

УДК 656.212.5:656.25

ЛОГІКО-ІМОВІРНІСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ ПОРУШЕНЬ БЕЗПЕКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОРТУВАЛЬНОЇ ГІРКИ

С. Є. Бантюков

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: b-s-e@inbox.ru

С. О. Бантюкова

Старший викладач*

E-mail: b-sv-a@mail.ru

*Кафедра обчислювальної техніки

та систем управління

Українська державна академія

залізничного транспорту

пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050

Розглядається розробка логіко-імовірнісної моделі ризику виникнення порушення безпеки функціонування сортувальної гірки для оцінки та визначення рівня безпеки сортувальної гірки. Отримані моделі дають можливість визначати імовірності виникнення порушень безпеки функціонування на окремих ділянках маршруту розформування-формування составу та на всьому маршруті. На відміну від існуючих моделей враховується логічний зв'язок небезпечних подій на різних частинах маршруту розформування-формування составу

Ключові слова: безпека функціонування, ризик, логіко-імовірнісна модель, сортувальна гірка

Рассматривается разработка логико-вероятностной модели риска возникновения нарушения безопасности функционирования сортировочной горки для оценки и определения уровня безопасности сортировочной горки. Полученные модели дают возможность определять вероятности возникновения нарушения безопасности функционирования на отдельных участках маршрута расформирования-формирования состава и на всем маршруте. В отличие от существующих моделей учитывается логическая связь опасных событий на разных частях маршрута расформирования-формирования состава

Ключевые слова: безопасность функционирования, риск, логико-вероятностная модель, сортировочная горка

1. Вступ

Сортувальна гірка є одним з важливих об'єктів транспортного процесу, яка забезпечує процес розформування-формування залізничних потягів, що відноситься до відповідальних технологічних процесів. У зв'язку із специфікою та інтенсивністю роботи сортувальної гірки, на ній відбувається істотно більше порушень безпеки функціонування, чим на інших об'єктах транспортного процесу різного ступеня важкості.

Експлуатація та розвиток сортувальної гірки породжує ряд питань, найбільш серйозним з яких є питання оцінки потенційних ризиків, що властиві даній системі. В умовах об'єктивного існування ризиків в такій системі та пов'язаних з ними втрат виникає потреба у визначеному механізмі прийняття управлінських рішень, що забезпечують ефективність і надійність її функціонування з урахуванням ризиків [1].

Отже, одним із критеріїв якісного управління сортувальною гіркою може стати виявлення та оцінка ризиків, що дозволить ранжирувати ризики за ступеню їх імовірності та величиною збитків для цілеспрямованого та раціонального розподілення ресурсів з метою підвищення безпеки функціонування керованої системи, тобто виробляти оптимальні управляючі впливи.

Застосування поняття ризик дозволяє переводити небезпеку в розряд вимірюваних категорій. Виходячи

з принципу – управляти можна тим, що можна оцінити, питання розробки методів і моделей оцінки ризику виникнення порушень безпеки функціонування сортувальної гірки уявляються актуальними.

2. Аналіз досліджень і публікацій

В даний час існує багато методів та критеріїв оцінки рівня безпеки руху на залізничному транспорті та на сортувальній гірці зокрема. Донедавна безпека на залізницях оцінювалася, головним чином, за допомогою якісних показників [2, 3].

Однак за останні роки істотно змінився підхід до проблеми оцінки безпеки. Намітився перехід до кількісної оцінки рівня безпеки на основі імовірних і статистичних показників як цілісної проблеми управління безпекою.

У [4] для визначення рівня безпеки руху на залізничному транспорті використовується поняття надійності (безвідмовності). У даному випадку під відмовами розуміється вихід з ладу обладнання, що викликає порушення безпеки руху. Виходячи з цього, рівень безпеки руху на транспорті виражається формулою:

$$P = 1 - \frac{n(t)}{M(t)},$$

де $p(t)$ - кількість відмовлень у часі;

$M(t)$ - кількість досліджуваних об'єктів.

У [5] розроблено метод оцінки якості інтервального регулювання швидкості скочування відцепів, що ґрунтується на оцінці ризиків їх нерозділення на стрілках і дозволяє визначати раціональні режими гальмування відцепів в умовах дії випадкових факторів.

У [6] для контролю і оцінки рівня безпеки руху вводиться поняття міри ризику виникнення аварійної ситуації. У зв'язку з цим запропонована шкала станів безпеки, що враховує як знижений, так і підвищений рівні надійності.

У [7] оцінка рівня безпеки проводиться виключно на основі оцінки безпеки та надійності технічних засобів комплексної механізації на сортувальних гірках.

Однак, наведені методи оцінки рівня безпеки руху на залізничному транспорті мають ряд недоліків: відсутність диференціювання за факторами, причинами, що впливають на безпеку руху; неможливість розкласти загальну інтегровану імовірність на складові частини – імовірності причин виникнення порушень; відсутність кількісної оцінки ризику виникнення порушень безпеки функціонування сортувальної гірки; методи оцінки рівня безпеки носять частковий характер, тобто виконується облік обмеженого числа факторів, що впливають на безпеку руху – враховуються кількість відмовлень у часі, кількість досліджуваних об'єктів, число пропущених без відмовлення потягів, загальне число потягів, число затриманих потягів протягом визначеного часу, тобто, в основному, враховується технічний фактор, але не враховуються такі важливі фактори як людський фактор, вплив зовнішнього середовища, зовнішні заздалегідь непередбачені випадкові впливи, що значно впливають на рівень безпеки руху, через що немає можливості виділити найбільше слабкі ланки в системі забезпечення безпеки руху, раціонально розподіляти ресурси для підвищення безпеки перевезень.

3. Формування цілей та задач

У зв'язку з вищезазначеним, доцільним уявляється виконання оцінки рівня безпеки на сортувальній гірці на основі використання логіко-імовірнісного метода (ЛІМ) дослідження безпеки функціонування складних технічних систем. Математична сутність ЛІМ полягає у використанні функцій алгебри логіки для аналітичного запису умов виникнення небезпечної ситуації та переходу від функцій алгебри логіки до імовірнісних функцій, що об'єктивно відображають ступінь небезпеки [8, 9].

Метою цієї роботи є визначення імовірності ризику виникнення порушень безпеки функціонування (ПБФ) сортувальної гірки на маршруті розформування-формування складу для оцінки рівня безпеки сортувальної гірки.

