що можуть призвести до небезпечних станів СЗА, дослідити можливість урахування їх у математичних моделях і розробити рекомендації щодо найкращого захисту від них.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для забезпечення ФБ необхідно насамперед визначити нормативи та методи оцінювання ФБ. Основні методи обґрунтування кількісних вимог з допустимої інтенсивності небезпечних відмов функцій безпечності як для СЗА в цілому, так і окремих каналів резервування наведено в роботі [6], у якій також обґрунтовані допустимі наробітки щодо небезпечної відмови окремих каналів резервування. Особливості стратегій нормування ФБ та розроблення вимог з ФБ для систем залізничної автоматики наведено в роботах [7, 8]. Математичні моделі для основних способів резервування досліджено в наукових працях [9, 10]. Особливості розрахування і формули функційної безпечності та безвідмовності відновлюваних технічних засобів при використанні мажоритарного резервування «2» із «3» наведено в роботі [11]. Розглянуто також особливості забезпечення функціональної безпеки мікропроцесорних систем керування та контролю на залізничному транспорті [12]. Слід зазначити, що недостатньо уваги приділяється врахуванню кратних небезпечних відмов як у наукових дослідженнях, так і нормативних документах галузі.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми та формулювання цілей

Для вирішення загальної проблеми якісного доведення ФБ проведемо аналіз можливості виникнення одночасних дестабілізуючих впливів на СЗА, а також шляхи визначення показників ФБ з урахуванням можливості появи в них кратних залежних небезпечних збоїв і відмов і рекомендації щодо використання пристроїв захисту від їх виникнення.

Виклад основного матеріалу дослідження

Порушення функційної безпечності в першу чергу відбувається при виникненні однократних і незалежних відмов комплектувальних елементів і каналів резервування.

Теоретично небезпечний стан систем залізничної автоматики може виникати також і внаслідок відмов найбільш чутливих до теплового пробою елементів у різних каналах резервування, наприклад під час негативної дії потужних електромагнітних завад (грозових перенапружень, тягового струму тощо) одночасно на два фототранзистори дубльованих оптронів контролерів виведення дискретної інформації, що вмикають відповідальні виконавчі реле в каналах резервування за варіантом «І», що може призводити до несанкціонованого вмикання двигунів стрілок чи відкриття дозвільних сигналів на залізничних світлофорах замість заборонних.

Теоретичне обґрунтування одночасного впливу дестабілізуючих чинників на всі канали загального навантажувального резервування чи будь-які два канали резервування мажоритарних систем «2» з «3» можна підтвердити практичними прикладами, що виявлено при впровадженні мікропроцесорних систем, у тому числі за участі авторів. Так, у СЗА можуть виникати кратні небезпечні відмови, наприклад при одночасних впливах дестабілізуючих чинників на всі канали резервування:

- від потужних електромагнітних завад внаслідок дії грозових перенапружень чи комутаційних процесів в електротяговій мережі. Так, грозові перенапруження призвели до однієї з найбільших резонансних залізничних катастроф у світі на високошвидкісних ділянках – у китайській провінції Вєнчжоу внаслідок дії блискавки та відсутності необхідної апаратури захисту сигнальної апаратури від грозових впливів була сформована небезпечна відмова у вигляді хибної вільності колії, на якій стояв високошвидкісний поїзд, що відкрило дозвільний сигнал на вхідному світлофорі для беззупинного пропускання іншого високошвидкісного поїзда по цій зайнятій колії і призвело до зіткнення поїздів з жахливими наслідками, при цьому чотири вагони першого поїзда ще й впали з віадука з висоти від 20 до 30 м;
- підвищення температури внаслідок відмови пристроїв вентиляції чи кондиціонування повітря в шафах, де розміщуються всі канали резервування на базі ЕОМ чи мікропроцесорних контролерів керування та контролю (реальні приклади: недопустиме підвищення температури при вимкненні вентиляторів у шафі ЕОМ залежностей мікропроцесорної системи електричної централізації стрілок і сигналів поста «Південний» Алчевського металургійного комбінату під час пусконалагоджувальних робіт призвело до збоїв у роботі ЕОМ залежностей, увімкнених за варіантом мажоритарного навантажувального резервування «2» з «3»; підвищення температури в шафах об’єктних контролерів внаслідок несвоєчасного встановлення кондиціонерів в апаратному приміщенні мікропроцесорної централізації стрілок і сигналів

станції «Передача-Донецьк» ЗАО «Донецьк-сталь» призводило до одночасних збоїв у роботі мікропроцесорних контролерів світлофорів, увімкнених за варіантом навантажувального резервування «2» з «2» з розв'язувальним елементом «І»);

- суттєвого підвищення вологості й температури внаслідок порушення цілісності трубопроводів з гарячою чи холодною водою (потрапляння гарячої води з дуже високою температурою на промислові ЕОМ та мікропроцесорні контролери релейно-мікропроцесорної централізації залізничної станції «Вапняна» металургійного комбінату ім. Ілліча (м. Маріуполь)).

