

Рижков Вадим Генієвич, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-0768-544X

Бєлоконь Карина Володимирівна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-2000-4052

Манідіна Євгенія Анатоліївна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-4090-9991

ЗАСТОСУВАННЯ ДЕРЕВА ВІДМОВ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОТРАВМАТИЗМУ У МЕТАЛУРГІЇ І ВИБОРУ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ

Електротравми на виробництві відрізняються високою летальністю, що потребує ретельного виконання правил і норм електробезпеки, застосування захисних засобів. Будь-яке металургійне підприємство має розгалужені електричні мережі та значну кількість електроспоживачів. Окрім того сюди додаються несприятливі умови праці і наявність факторів підвищеної та особливої небезпеки ураження струмом. Все перелічене пред'являє підвищені вимоги до електробезпеки. Велике значення для профілактики електротравматизму має вивчення статистичних даних, виявлення безпосередніх причин ураження струмом і низки подій, що найчастіше ведуть до нещасного випадку. Одним з методів оцінювання ризику є метод побудови дерева відмов. Дерево відмов являє собою графічну модель різних паралельних і послідовних сполучень відмов, що призводять до реалізації заздалегідь визначеної небажаної події. Відмовами – базисними подіями можуть бути події, пов'язані з виходом з ладу елементів системи, помилками персоналу, неготовністю обладнання. Було побудовано дерево відмов, де верхньою, небажаною подією є поразка людини електричним струмом на виробництві протягом року. За базисні події були прийняті різні неполадки обладнання, відсутність або несправність засобів захисту, порушення правил безпеки персоналом тощо. На основі побудованого дерева відмов виконано розрахунок ймовірності ураження струмом, визначені найнебезпечніші низки подій, що ведуть до нещасного випадку. Аналіз результатів розрахунків показав, що для зниження небезпеки поразки струмом потрібно, в першу чергу, унеможливити помилкове подання напруги, або звести цю можливість до мінімуму. Як технічний захід слід запропонувати блокування апаратів вмикання струму під час виконання ремонтних робіт. Важливо забезпечити надійність спрацьовування захисного заземлення чи занулення. Практика показує, що надійність захисту від ураження струмом значно підвищується, якщо паралельно до заземлення (занулення) підключають устрій захисного відключення.

Ключові слова: електробезпека; ризик-орієнтований підхід, дерево відмов, мінімальний перетин, способи захисту

Вступ. У розвинутих країнах під час прийняття вирішень щодо безпеки життєдіяльності, охорони праці, використовують різні методи розрахунків ризику. Насамперед це стосується рішень відносно потенційно небезпечних об'єктів (АЕС, військові об'єкти). Але такі підходи можна застосовувати також до потенційно небезпечних промислових установок, для управління багатьма видами ризику в головних життєвих контекстах.

Досвід та практику забезпечення безпеки високих технологій (ядерна енергетика, авіація) екстрапольовано, перенесено з необхідними уточненнями та корективами на основні сфери життєдіяльності суспільства. При цьому було враховано, що випадки та інциденти, надзвичайні ситуації в авіації, на трасах газопроводу, атомній енергетиці, металургії, на воді та суші, а також у побуті, незважаючи на галузеве різноманіття мають однакові теоретичний базис виникнення та логіку розвитку подій. Використання оцінки ризику

в процесі забезпечення безпеки було засвоєно на протязі декількох десятиріч і доведено їх вигоду в різних сферах застосування. Методологію ризик-орієнтованого підходу (РОП) застосовують як у стратегічному плануванні, так і в повсякденній оперативній діяльності.

Основу концепції ризик-орієнтованого підходу в питаннях управління безпекою складає порівняння поточного ризику з припустимим, а методологією ризик-орієнтованого підходу служить ймовірнісний аналіз безпеки (ЙАБ). Результати ЙАБ можуть бути використані для визначення значимості різних чинників, що здійснюють внесок в аварію, іншу небажану подію, або для висновків щодо ризиків.

Аналіз досягнень. У галузі охорони праці для аналізу ризиків застосовують експертні оцінки, економічний аналіз, ергономічні методи, статистичний аналіз. Експертні оцінки є досить суб'єктивним методом, що дає приблизні результати. Методи економічного та ергономічного аналізу односторонні та теж не дають бажаної точності.

У роботі [1] дається теоретичне обґрунтування критерію ризику травмування у системі «оператор-машина-середовище» (ОМС).

Пропонується використовувати критерій ризику R оператору у системі ОМС через критерій безпеки S у вигляді:

$$R = 1 - S. \quad (1)$$

Критерій безпеки S визначають за формулою:

$$S = \frac{\alpha \cdot m}{n} + \frac{\beta \cdot p}{n} + \frac{\gamma \cdot p}{m+1}, \quad (2)$$

де α , β , γ – безрозмірні параметри моделі критерію безпеки технологічної системи, які знаходяться із граничних умов.; m – кількість операцій, що забезпечують оператору безпечне управління агрегатом з урахуванням його професійної кваліфікації; n – загальна кількість операцій, що потрібно для забезпечення безпеки оператора під час управління технологічною системою; p – кількість операцій, які забезпечують оператору безпечне усунення відмов агрегату.