Для досягнення поставленої мети необхідно розробити сценарії виникнення небезпечних ситуацій на сортувальній гірці, на їх основі розробити логічну модель виникнення ПБФ на маршруті розформування-формування складу та, використовуючи форми переходу до заміщення, визначити відповідні імовірнісні функції виникнення ПБФ сортувальної гірки.

4. Логіко-імовірнісне моделювання ризику виникнення порушень безпеки функціонування

На основі теорії логіко-імовірнісних методів розглянемо питання визначення імовірності – ризику виникнення ПБФ у процесі розформування-формування складу. Можливість виникнення ПБФ на сортувальній гірці існує протягом інтервалу часу активних дій по реалізації технологічного процесу розформування-формування складу та з'являється з моменту початку насування складу на гірку – у момент відправлення складу з колії парку приймання, а зникає або з моменту зупинки останнього відцепу на сортувальній колії, або після закінчення маневрових робіт на сортувальних коліях підгіркового парку (залежно від установки в завданні на розформування складу), тобто протягом інтервалу часу розформування складу.

4. 1. Розробка сценаріїв ризику виникнення ПБФ на ділянках сортувальної гірки

При виконанні технологічного процесу розформування-формування складу і накопичування вагонів на сортувальних коліях виникає багато небезпечних ситуацій, частина з яких приводить до порушення безпеки функціонування на гірці.

Відомі роботи [10, 11], у яких описані й досліджені випадки виникнення ПБФ та їх причини на сортувальних гірках.

Із зазначених джерел відомо, що основними ПБФ на сортувальних гірках є схід і пошкодження рухомого складу на маршруті розформування-формування складу.

Основними причинами, що призводять до виникнення ПБФ, є відмови елементів ділянок колії, що входять у маршрут розформування-формування складу, елементів обладнання, розташованого на цих ділянках – стрілок, гальмових позицій, помилки персоналу та обладнання, які створюють небезпечну ситуацію на конкретній ділянці колії.

Для проведення розрахунків та побудови логіко-імовірнісної моделі будемо розглядати приклад фрагменту сортувальної станції, що наведено на рис. 1.

Всі ділянки колії станції залежно від розташованого на них обладнання або від виконуваних на них робіт можна підрозділити на 4 наступні види:

- 1 – ділянки без обладнання і певних видів робіт – прості ділянки;
- 2 – ділянки колії зі стрілкою;
- 3 – ділянки колії з гальмовими позиціями;
- 4 – сортувальні колії, на яких виконуються певні види робіт, наприклад, маневрові з формування складу.

Позначимо ділянки колії станції номерами від 1, ..., n, ..., N, де n – номер ділянки колії станції, N – максимальний номер ділянки.

Ділянки колії станції відносяться:

- до 1-го виду – 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50, 52, 54, 56, 58, 60, 62;
- до 2-го виду – 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 23, 27, 31, 39, 47, 51, 59;
- до 3-го виду – 25, 29, 33, 35, 37, 41, 43, 45, 49, 53, 55, 57, 61, 63;
- до 4-го виду – 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71.

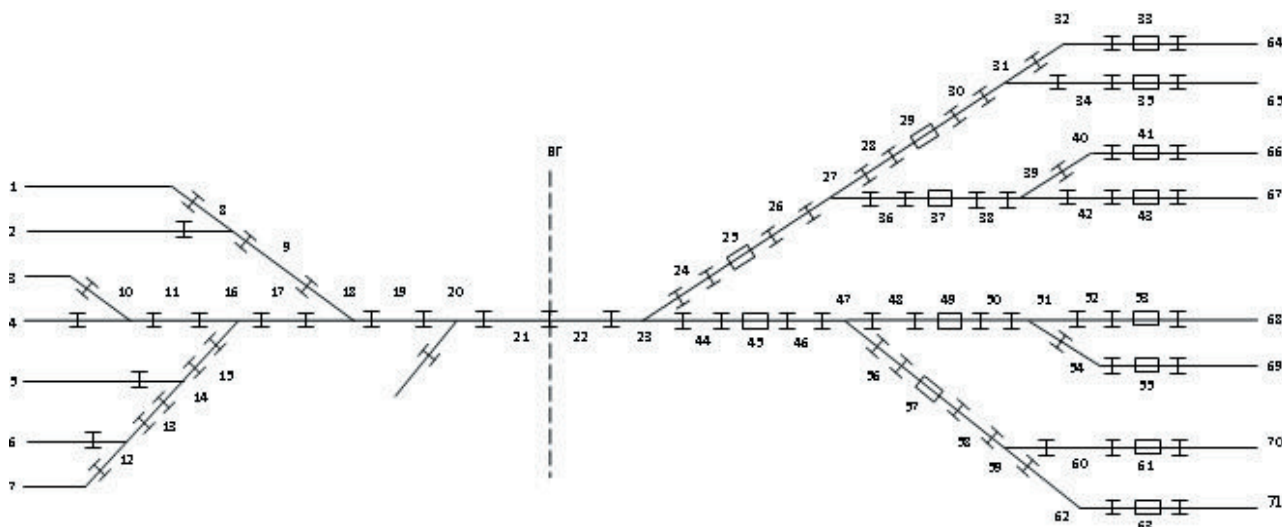


Рис. 1. Приклад фрагменту сортувальної станції

Для визначення можливості (ризiku) виникнення ПБФ на маршруті розформування–формування состава розглянемо основні відмови і помилки на ділянках колії кожного виду, складемо сценарії виникнення небезпечної ситуації на них у вигляді словесного опису, на основі яких сформуємо логічні моделі виникнення небезпечної ситуації на окремих об'єктах гірки та логічну модель виникнення ПБФ при виконанні маршруту.

По логічній моделі маршруту визначимо імовірність – ризик виникнення ПБФ на маршруті розформування–формування состава.

Для опису можливості виникнення ПБФ логічну модель виникнення ПБФ на ділянці позначимо X , логічну модель виникнення ПБФ на будь-якій n -ій ділянці колії станції позначимо X^n , логічну модель виникнення ПБФ на ділянці колії конкретного виду позначимо X_i , де i – порядковий номер виду ділянки колії, для якої складається модель. Відмови елементів ділянок колії та встановленого на них обладнання, помилки персоналу та обладнання, тобто події, що описують причини виникнення небезпечної ситуації, мають кожний тільки два стани «є подія» (відмова елемента або помилка) або «немає події» i , отже, є двійковими змінними, що утворюють множину причин виникнення ПБФ, які позначимо x_j , де j – порядковий номер логічної змінної.

Попередньо складемо логічні моделі можливості виникнення ПБФ на ділянках колії для кожного з видів.