З урахуванням можливості виникнення кратних небезпечних відмов такі впливи пропонується називати ударними впливами і використовувати для них пристрої захисту від ударних впливів (ПЗУВ). Для забезпечення необхідної функційної безпечності при навіть дуже малих значеннях імовірностей відмов таких пристроїв і негативних наслідків від ударних впливів необхідно використовувати додаткові резервні ПЗУВ.

Використання для цього навантажувального резервування для ПЗУВ не потребує «ідеальних» перемикачів, але одночасний вплив на них, наприклад грозових перенапружень, може призвести до одночасної їхньої відмови і появи кратних відмов у системах автоматизації.

Тому розглянемо можливість і особливості використання в ПЗУВ у першу чергу ненавантажувального резервування та його мінімального варіанта – дублювання.

Очевидно, що ймовірність небезпечної відмови систем автоматизації не має бути більшою за імовірність виникнення такої кратної відмови, спричиненої ударними впливами. Тобто інтенсивність відмов таких ПЗУВ має бути менше допустимих стандартизованих рівнів SIL з функційної безпечності [1, 3]. Аналіз цих норм показує, що дуже складно забезпечити захист від ударних впливів з інтенсивністю відмов нижче допустимих норм за найбільш жорстким четвертим рівнем SIL. При цьому треба враховувати, що на надійність роботи, наприклад обмежувачів напруги для захисту від грозових перенапружень, впливають не тільки надійність їхніх комплектувальних елементів (розрядників, варисторів, супресорів тощо), але й параметри контуру заземлення (активна та індуктивна складові його опору, що залежать від матеріалу, довжини та форми перерізу шин заземлення), а також зміна опору землі в місцях розташування контуру заземлення за рахунок промерзання ґрунту, зменшення його вологості тощо).

У більшості випадків відмови ПЗУВ є неконтрольованими, тому при дії таких чинників можуть бути кратні одночасні відмови в різних каналах резервування, у тому числі й небезпечні відмови.

Так, у найбільш розповсюджених способах резервування – загальному навантажувальному дублюванні «2» з «2» і мажоритарному резервуванні «2» з «3» небезпечний стан може виникнути в разі двох однакових небезпечних відмов у різних каналах резервування, особливо при використанні в них однакового апаратного та програмного забезпечення, а також за наявності в каналах резервування однакових найбільш слабких до таких ударних впливів елементів.

1. Оцінювання функційної безпечності СЗА при використанні для них ПЗУВ з ненавантажувальним дублюванням

Загальну ймовірність небезпечної відмови пристроїв захисту від ударних впливів (ПЗУВ) при використанні для них ненавантажувального дублювання можна визначити за аналогією з формулами для розрахування функційної безпечності в такий спосіб [9]:

$$Q_н(t) = 1 - e^{-\lambda_н t}(1 + \lambda_н t), \qquad (1)$$

де $\lambda_н$ – інтенсивність відмов ПЗУВ, що призводять до кратних небезпечних відмов виконання функцій безпечності.

Оцінювання функційної безпечності за наступною формулою і далі у статті проводиться для моделей найбільш поширеного для розрахунків надійності і ФБ експоненціального закону розподілу відмов як для комплектувальних елементів, так і каналів резервування.

Доцільно розглянути два варіанти такого резервування:

1) $\lambda_н t$ набагато менше 0,01;

2) $\lambda_н t$ дорівнює 0,1, набагато більше 0,01.

Варіант 1

Значення $\lambda_н t$ менше 0,01.