Надана залежність має ряд недоліків. Наприклад, визначити кількість операцій n , m та p для реальної системи дуже складно, а часто й зовсім неможливо.

С.В. Гурув [2] визначає такі характеристики випадкових процесів:

$\zeta(\tau)$, $\zeta_0(\tau)$ – кількість відмов і відновлень елемента за час $[0, \tau]$ відповідно; $\chi(\tau)$, $\chi_0(\tau)$ – сумарний час роботи (наробка) і відновлення елемента за час $[0, \tau]$ відповідно.

На практиці, проте, використання залежностей, наведених у роботі [2] є дуже ускладненим через необхідність знання характеристики кожного елемента складної технічної системи.

Постановка завдання. Одним з методів оцінювання ризику є метод побудови дерева відмов (ДВ), що являє собою графічну модель різних паралельних і послідовних сполучень відмов, що приводять до реалізації заздалегідь визначеної небажаної події. Відмовами – базисними подіями можуть бути події, пов'язані з виходом з ладу елементів системи, помилками персоналу та неготовністю обладнання. Таким чином, дерево відмов відображає логічні взаємозв'язки базисних подій, які ведуть до небажаної події, що є його «верхньою подією». Схеми ДВ точно визначають логічні комбінації базисних подій, які призводять до верхньої події. Мета використання ДВ: виявлення шляхів, що призводять до відмови системи; вивчення взаємозалежності між відмовами елементів; визначення ймовірності відмови системи; одержання інформації про вразливі місця системи.

Підприємство чи природний об'єкт можна розглядати як складну систему з елементами, відмова яких може призвести до травмування, розвитку професійного захворювання, техногенної або екологічної катастрофи. Якщо знати ймовірність

відмови головних елементів, скласти ДВ, де верхньою, небажаною подією буде травма (будь-яка, або специфічна – опік, електричний удар, гостре отруєння), можна розрахувати ймовірність травмування, визначити мінімальні перетини та показники значимості.

Наприклад, можна скласти ДВ для випадку поразки людини струмом.

Головна частина досліджень. Використовуючи статистичні дані [3–10] було побудовано дерево відмов, де верхньою, небажаною подією є поразка людини електричним струмом на виробництві протягом року (рис. 1). На цьому ДВ базисними подіями є події $A_1 \dots A_{20}$:

A_1 – двофазний дотик до відкритих струмовідних частин;

A_2 – доступність відкритих струмовідних частин;

A_3 – поява людини у зоні відкритих струмовідних частин;

A_4 – однофазний дотик до відкритих струмовідних частин;

A_5 – наявність струмовідної основи;

A_6 – дотик до відкритих струмовідних частин під час виконання ремонтних робіт;

A_7 – помилкове подання напруги;

A_8 – дотик до неструмовідних частин установки, що випадково опинилася під напругою;

A_9 – наявність струмовідної основи;

A_{10} – пробивання на корпус;

A_{11} – неспрацьовування чи відсутність захисту (заземлення, занулення, відключення);

A_{12} – дотик до струмовідних частин із пошкодженою чи недостатньою ізоляцією;

A_{13} – пошкодження ізоляції внаслідок старіння;

A_{14} – механічне, термічне чи інше пошкодження ізоляції;

A_{15} – невірний вибір ізоляції;

A_{16} – обрив проводу небезпечної напруги на землю;

A_{17} – неспрацьовування чи відсутність захисту від напруги кроку;

A_{18} – знаходження людини у зоні наруги кроку;

A_{19} – наближення людини до струмовідних частин високої напруги;

A_{20} – утворення електричної дуги.

Події, які настають внаслідок реалізації базисних подій:

A_{2-3} – знаходження людини поблизу відкритих струмовідних частин, можливість дотику до них;

A_{1-3} – двофазний дотик до відкритих струмовідних частин;

A_{4-T} – однофазний дотик до відкритих струмовідних частин;

A_{1-T} – ураження струмом внаслідок випадкового дотику до відкритих струмовідних частин;

A_{6-7} – ураження струмом внаслідок дотику до відкритих струмовідних частин під час виконання ремонтних робіт;

A_{1-7} – ураження струмом внаслідок дотику до відкритих струмовідних частин;

A_{10-11} – наявність напруги на неструмовідних частинах;

A_{8-11} – ураження струмом внаслідок дотику до неструмовідних частин установки, що випадково опинилася під напругою;

A_{13-15} – пошкодження електроізоляції внаслідок будь-якої причини;

A_{12-15} – ураження струмом внаслідок дотику до струмовідних частин із пошкодженою чи недостатньою ізоляцією;

A_{16-18} – ураження струмом внаслідок дії напруги кроку;

A_{19-20} – ураження струмом внаслідок дії електричної дуги.

На підставі аналізу статистичних даних з електротравматизму були прийняті значення імовірності базисних подій, які наведені у табл. 1.