Схід і пошкодження рухомого состава на ділянці колії без обладнання і певних видів робіт може відбутися внаслідок:

- відмови елементів рейкової колії. Логічну змінну, що відповідає даній події, позначимо через x_1 ;
- появи на колії сторонніх предметів. Логічну змінну, що відповідає даній події, позначимо x_2 ;
- відмови рухомого состава. Логічну змінну, що відповідає даній події, позначимо через x_3 .

Крім того, на можливість виникнення сходу та пошкодження рухомого состава впливає невиявлення зазначених вище подій оперативним персоналом і пристроями гіркової автоматики. Логічну змінну,

що відповідає невиявленню зазначених вище подій, позначимо через x_4 . При цьому вона може приймати значення «1» при невиявленні та «0» при виявленні зазначених вище подій.

Логічну модель виникнення ПБФ на ділянці колії першого виду можна представити наступною структурою:

$$X_1 = (x_1 \vee x_2 \vee x_3) \wedge x_4.$$

На ділянці колії другого виду схід і пошкодження рухомого состава може відбутися не тільки внаслідок зазначених вище причин, але й внаслідок відмови елементів стрілочного перевалу. Логічну змінну, що відповідає даній події, позначимо x_5 . При цьому також діє логічна змінна x_4 .

Логічну модель виникнення ПБФ через відмову стрілки можна представити наступною структурою:

$$X_C = x_5 \wedge x_4,$$

тоді загальну логічну модель виникнення ПБФ на ділянці колії другого виду можна представити наступною структурою:

$$X_2 = X_1 \vee X_C = (x_1 \vee x_2 \vee x_3) \wedge x_4 \vee x_5 \wedge x_4 = \\ = (x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_5) \wedge x_4.$$

Схід і пошкодження рухомого состава на ділянці колії третього виду може відбутися не тільки внаслідок зазначених вище причин, описаних логічною моделлю X_1 , але й внаслідок:

- неможливості приведення уповільнювача в робочий або розгальмований стан. Логічну змінну, що відповідає даній події, позначимо x_6 ;
- зменшення гальмової потужності сповільнювача. Логічну змінну, що відповідає даній події, позначимо x_7 ;
- невиявлення зниження тиску повітря, відмови керуючої апаратури або механічної частини сповільнювача обслуговуючим персоналом. Логічну змінну, що відповідає даній події, позначимо x_8 , при цьому

вона приймає значення «1» при виявленні та «0» при виявленні зазначених вище подій;

– порушення габаритів сповільнювача або габаритів вагонів відцепу. Логічну змінну, що відповідає даній події, позначимо x_9 ;

– виявлення порушення габаритів сповільнювача або габаритів вагонів відцепу обслуговуючим персоналом. Логічну змінну, що відповідає даній події, позначимо x_{10} ;

– вижимання вагона зі сповільнювача при гальмуванні. Логічну змінну, що відповідає даній події, позначимо x_{11} ;

– виходу відцепу зі сповільнювача зі швидкістю, що відрізняється від заданої за умовами інтервального або прицільного регулювання. Логічну змінну, що відповідає даній події, позначимо x_{12} ;

– перевищення допустимої швидкості входу на уповільнювач. Логічну змінну, що відповідає даній події, позначимо x_{13} .

Логічну модель виникнення ПБФ через відмови на гальмовій позиції та помилок персоналу можна представити наступною структурою:

$$X_{\Gamma} = (x_6 \vee x_7) \wedge x_8 \vee x_9 \wedge x_{10} \vee x_{11} \vee x_{12} \vee x_{13},$$

а загальну логічну модель виникнення ПБФ на ділянці колії третього виду можна представити наступною структурою:

$$X_3 = X_1 \vee X_{\Gamma} = (x_1 \vee x_2 \vee x_3) \wedge x_4 \vee (x_6 \vee x_7) \wedge x_8 \vee x_9 \wedge x_{10} \vee x_{11} \vee x_{12} \vee x_{13}.$$

Схід і пошкодження рухомого состава на ділянці колії четвертого виду може відбутися не тільки внаслідок зазначених вище причин, описаних логічною моделлю X_1 , але й внаслідок:

– незакріплення состава на колії. Логічну змінну, що відповідає даній події, позначимо x_{14} ;

– виявлення незакріплення состава на колії. Логічну змінну, що відповідає даній події, позначимо x_{15} ;

– наїзду маневрового состава на вагони, що стоять на сортувальній колії, з підвищеною швидкістю. Логічну змінну, що відповідає даній події, позначимо x_{16} .

Логічну модель виникнення ПБФ на колії сортувального парку через помилки укладача або помилок при маневровій роботі можна представити наступною структурою:

$$X_{\text{СП}} = (x_{14} \wedge x_{15}) \vee x_{16},$$

а загальну логічну модель виникнення ПБФ на ділянці колії четвертого виду можна представити наступною структурою:

$$X_4 = X_1 \vee X_{\text{СП}} = (x_1 \vee x_2 \vee x_3) \wedge x_4 \vee (x_{14} \wedge x_{15}) \vee x_{16}.$$

Тоді кожній n -ій ділянці колії станції можна поставити у відповідність логічну модель виникнення ПБФ, що відповідає виду, до якого відноситься ділянка, так наприклад:

– логічна модель ділянки 1, що відноситься до першого виду:

$$X^1 = (x_1^1 \vee x_2^1 \vee x_3^1) \wedge x_4^1;$$

– логічна модель ділянки 8, що відноситься до другого виду:

$$X^8 = (x_1^8 \vee x_2^8 \vee x_3^8 \vee x_5^8) \wedge x_4^8;$$

– логічна модель ділянки 25, що відноситься до третього виду:

$$X^{25} = (x_1^{25} \vee x_2^{25} \vee x_3^{25}) \wedge x_4^{25} \vee (x_6^{25} \vee x_7^{25}) \wedge x_8^{25} \vee x_9^{25} \wedge x_{10}^{25} \vee x_{11}^{25} \vee x_{12}^{25} \vee x_{13}^{25};$$

– логічна модель сортувальної колії 64, що відноситься до четвертого виду:

$$X^{64} = (x_1^{64} \vee x_2^{64} \vee x_3^{64}) \wedge x_4^{64} \vee (x_{14}^{64} \wedge x_{15}^{64}) \vee x_{16}^{64}.$$

Аналогічно формуються логічні моделі інших ділянок колії станції.