Імовірність небезпечної відмови пристроїв захисту від ударних впливів ПЗУВ (коли $\lambda_н t$ менше 0,01) за рахунок розкладання в ряд Фур'є експоненціальної функції у формулі (1) буде дорівнювати

$$Q_н(t) = 1 - (1 - \lambda_н t)(1 + \lambda_н t). \qquad (2)$$

Таке спрощення є допустимим, тому що при ньому в більшості випадків похибка має дуже мале значення і

навіть не погіршує показники безпечності. Після нескладних перетворювань виразу (1) отримаємо

$$Q_н(t) = (\lambda_н t)^2. \quad (3)$$

Нормативним показником функційної безпечності, за стандартом [1], є ймовірність небезпечної відмови за кожну годину експлуатації в розрахунку на одну відповідальну функцію. Якщо позначити його як A_{sil} для різних рівнів жорсткості (SIL1-SIL4)), тоді з урахуванням формули (3) отримаємо

$$A_{sil} = \frac{Q_н(t)}{t} = \lambda_н^2 t. \quad (4)$$

Аналіз наведених формул показує, що функційна безпечність ПЗУВ суттєво підвищується за рахунок ненавантажувального резервування тільки тоді, коли значення $\lambda_н t$ менше 10^{-6}, але такі значення досягти на практиці дуже важко.

З цієї формули можна знайти максимально допустиму інтенсивність відмов ПЗУВ:

$$\lambda_н = \sqrt{\frac{\lambda_{ндоп}}{t}}. \quad (5)$$

Допустиму тривалість експлуатації ПЗУВ можна також визначити з формули (2):

$$t_{доп} = \frac{\lambda_{н.доп}}{\lambda_н^2}. \quad (6)$$

Аналіз формули (4) показує, що при реальних термінах експлуатації (10-20 років експлуатації) забезпечити експлуатаційну інтенсивність відмов ПЗУВ дуже складно, частіше реально неможливо.

Щоб забезпечити практично допустиму тривалість експлуатації ПЗУВ, треба, щоб квадрат інтенсивності небезпечних відмов ПЗУВ був набагато менше допустимої інтенсивності небезпечних відмов (SIL). Це також у більшості випадків реально неможливо.

Варіант 2

Значення $\lambda_н t$ більше 0,01.

$$Q_н(t) = 1 - e^{-\lambda_н t}(1 + \lambda_н t). \quad (7)$$

У цьому випадку ймовірність небезпечної відмови при дублюванні можна визначити за формулою [9]

Ефективність такого варіанта резервування при великих значеннях $\lambda_н t$ є дуже незначною (дані розрахунків наведено в таблиці).

2. Оцінювання показників функційної безпечності ПЗУВ при використанні для них навантажувального дублювання

У деяких випадках можна використовувати ПЗУВ з загальним навантажувальним резервуванням (ЗНР) з кратністю m=2 (при дублюванні), коли одночасна відмова основного та резервного ПЗУВ має дуже малу ймовірність (наприклад для пристроїв вентиляції).

Якщо значення $\lambda_н t$ будуть набагато менше значень 0,01, тоді відповідні формули для розрахування виграшу від навантажувального дублювання для більшості практичних випадків (з прийнятими припущеннями за малими значеннями $\lambda_н t$) будуть аналогічні формулам (3)-(6), тобто однаковими з ненавантажувальним резервуванням. Якщо значення $\lambda_н t$ будуть більше 0,01, тоді розрахункові значення, за навчальним посібником [1], будуть відрізнятися. Для різних значень $\lambda_н t$ і способів резервування розрахунки ймовірностей небезпечних відмов ПЗУВ наведено в таблиці

.

Таблиця

Значення ймовірності небезпечних відмов ПЗУВ залежно від способів резервування (ЗНР – загальне навантажувальне резервування, ЗННР – загальне ненавантажувальне резервування), інтенсивності небезпечних відмов і часу експлуатації ($\lambda_н t$)

	Імовірності небезпечних відмов ПЗУВ залежно від значення $\lambda_н t$ і способу резервування (без періодичного контролю та відновлення)									
$\lambda_н t$	**10^{-5}**	**10^{-3}**	**0,01**	**0,05**	**0,1**	**0,25**	**0,5**	**1,0**	**2,0**	**3,0**
Без резерву-вання	10^{-5}-	10^{-3}	0,01	0,049	0,095	0,221	0,39	0,63	0,86	0,95
ЗННР (m=2)	10^{-10}	10^{-6}	0,0001	0,0015	0,0045	0,026	0,0895	0,264	0,592	0,8
Виграш від ЗННР (m=2)	10^{5}	1000	100	32,7	17,14	8,5	4.36	2.42	1,45	1.19
ЗНР (m=2)	10^{-10}	10^{-6}	0,0001	0,002	0,009	0,049	0,152	0,4	0,74	0,9
Виграш від ЗНР (m=2)	10^{5}	1000	100	24,5	10,43	4,5	2,57	1,56	1,16	1,06
Виграш ЗННР порівняно з ЗНР	1	1	1	1,33	2,0	1,88	1,7	1,54	1,24	1,13

Аналіз таблиці показує, що використання ненавантажувального та навантажувального дублювання для ПЗУВ дає суттєвий виграш тільки при дуже малих значеннях $\lambda_н t$, але в більшості практичних випадків не може забезпечити жорсткі вимоги з функційної безпечності СЗА та інших відповідальних систем автоматизації.