Маршрут розформування–формування состава складається з ряду ділянок колії станції, тому логічна модель виникнення ПБФ на маршруті будується виходячи з положення, що виникнення ПБФ на одній ділянці колії, що входить у маршрут, веде до виникнення ПБФ на всьому маршруті, тоді логічна модель виникнення ПБФ на маршруті є логічною сумою логічних моделей виникнення ПБФ на кожній з ділянок колії, що входять у маршрут.

Кожний маршрут розформування–формування состава можна розділити на підмаршрути – насування состава, розпуску состава і маневрових робіт, що виконуються на заданих сортувальних коліях, які характеризуються певними ознаками. Так, підмаршрут насування состава характеризується тим, що на ньому весь состав проходить кожну його ділянку, тобто він починається на колії парку приймання і закінчується головною стрілкою стрілочної горловини. Підмаршрут розпуску характеризується тим, що кожний відцеп проходить тільки ті ділянки колії, які ведуть на задану йому сортувальну колію. Кожний підмаршрут розпуску починається на ділянці колії наступної за головною стрілкою стрілочної горловини і закінчується ділянкою колії з останньою гальмовою позицією. Підмаршрут маневрових робіт, що виконується на заданих сортувальних коліях, характеризується тим, що маневрові роботи виконуються тільки на заданих сортувальних коліях, тобто в нього входять тільки ті сортувальні колії, на які спрямовані вагони состава.

Для побудови логічної моделі виникнення ПБФ на маршруті розформування–формування состава складемо множини $n(k)$ – ділянок колій станції, що входять у можливі маршрути, де k – номер (позначення) маршруту, і підмножини підмаршрутів насування $n(Ha)$, де a – номер колії парку приймання, з якого відправляється состав; підмаршрутів розпуску $n(Pb)$, де b – номер сортувальної колії, на яку прямує відцеп; підмаршрутів маневрових робіт, що виконуються на заданих сортувальних коліях $n(MPc)$, де c – номер сортувальних колій, на яких вони виконуються, при цьому:

$$n(k) = n(Ha) \cup n(Pb) \cup n(MPc).$$

В підмножину підмаршруту насуву состава, наприклад, з 4-ої колії парку приймання входять наступні ділянки:

$$n(H4) = 4, 10, 11, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23.$$

Логічну модель виникнення ПБФ на маршруті насувування состава X_H^4 можна представити наступною структурою:

$$X^4 = X_1^4 \vee X_2^{10} \vee X_1^{11} \vee X_2^{16} \vee X_1^{17} \vee X_2^{18} \vee \\ \vee X_1^{19} \vee X_2^{20} \vee X_1^{21} \vee X_2^{22} \vee X_1^{23} = \bigcup_{n(H4)} X^n.$$

В підмножину підмаршрутів розпуску, наприклад, на 66-у, 67-у, 68-у і 71-у колії сортувального парку входять наступні ділянки:

$$n(P66) = 24, 25, 26, 27, 36, 37, 38, 39, 40, 41,$$

$$n(P67) = 24, 25, 26, 27, 36, 37, 38, 39, 42, 43,$$

$$n(P68) = 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53,$$

$$n(P71) = 44, 45, 46, 47, 56, 57, 58, 59, 62, 63.$$

Логічні моделі виникнення ПБФ на маршрутах розпуску состава на 66-у, 67-у, 68-у і 71-у колії сортувального парку можна представити наступними структурами:

$$X_P^{66} = X_1^{24} \vee X_3^{25} \vee X_1^{26} \vee X_2^{27} \vee X_1^{36} \vee X_3^{37} \vee X_1^{38} \vee X_2^{39} \vee X_1^{40} \vee X_3^{41} = \bigcup_{n(P66)} X^n;$$

$$X_P^{67} = X_1^{24} \vee X_3^{25} \vee X_1^{26} \vee X_2^{27} \vee X_1^{36} \vee X_3^{37} \vee X_1^{38} \vee X_2^{39} \vee X_1^{42} \vee X_3^{43} = \bigcup_{n(P67)} X^n;$$

$$X_P^{68} = X_1^{44} \vee X_3^{45} \vee X_1^{46} \vee X_2^{47} \vee X_1^{48} \vee X_3^{49} \vee X_1^{50} \vee X_2^{51} \vee X_1^{52} \vee X_3^{53} = \bigcup_{n(P68)} X^n;$$

$$X_P^{71} = X_1^{44} \vee X_3^{45} \vee X_1^{46} \vee X_2^{47} \vee X_1^{56} \vee X_3^{57} \vee X_1^{58} \vee X_2^{59} \vee X_1^{62} \vee X_3^{63} = \bigcup_{n(P71)} X^n.$$

Для всіх маршрутів розпуску даного маршруту розформування-формування:

$$n(\Sigma P) = n(P66) \cup n(P67) \cup n(P68) \cup n(P71).$$

Логічну модель виникнення ПБФ на всіх маршрутах розпуску состава даного маршруту розформування-формування X_P^Σ можна представити наступною структурою:

$$X_P^\Sigma = X_P^{66} \vee X_P^{67} \vee X_P^{68} \vee X_P^{71} = X_1^{24} \vee X_3^{25} \vee X_1^{26} \vee X_2^{27} \vee \\ \vee X_1^{36} \vee X_3^{37} \vee X_1^{38} \vee X_2^{39} \vee X_1^{40} \vee X_3^{41} \vee X_1^{42} \vee X_3^{43} \vee X_1^{44} \vee \\ \vee X_3^{45} \vee X_1^{46} \vee X_2^{47} \vee X_1^{48} \vee X_3^{49} \vee X_1^{50} \vee X_2^{51} \vee X_1^{52} \vee \\ \vee X_3^{53} \vee X_1^{56} \vee X_3^{57} \vee X_1^{58} \vee X_2^{59} \vee X_1^{62} \vee X_3^{63} = \bigcup_{n(\Sigma P)} X^n.$$

В підмножину підмаршруту маневрових робіт, що виконуються на заданих сортувальних коліях входять наступні ділянки:

$$n(MPc) = 66, 67, 68, 71.$$

Логічну модель виникнення ПБФ при маневрових роботах ХМР, що виконуються на заданих сортувальних коліях – 66-у, 67-у, 68-у і 71-у можна представити наступною структурою:

$$X_{MP} = X_4^{66} \vee X_4^{67} \vee X_4^{68} \vee X_4^{71} = \bigcup_{n(\Sigma MP)} X^n.$$

В маршрут розформування-формування состава з 4-ої колії парку приймання на 66-у, 67-у, 68-у і 71-у сортувальні колії входять наступні ділянки:

$$n(4 - 66, 67, 68, 71) = 4, 10, 11, 16, 17, 18, 19, 20, 21, \\ 22, 23, 24, 25, 26, 27, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, \\ 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 56, 57, 58, 59, 62, 63.$$

Логічну модель виникнення ПБФ на маршруті розформування-формування состава X_M можна представити наступною структурою:

$$X_M = X_H^4 \vee X_P^\Sigma \vee X_{MP} = \bigcup_{n(H4)} X^n \vee \bigcup_{n(\Sigma P)} X^n \vee \bigcup_{n(\Sigma MP)} X^n = \bigcup_{n(4-66,67,68,71)} X^n.$$

Основою для визначення ризику виникнення ПБФ є отримані раніше логічні моделі виникнення ПБФ на маршруті розформування-формування состава, його підмаршрутах і на ділянках колії, які є неповторними функціями алгебри логіки. Визначення ризику виникнення ПБФ виконується шляхом подання логічних моделей у вигляді, які є формами переходу до заміщення (ФПЗ), і переходу від отриманих ФПЗ до відповідних імовірнісних функцій за правилами [8, 9]. При цьому ФПЗ є логічними моделями, що подані в базисі кон'юнкція-інверсія.

4. 2. Подання у ФПЗ логічних моделей видів ділянок колії

Ділянка колії першого виду:

$$X_1 = (x_1 \vee x_2 \vee x_3) \wedge x_4 = \\ = \overline{\overline{(x_1 \vee x_2 \vee x_3)}} \wedge x_4 = \overline{\overline{x_1}} \wedge \overline{\overline{x_2}} \wedge \overline{\overline{x_3}} \wedge x_4.$$

Ділянка колії другого виду:

$$X_2 = (x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_5) \wedge x_4 = \\ = \overline{\overline{(x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_5)}} \wedge x_4 = \overline{\overline{x_1}} \wedge \overline{\overline{x_2}} \wedge \overline{\overline{x_3}} \wedge \overline{\overline{x_5}} \wedge x_4.$$

Ділянка колії третього виду:

$$X_3 = (x_1 \vee x_2 \vee x_3) \wedge x_4 \vee (x_6 \vee x_7) \wedge x_8 \vee x_9 \wedge x_{10} \vee x_{11} \vee x_{12} \vee x_{13} = \\ = \overline{\overline{(x_1 \vee x_2 \vee x_3)}} \wedge x_4 \vee \overline{\overline{(x_6 \vee x_7)}} \wedge x_8 \vee x_9 \wedge x_{10} \vee x_{11} \vee x_{12} \vee x_{13} = \\ = \overline{\overline{(x_1 \vee x_2 \vee x_3)}} \wedge x_4 \wedge \overline{\overline{(x_6 \vee x_7)}} \wedge x_8 \wedge x_9 \wedge x_{10} \wedge x_{11} \wedge x_{12} \wedge x_{13} = \\ = \overline{\overline{(x_1 \vee x_2 \vee x_3)}} \wedge x_4 \wedge \overline{\overline{(x_6 \vee x_7)}} \wedge x_8 \wedge x_9 \wedge x_{10} \wedge x_{11} \wedge x_{12} \wedge x_{13} = \\ = \overline{\overline{(x_1 \vee x_2 \vee x_3)}} \wedge x_4 \wedge \overline{\overline{(x_6 \vee x_7)}} \wedge x_8 \wedge x_9 \wedge x_{10} \wedge x_{11} \wedge x_{12} \wedge x_{13} \cdot$$

Сортувальні колії ділянки четвертого виду:

$$\begin{aligned} X_4 &= (x_1 \vee x_2 \vee x_3) \wedge x_4 \vee (x_{14} \wedge x_{15}) \vee x_{16} = \\ &= \overline{\overline{(x_1 \vee x_2 \vee x_3)} \wedge x_4 \vee (x_{14} \wedge x_{15}) \vee x_{16}} = \\ &= \overline{\overline{(x_1 \vee x_2 \vee x_3)} \wedge x_4} \wedge \overline{x_{14} \wedge x_{15}} \wedge \overline{x_{16}} = \\ &= \overline{\overline{\overline{x_1} \wedge \overline{\overline{x_2} \wedge \overline{\overline{x_3}}}} \wedge x_4} \wedge \overline{x_{14} \wedge x_{15}} \wedge \overline{x_{16}} = \\ &= \overline{\overline{\overline{\overline{x_1} \wedge \overline{\overline{x_2} \wedge \overline{\overline{x_3}}}} \wedge x_4} \wedge x_{14} \wedge x_{15}} \wedge \overline{x_{16}} . \end{aligned}$$

Тоді ФПЗ логічних моделей ділянок колії станції можна представити таким чином для:

– ділянок колії станції першого виду:

$$\begin{aligned} X^1 &= \overline{\overline{\overline{\overline{x_1^1} \wedge \overline{\overline{x_2^1} \wedge \overline{\overline{x_3^1}}}} \wedge x_4^1}} , \\ X^2 &= \overline{\overline{\overline{\overline{x_1^2} \wedge \overline{\overline{x_2^2} \wedge \overline{\overline{x_3^2}}}} \wedge x_4^2}} , \\ &\dots \\ X^{17} &= \overline{\overline{\overline{\overline{x_1^{17}} \wedge \overline{\overline{x_2^{17}} \wedge \overline{\overline{x_3^{17}}}} \wedge x_4^{17}}}} , \\ &\dots \\ X^{62} &= \overline{\overline{\overline{\overline{x_1^{62}} \wedge \overline{\overline{x_2^{62}} \wedge \overline{\overline{x_3^{62}}}} \wedge x_4^{62}}}} ; \end{aligned}$$

– ділянок колії станції другого виду:

$$\begin{aligned} X^8 &= \overline{\overline{\overline{\overline{x_1^8} \wedge \overline{\overline{x_2^8} \wedge \overline{\overline{x_3^8}}}} \wedge x_5^8} \wedge x_4^8} , \\ X^{10} &= \overline{\overline{\overline{\overline{x_1^{10}} \wedge \overline{\overline{x_2^{10}} \wedge \overline{\overline{x_3^{10}}}} \wedge x_5^{10}} \wedge x_4^{10}}}} , \\ &\dots \\ X^{23} &= \overline{\overline{\overline{\overline{x_1^{23}} \wedge \overline{\overline{x_2^{23}} \wedge \overline{\overline{x_3^{23}}}} \wedge x_5^{23}} \wedge x_4^{23}}}} , \\ &\dots \\ X^{59} &= \overline{\overline{\overline{\overline{x_1^{59}} \wedge \overline{\overline{x_2^{59}} \wedge \overline{\overline{x_3^{59}}}} \wedge x_5^{59}} \wedge x_4^{59}}}} ; \end{aligned}$$