3. Оцінювання показників функційної безпечності ПЗУВ при використанні для них ненавантажувального дублювання з періодичним контролем і своєчасним відновленням

Імовірність безпечної роботи ПЗУВ при використанні ненавантажувального дублювання з періодичним контролем і своєчасним відновленням можна визначити за аналогією з навчальним посібником [9]:

$$P_б(t) = e^{-\frac{\lambda_н}{N_{вб}+2}t}. \quad (8)$$

З цієї формули можна визначити імовірність безпечної роботи ПЗУВ:

$$Q_н(t) = 1 - e^{-\frac{\lambda_н}{N_{вб}+2}t}. \quad (9)$$

У більшості випадків ступінь набагато менше 0,1, тому що індекс відновлення $N_{вб}=\mu/\lambda_н$ переважно має значення більше 100, а інтенсивність небезпечних відмов також набагато менше 0,1. Тому при розкладанні в ряд Фур'є експоненти отримаємо

$$Q_н(t) = \frac{\lambda_н}{N_{вб}+2}\ t. \quad (10)$$

Нормативний показник функційної безпечності буде дорівнювати

$$Asil = Q_н(t)/t = \frac{\lambda_н}{N_{вб}+2}. \quad (11)$$

Після заміни $N_{вб}=\mu/\lambda_н$ та перетворювань отримаємо

$$Asil = Q_н(t)/t = \frac{\lambda^2_н T_в}{2\lambda_н T_в + 1}. \quad (12)$$

У більшості випадків значення $2\lambda_н T_в$ набагато менше 0,01, тому вираз (12) значно спрощується і дорівнює

$$Asil = Q_{н}(t)/t = \lambda_{н}^{2} T_{в}. \quad (13)$$

За цією формулою можна розрахувати максимально допустиму інтенсивність відмов ПЗУВ і максимально допустиму тривалість відновлення залежно від допустимих рівнів функційної безпечності SIL:

$$\lambda_{н} = \sqrt{\frac{Asil}{T_{в}}}; \quad (14)$$

$$T_{в} = \frac{Asil}{\lambda_{н}^{2}}. \quad (15)$$

З урахуванням того, що ймовірність небезпечної відмови за кожну годину експлуатації дорівнює в більшості практичних випадків допустимій інтенсивності небезпечних відмов ПЗУВ, допустиму інтенсивність відмов і максимальну тривалість експлуатації ПЗУВ можна також визначити з формул (11)-(13):

$$T_{в} = \frac{\lambda_{н.доп}}{\lambda_{н}^{2}}. \quad (16)$$

$$\lambda_{н} = \sqrt{\frac{\lambda_{ндоп}}{T_{в}}}. \quad (17)$$

4. Оцінювання показників функційної безпечності ПЗУВ при використанні для них навантажувального дублювання з періодичним контролем і своєчасним відновленням

Для більшості практичних випадків (при $N_{вб} > 100$), за аналогією з роботою [9], імовірність безпечної роботи ПЗУВ буде дорівнювати

$$P_{н}(t) = e^{-\frac{2\lambda_{н}}{N_{вб}+3}t} \quad (18)$$

З цієї формули можна також визначити імовірність небезпечної відмови ПЗУВ:

$$Q_{н}(t) = 1 - e^{-\frac{2\lambda_{н}}{N_{вб}+3}t}. \quad (19)$$

У більшості випадків ступінь у формулі (19) набагато менше 0,01 (як і при ненавантажувальному резервуванні), тому аналогічно до формули (10) отримаємо

$$Q_{н}(t) = \frac{2\lambda_{н}}{N_{вб}+3}t. \quad (20)$$

Нормативний показник функційної безпечності буде дорівнювати

$$Asil = Q_{н}(t)/t = \frac{2\lambda_{н}}{N_{вб}+3}. \quad (21)$$

Після заміни $N_{вб} = \frac{\mu}{\lambda_{н}}$, з урахуванням $\mu = \frac{1}{T_{в}}$ (для експоненціального розподілу тривалості відновлення), отримаємо

$$Asil = Q_{н}(t)/t = \frac{2\lambda_{н}^{2} T_{в}}{3\lambda_{н} T_{в} + 1}. \quad (22)$$

У більшості випадків значення $3\lambda_{н}Tв$ набагато менше 0,01, тому вираз (22) значно спрощується і дорівнює

$$Asil = Q_{н}(t)/t = 2\lambda_{н}^{2} T_{в}. \quad (23)$$

За цією формулою можна розрахувати максимально допустиму інтенсивність відмов ПЗУВ і максимально допустиму тривалість відновлення залежно від допустимих рівнів функційної безпечності SIL:

$$\lambda_{н} = \sqrt{\frac{Asil}{2T_{в}}}; \quad (24)$$

$$T_{в} = \frac{Asil}{2\lambda_{н}^{2}}. \quad (25)$$

З урахуванням того, що ймовірність небезпечної відмови за кожну годину експлуатації дорівнює в більшості практичних випадків допустимій інтенсивності небезпечних відмов, допустиму інтенсивність відмов і максимальну тривалість експлуатації ПЗУВ для навантажувального резервування можна також визначити з формул (24), (25):

$$T_{в} = \frac{\lambda_{н.доп}}{2\lambda_{н}^{2}}; \quad (26)$$

$$\lambda_н = \sqrt{\frac{\lambda_{ндоп}}{2T_в}}. \quad (27)$$

Аналіз формул (23), (25) показує, що ненавантажувальне резервування в більшості розглянутих випадків дає виграш з нормативного показника функційної безпечності у два рази, для нього час періодичного контролю та відновлення можна скоротити вдвічі порівняно з навантажувальним резервуванням.

Висновки за результатами дослідження

1. Використання нерезервованих ПЗУВ може призводити до кратних небезпечних відмов електронних СЗА.

2. Використання ненавантажувального та навантажувального резервування з кратністю 2 (дублювання) для ПЗУВ дає виграш порівняно з нерезервованим варіантом, але в більшості випадків не може забезпечити жорсткі вимоги з функційної безпечності СЗА.

3. Використання ненавантажувального дублювання з періодичним контролем і своєчасним відновленням ПЗУВ дає суттєвий виграш, при цьому в більшості випадків такий варіант може забезпечити дуже жорсткі вимоги з функційної безпечності СЗА та інших відповідальних пристроїв автоматизації.

4. Для своєчасного відновлення треба мати гарантований контроль справності ПЗУВ і забезпечення допустимої тривалості його відновлення.

5. Для контролю справності ПЗУВ необхідно використовувати спеціальні надійні автоматичні пристрої контролю або періодичний контроль обслуговуючим персоналом згідно з графіком технологічного процесу.

6. При використанні ненавантажувального резервування дуже важливо забезпечити гарантовано (з необхідним рівнем достовірності) такі умови:

- визначення небезпечної відмови основного ПЗУВ одразу після її виникнення;
- перемикання ПЗУВ на резерв;
- перемикання НЗУВ на резерв за максимально допустиму тривалість відновлення з урахуванням запропонованих у статті формул.

7. Отримані результати можуть використовуватися не тільки для систем залізничної автоматики, але й оцінювання функційної безпечності електричних/електронних/програмованих електронних систем керування (Е/Е/ПЕС = E/E/PES, electrical/electronic/programmable electronic control system), у яких внаслідок відмов і збоїв обладнання можуть виникати недопустимі збитки щодо здоров'я та життя людей, пошкодження майна та негативного впливу на довкілля.