– ділянок колії станції третього виду:

$$\begin{aligned} X^{25} &= \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{x_1^{25}} \wedge \overline{\overline{x_2^{25}} \wedge \overline{\overline{x_3^{25}}}} \wedge x_4^{25}} \wedge x_6^{25} \wedge x_7^{25} \wedge x_8^{25} \wedge x_9^{25} \wedge x_{10}^{25} \wedge x_{11}^{25} \wedge x_{12}^{25} \wedge x_{13}^{25}}}}}}}}}} , \\ X^{29} &= \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{x_1^{29}} \wedge \overline{\overline{x_2^{29}} \wedge \overline{\overline{x_3^{29}}}} \wedge x_4^{29} \wedge x_6^{29} \wedge x_7^{29} \wedge x_8^{29} \wedge x_9^{29} \wedge x_{10}^{29} \wedge x_{11}^{29} \wedge x_{12}^{29} \wedge x_{13}^{29}}}}}}}}}} , \\ &\dots \\ X^{63} &= \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{x_1^{63}} \wedge \overline{\overline{x_2^{63}} \wedge \overline{\overline{x_3^{63}}}} \wedge x_4^{63} \wedge x_6^{63} \wedge x_7^{63} \wedge x_8^{63} \wedge x_9^{63} \wedge x_{10}^{63} \wedge x_{11}^{63} \wedge x_{12}^{63} \wedge x_{13}^{63}}}}}}}}}} , \end{aligned}$$

– ділянок колії станції четвертого виду:

$$\begin{aligned} X^{64} &= \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{x_1^{64}} \wedge \overline{\overline{x_2^{64}} \wedge \overline{\overline{x_3^{64}}}} \wedge x_4^{64} \wedge x_{14}^{64} \wedge x_{15}^{64} \wedge x_{16}^{64}}}}}}}}}} , \\ X^{65} &= \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{x_1^{65}} \wedge \overline{\overline{x_2^{65}} \wedge \overline{\overline{x_3^{65}}}} \wedge x_4^{65} \wedge x_{14}^{65} \wedge x_{15}^{65} \wedge x_{16}^{65}}}}}}}}}} , \\ &\dots \\ X^{71} &= \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{x_1^{71}} \wedge \overline{\overline{x_2^{71}} \wedge \overline{\overline{x_3^{71}}}} \wedge x_4^{71} \wedge x_{14}^{71} \wedge x_{15}^{71} \wedge x_{16}^{71}}}}}}}}}} . \end{aligned}$$

4. 3. Подання у ФПЗ логічних моделей підмаршрутів і маршруту розформування–формування состава Підмаршрут насунання:

$$\begin{aligned} X_H^4 &= X_1^4 \vee X_2^{10} \vee X_1^{11} \vee X_2^{16} \vee X_1^{17} \vee X_2^{18} \vee X_1^{19} \vee X_2^{20} \vee X_1^{21} \vee X_2^{22} \vee X_1^{23} = \\ &= \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{x_1^4} \wedge \overline{\overline{x_2^{10}} \wedge \overline{\overline{x_1^{11}} \wedge \overline{\overline{x_2^{16}} \wedge \overline{\overline{x_1^{17}} \wedge \overline{\overline{x_2^{18}} \wedge \overline{\overline{x_1^{19}} \wedge \overline{\overline{x_2^{20}} \wedge \overline{\overline{x_1^{21}} \wedge \overline{\overline{x_2^{22}} \wedge \overline{\overline{x_1^{23}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}}} , \end{aligned}$$

Підмаршрути розпуску:

$$\begin{aligned} X_P^{66} &= X_1^{24} \vee X_3^{25} \vee X_1^{26} \vee X_2^{27} \vee X_1^{36} \vee X_3^{37} \vee X_1^{38} \vee X_2^{39} \vee X_1^{40} \vee X_3^{41} = \\ &= \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{x_1^{24}} \wedge \overline{\overline{x_3^{25}} \wedge \overline{\overline{x_1^{26}} \wedge \overline{\overline{x_2^{27}} \wedge \overline{\overline{x_1^{36}} \wedge \overline{\overline{x_3^{37}} \wedge \overline{\overline{x_1^{38}} \wedge \overline{\overline{x_2^{39}} \wedge \overline{\overline{x_1^{40}} \wedge \overline{\overline{x_3^{41}}}}}}}}}}}}}}}}}}}} , \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_P^{67} &= X_1^{24} \vee X_3^{25} \vee X_1^{26} \vee X_2^{27} \vee X_1^{36} \vee X_3^{37} \vee X_1^{38} \vee X_2^{39} \vee X_1^{42} \vee X_3^{43} = \\ &= \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{x_1^{24}} \wedge \overline{\overline{x_3^{25}} \wedge \overline{\overline{x_1^{26}} \wedge \overline{\overline{x_2^{27}} \wedge \overline{\overline{x_1^{36}} \wedge \overline{\overline{x_3^{37}} \wedge \overline{\overline{x_1^{38}} \wedge \overline{\overline{x_2^{39}} \wedge \overline{\overline{x_1^{42}} \wedge \overline{\overline{x_3^{43}}}}}}}}}}}}}}}}}}}} , \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_P^{68} &= X_1^{44} \vee X_3^{45} \vee X_1^{46} \vee X_2^{47} \vee X_1^{48} \vee X_3^{49} \vee X_1^{50} \vee X_2^{51} \vee X_1^{52} \vee X_3^{53} = \\ &= \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{x_1^{44}} \wedge \overline{\overline{x_3^{45}} \wedge \overline{\overline{x_1^{46}} \wedge \overline{\overline{x_2^{47}} \wedge \overline{\overline{x_1^{48}} \wedge \overline{\overline{x_3^{49}} \wedge \overline{\overline{x_1^{50}} \wedge \overline{\overline{x_2^{51}} \wedge \overline{\overline{x_1^{52}} \wedge \overline{\overline{x_3^{53}}}}}}}}}}}}}}}}}}}} , \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_P^{71} &= X_1^{44} \vee X_3^{45} \vee X_1^{46} \vee X_2^{47} \vee X_1^{56} \vee X_3^{57} \vee X_1^{58} \vee X_2^{59} \vee X_1^{62} \vee X_3^{63} = \\ &= \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{x_1^{44}} \wedge \overline{\overline{x_3^{45}} \wedge \overline{\overline{x_1^{46}} \wedge \overline{\overline{x_2^{47}} \wedge \overline{\overline{x_1^{56}} \wedge \overline{\overline{x_3^{57}} \wedge \overline{\overline{x_1^{58}} \wedge \overline{\overline{x_2^{59}} \wedge \overline{\overline{x_1^{62}} \wedge \overline{\overline{x_3^{63}}}}}}}}}}}}}}}}}}}} , \end{aligned}$$

Загальний підмаршрут розпуску состава:

$$X_P^\Sigma = X_P^{66} \vee X_P^{67} \vee X_P^{68} \vee X_P^{71} = \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{x_P^{66}} \wedge \overline{\overline{x_P^{67}} \wedge \overline{\overline{x_P^{68}} \wedge \overline{\overline{x_P^{71}}}}}}}}}}}}}} ,$$

Підмаршрут маневрових робіт, що виконуються на заданих сортувальних коліях:

$$X_{MP} = X_4^{66} \vee X_4^{67} \vee X_4^{68} \vee X_4^{71} = \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{x_4^{66}} \wedge \overline{\overline{x_4^{67}} \wedge \overline{\overline{x_4^{68}} \wedge \overline{\overline{x_4^{71}}}}}}}}}}}}}} ,$$

Маршрут розформування–формування состава:

$$X_M = X_H^4 \vee X_P^\Sigma \vee X_{MP} = \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{\overline{x_H^4} \wedge \overline{\overline{x_P^\Sigma} \wedge \overline{\overline{x_{MP}}}}}}}}}}}} ,$$

4. 4. Перехід від ФПЗ до імовірнісної функції видів ділянок колії

На основі отриманих логічних моделей в базисі кон'юнкція-інверсія визначимо імовірнісні функції виникнення ПБФ шляхом заміни логічних змінних x , що уявляють бінарні події, на імовірності їх виникнення, а логічні дії на арифметичні за правилами наведеними в [8].

В наступних виразах позначимо P – імовірність виникнення відповідної бінарної події (ПБФ) протягом часу розпуску состава, Q – імовірність відсутності відповідної бінарної події (ПБФ) протягом часу розпуску состава.

Імовірність виникнення ПБФ на ділянці колії першого виду:

$$P(X_1) = (1 - q_1 q_2 q_3) p_4.$$

Імовірність виникнення ПБФ на ділянці колії другого виду:

$$P(X_2) = (1 - q_1 q_2 q_3 q_5) p_4.$$

Імовірність виникнення ПБФ на ділянці колії третього виду:

$$P(X_3) = 1 - (1 - (1 - q_1 q_2 q_3) p_4)(1 - (1 - q_6 q_7) p_8) \times \\ \times (1 - p_9 p_{10}) q_{11} q_{12} q_{13}.$$

Імовірність виникнення ПБФ на ділянках колії четвертого виду:

$$P(X_4) = 1 - (1 - (1 - q_1 q_2 q_3) p_4)(1 - p_{14} p_{15}) q_{16}.$$

Тоді імовірнісні функції виникнення ПБФ на конкретних ділянках колії станції можна представити таким чином для:

– ділянок колії станції першого виду:

$$P(X^1) = (1 - q_1^1 q_2^1 q_3^1) p_4^1;$$

$$P(X^2) = (1 - q_1^2 q_2^2 q_3^2) p_4^2;$$

....

$$P(X^{17}) = (1 - q_1^{17} q_2^{17} q_3^{17}) p_4^{17};$$

....

$$P(X^{62}) = (1 - q_1^{62} q_2^{62} q_3^{62}) p_4^{62};$$

– ділянок колії станції другого виду:

$$P(X^8) = (1 - q_1^8 q_2^8 q_3^8 q_5^8) p_4^8;$$

$$P(X^{10}) = (1 - q_1^{10} q_2^{10} q_3^{10} q_5^{10}) p_4^{10};$$

....

$$P(X^{23}) = (1 - q_1^{23} q_2^{23} q_3^{23} q_5^{23}) p_4^{23};$$

....

$$P(X^{59}) = (1 - q_{159} q_{259} q_{359} q_{559}) p_4^{59};$$

– ділянок колії станції третього виду:

$$P(X^{25}) = 1 - (1 - (1 - q_1^{25} q_2^{25} q_3^{25}) p_4^{25}) \times \\ \times (1 - (1 - q_6^{25} q_7^{25}) p_8^{25})(1 - p_9^{25} p_{10}^{25}) \times \\ \times q_{11}^{25} q_{12}^{25} q_{13}^{25};$$

$$P(X^{29}) = 1 - (1 - (1 - q_1^{29} q_2^{29} q_3^{29}) p_4^{29}) \times \\ \times (1 - (1 - q_6^{29} q_7^{29}) p_8^{29})(1 - p_9^{29} p_{10}^{29}) \times \\ \times q_{11}^{29} q_{12}^{29} q_{13}^{29};$$

....

$$P(X^{63}) = 1 - (1 - (1 - q_1^{63} q_2^{63} q_3^{63}) p_4^{63}) \times \\ \times (1 - (1 - q_6^{63} q_7^{63}) p_8^{63})(1 - p_9^{63} p_{10}^{63}) \times \\ \times q_{11}^{63} q_{12}^{63} q_{13}^{63};$$

– ділянок колії станції четвертого виду:

$$P(X^{64}) = 1 - (1 - (1 - q_1^{64} q_2^{64} q_3^{64}) p_4^{64}) \times \\ \times (1 - p_{14}^{64} p_{15}^{64}) q_{16}^{64};$$

$$P(X^{65}) = 1 - (1 - (1 - q_1^{65} q_2^{65} q_3^{65}) p_4^{65}) \times \\ \times (1 - p_{14}^{65} p_{15}^{65}) q_{16}^{65};$$

....

$$P(X^{71}) = 1 - (1 - (1 - q_1^{71} q_2^{71} q_3^{71}) p_4^{71}) \times \\ \times (1 - p_{14}^{71} p_{15}^{71}) q_{16}^{71}.$$

4. 5. Перехід від ФПЗ до імовірнісних функцій підмаршрутів і маршруту розформування–формування состава