Список використаних джерел

1. 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.
2. ДСТУ EN 50126-1:2015 uk. Залізничний транспорт. Специфікація та демонстрація надійності, доступності, безпеки і ремонтопридатності (РАМН). Частина 1. Основні вимоги та загальний процес (EN 50126-1:1999, IDT). Чинний від 2016–01–01. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80636
3. ДСТУ EN 50129:2015 uk. Залізничний транспорт. Системи зв'язку сигналізації та оброблення даних. Електронні сигналізаційні системи безпеки (EN 50129:2003, IDT). Чинний від 2016–01–01. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80636
4. Методика доказу функціональної безпеки мікроелектронних комплексів систем керування та регулювання рухом поїздів: затв. та введ. в дію наказом «Укрзалізниці» № 452-Ц від 17.08.2001 р. Київ: Вид. ПП «Алькор», 2002. 106 с.
5. ЦШ 0026. Інструкція про порядок проведення експлуатаційних і приймальних випробувань дослідних зразків пристроїв сигналізації, централізації та блокування: затв. та введ. в дію наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України від 17.08.2001 р. № 453-Ц. Київ, 2003. 14 с.
6. Panchenko Sergii, Bojnik Anatolij, Kustov Viktor, Sotnyk Vasyl. Ensuring railroad's digital automation systems resistance to dangerous states/ICTE. *Transportation and Logistics.* 2019. IC Tol 2019, LNITI. P. 120-128. 2020.
7. Кустов В. Ф. Анализ стратегий нормирования функциональной безопасности в стандартах железнодорожной автоматики. *Проблемы безопасности на транспорте : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 25-26 ноября 2021 г.).* Ч. 1. Гомель : БелГУТ, 2021. С. 196-198.
8. Кустов В. Ф. Разработка требований функциональной безопасности для устройств железнодорожной автоматики. *Вестник БелГУТ «Наука и транспорт».* 2020. № 2 (41). С. 28-30.
9. Кустов В. Ф. Основи теорії надійності та функційної безпечності систем залізничної автоматики: навч. посіб. для ВНЗ. Харків: УкрДАЗТ, 2008. 218 с.
10. Кустов В. Ф. Математические модели функциональной безопасности микропроцессорных систем железнодорожной автоматики. *Зб. наук. праць.* Харків: УкрДАЗТ, 2010. Вип. 116. С. 65-71.

11. Кустов В. Ф. Математичні моделі функційної безпечності та безвідмовності відновлюваних технічних засобів у разі використання мажоритарного резервування «2» із «3». *Зб. наук. праць*. Донецьк: ДонІЗТ, 2010. Вип. № 23. С. 5-14.
12. Кустов В. Ф. Особенности обеспечения функциональной безопасности микропроцессорных систем управления и контроля на железнодорожном транспорте. *Залізничний транспорт України*. 2015. № 1. С. 22-30.

Panchenko S. V., Bunchukov O. A., Kustov V. F., Sotnyk V. O. Improving the quality of assessment of the functional safety of railway automation systems in the presence of multiple dangerous failures in reservation channels

Abstract. The article deals with the issues of improving the quality of the assessment of the functional safety of railway automation systems, in which, due to equipment failures and malfunctions, dangerous conditions and related train accidents and disasters, unacceptable damages to human health and life, damage to property and negative impact on the environment. Practical and theoretical substantiation of the possibility of the appearance of simultaneous multiple dangerous failures in the redundancy channels is given. Mathematical models have been developed for calculating functional safety indicators, taking into account the simultaneous influence of destabilizing factors on all backup channels of responsible devices and systems. Formulated conclusions regarding the development and operation of shock protection devices for all backup channels and multiple dangerous failures. Research results can be useful for electric/electronic/programmable electronic control systems with increased requirements for functional safety, including at nuclear power plants, aviation, space engineering, chemical industry, medicine, and military systems.

The results of the study can be useful for the research and development of high-risk applications.

Keywords: accidents, electrical/electronic/programmable electronic control systems, disasters, reliability, dangerous failures, dangerous states, railway automation systems, functional safety.

Надійшла 15.05.2023 р.

***Панченко Сергій Володимирович**, доктор технічних наук, професор, ректор Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: info@kart.edu.ua*
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7626-9933
***Бунчуков** Олег Анатолійович, департамент автоматики та телекомунікацій Укрзалізниці, м. Київ, Україна. E-mail: obunchukov@gmail.com*
***Кустов Віктор Федорович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри АТ, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: kustov.viktor55/@gmail.com.*
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9773-5470
***Сотник Василь Олександрович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри АТ, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: sotnyk.va@gmail.com*
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8039-1392

***Panchenko S. V.**, doctor of technical sciences, professor, rector of the Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: info@kart.edu.ua*
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7626-9933
***Bunchukov O. A.**, Department of Automation and Telecommunications of Ukrzaliznytsia, Kyiv, Ukraine. E-mail: obunchukov@gmail.com*
***Kustov V. F.**, Ph.D., Associate Professor, Department of JSC, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kustov.viktor55/@gmail.com.*
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9773-5470
***Sotnyk V. O.**, Ph.D. Associate Professor, Department of JSC, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: sotnyk.va@gmail.com*
ID ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8039-1392