Імовірність виникнення ПБФ на підмаршруті насуву:

$$P(X_H^4) = 1 - (Q^4 Q^{10} Q^{11} Q^{16} Q^{17} Q^{18} Q^{19} Q^{20} Q^{21} Q^{22} Q^{23}).$$

Імовірність виникнення ПБФ на підмаршруті розпуску:

$$P(X_P^{63}) = 1 - (Q^{24} Q^{25} Q^{26} Q^{27} Q^{28} Q^{29} Q^{30} Q^{31} Q^{32} Q^{33});$$

$$P(X_P^{65}) = 1 - (Q^{24} Q^{25} Q^{26} Q^{27} Q^{28} Q^{29} Q^{30} Q^{31} Q^{34} Q^{35});$$

$$P(X_P^{66}) = 1 - (Q^{24} Q^{25} Q^{26} Q^{27} Q^{36} Q^{37} Q^{38} Q^{39} Q^{40} Q^{41});$$

$$P(X_P^{67}) = 1 - (Q^{24} Q^{25} Q^{26} Q^{27} Q^{36} Q^{37} Q^{38} Q^{39} Q^{42} Q^{43});$$

$$P(X_P^{68}) = 1 - (Q^{44} Q^{45} Q^{46} Q^{47} Q^{48} Q^{49} Q^{50} Q^{51} Q^{52} Q^{53});$$

$$P(X_P^{69}) = 1 - (Q^{44} Q^{45} Q^{46} Q^{47} Q^{48} Q^{49} Q^{50} Q^{51} Q^{54} Q^{55});$$

$$P(X_P^{70}) = 1 - (Q^{44} Q^{45} Q^{46} Q^{47} Q^{56} Q^{57} Q^{58} Q^{59} Q^{60} Q^{61});$$

$$P(X_P^{71}) = 1 - (Q^{44} Q^{45} Q^{46} Q^{47} Q^{56} Q^{57} Q^{58} Q^{59} Q^{62} Q^{63}).$$

Імовірність виникнення ПБФ на загальному підмаршруті розпуску состава:

$$P(X_P^\Sigma) = 1 - (Q_P^{64} Q_P^{65} Q_P^{66} Q_P^{67} Q_P^{68} Q_P^{69} Q_P^{70} Q_P^{71}).$$

Імовірність виникнення ПБФ на підмаршруті маневрових робіт, що виконуються на заданих сортувальних коліях:

$$P(X_{MP}) = 1 - (Q_A^{64} Q_A^{65} Q_A^{66} Q_A^{67} Q_A^{68} Q_A^{69} Q_A^{70} Q_A^{71}).$$

Імовірність виникнення ПБФ на заданому маршруті розформування–формування состава:

$$P(X_M) = 1 - (Q_H^4 Q_P^\Sigma Q_{MP}).$$

4. 6. Розрахунок імовірностей виникнення ПБФ та визначення адекватності моделі

Для перевірки адекватності отриманої моделі ризику виникнення ПБФ виконано порівняльний розрахунок імовірності виникнення ПБФ при виконанні технологічного процесу розформування–формування

составів за запропонованим математичним апаратом та загальновідомою методологією теорії безпеки функціонування гіркових пристроїв [12].

Прийняв, згідно з [12], значення імовірностей Q рівними 0,0001 та підставив відповідні значення імовірностей в зазначені вище вирази отримаємо, що імовірність ПБФ при виконанні технологічного процесу розформування–формування составів дорівнює $1,590 \cdot 10^{-4}$.

При розрахунку імовірностей виникнення подій на ділянках колії, підмаршрутах та маршруту розформування–формування состава логіко-імовірнісним методом при зазначених вище значеннях імовірностей виникнення небезпечних ситуацій отримаємо імовірність виникнення ПБФ на заданому маршруті розформування–формування состава $1,406 \cdot 10^{-4}$.

Порівнюючи результати маємо розбіжність 13 %, що дозволяє зробити висновок про адекватність моделі та коректність отриманих результатів.

5. Висновки

Розроблено логіко-імовірнісні моделі виникнення ПБФ на маршруті розформування–формування состава, підмаршрутах і на ділянках колії. Отримані моделі дозволяють визначати імовірність виникнення ПБФ на окремих ділянках маршруту розформування–формування состава та всьому маршруті. На відміну від існуючих моделей враховується логічний зв'язок можливих небезпечних ситуацій на різних частинах маршруту. Існує можливість визначити який маршрут розформування–формування состава на сортувальній гірці є найбільш безпечним (небезпечним).

Література

1. Огар, О. М. Управління ризиками в системі «сортувальна гірка» [Текст] / О. М. Огар, С. О. Бантюкова // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків : УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 4. – С. 41-46.
2. Грунтов, П. С. Безопасность движения на железнодорожном транспорте [Текст] : учеб. пос. / П. С. Грунтов, Ф. П. Пищик. – Гомель : БелИИЖТ, 2001. – 122 с.
3. Балалаев, С. В. Безопасность движения на железных дорогах [Текст] : учеб. пос. в 2-х частях / С. В. Балалаев, И. Е. Кологри-вая. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2013. – Ч. 1. – 111 с.
4. Безопасность движения на железнодорожном транспорте [Текст] : методические указания для студентов и слушателей курсов повышения квалификации // Новосибирск, 2002. – 50 с.
5. Козаченко, Д. М. Розвиток теоретичних основ оцінки техніко-експлуатаційної ефективності та безпеки функціонування сортувальних гірок : дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» [Текст] / Д. М. Козаченко. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2011. – 297 с.
6. Соколов, О. Й. Розробка методики оцінки рівня безпеки руху на залізничному транспорті : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» [Текст] / О. Й. Соколов. – Харків: ХДАЗТ, 2000. – 21 с.
7. Хохлов, А. А. Технические средства обеспечения безопасности движения на железных дорогах [Текст] / А. А. Хохлов, В. И. Жуков. – М.: УМЦ ЖДТ, 2009. – 553 с.
8. Рябинин, И. А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем [Текст] / И. А. Рябинин, Г. Н. Черкесов. – М.: Радио и связь, 1981. – 264 с.
9. Рябинин, И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем [Текст] / И. А. Рябинин. – СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2007. – 278 с.
10. Модин, Н. К. Механизация и автоматизация станционных процессов [Текст] / Н. К. Модин. – М.: Транспорт, 1985. – 224 с.
11. Лисенков, В. М. Статистическая теория безопасности движения поездов [Текст] / В. М. Лисенков. – М.: ВИНТИ РАН, 1999. – 332 с.
12. Модин, Н. К. Безопасность функционирования горочных устройств [Текст] / Н. К. Модин. – М.: Транспорт, 1994. – 173 с.