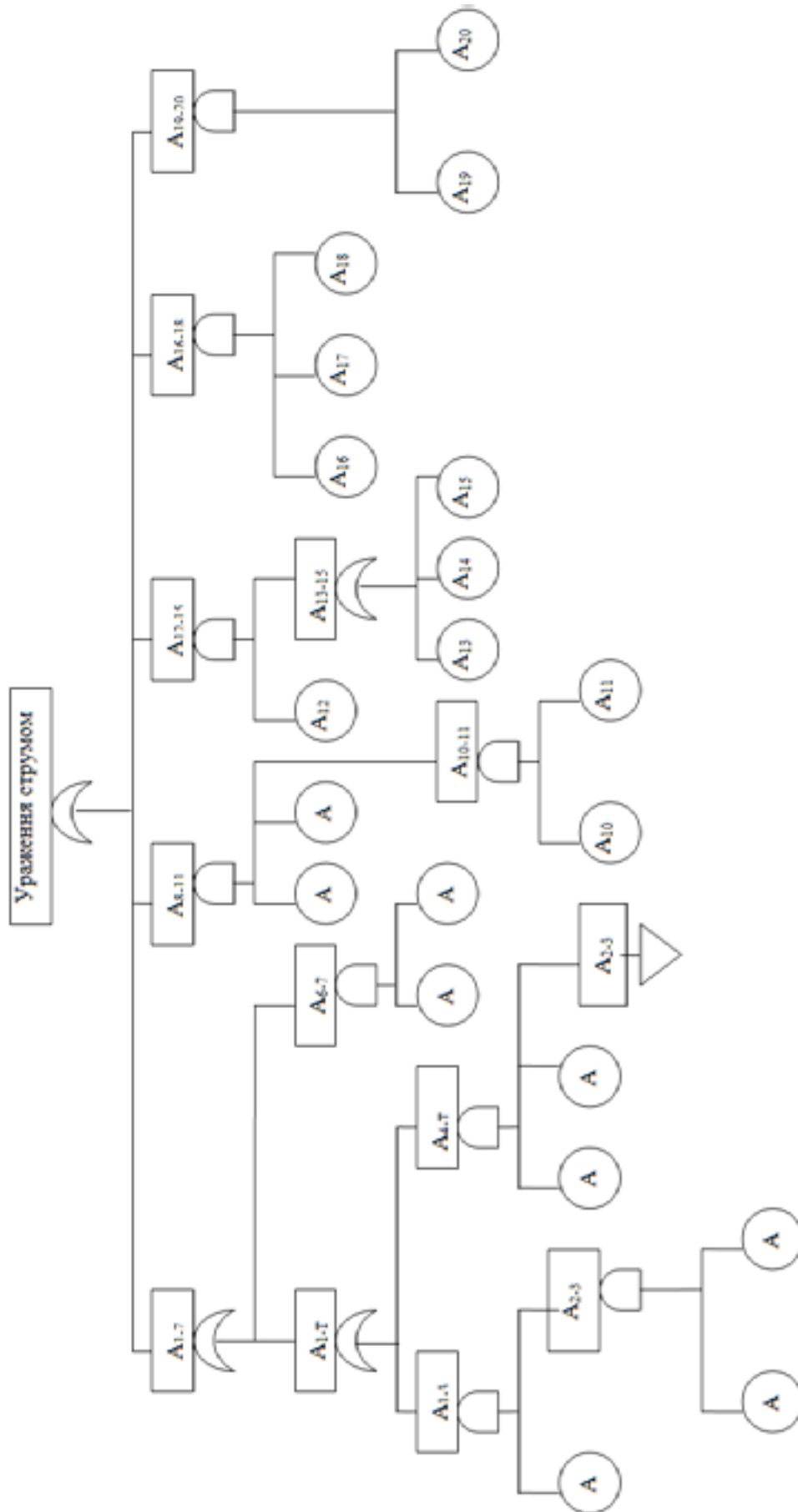


Рисунок 1 – Дерево відмов для аналізу ураження людини струмом

Таблиця 1 – Значення ймовірності базисних подій P_i для випадку «ураження людини струмом»

| | | | | | | | | | | |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|----------|----------|----------|
| Подія | A_1 | A_2 | A_3 | A_4 | A_5 | A_6 | A_7 | A_8 | A_9 | A_{10} |
| P_i | 10^{-3} | $2 \cdot 10^{-3}$ | 0,1 | 0,01 | 0,9 | 0,95 | $4,2 \cdot 10^{-6}$ | 0,9 | 0,9 | 0,1 |
| Подія | A_{11} | A_{12} | A_{13} | A_{14} | A_{15} | A_{16} | A_{17} | A_{18} | A_{19} | A_{20} |
| P_i | $3 \cdot 10^{-5}$ | 0,1 | $5 \cdot 10^{-6}$ | $5 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-3}$ | 10^{-3} | 0,1 | 10-5 | 0,01 |

Значення ймовірності базисних подій було закладено до програми «IRRAS». Розрахунки, що виконано за цією програмою дали значення ймовірності небажаної події (ураження людини струмом) $P_y = 10^{-5}$, що відповідає реальним цифрам: ймовірність травмування на виробництві в Україні дорівнює приблизно 10^{-3} , частка електротравм у загальному травматизмі 0,5...1,5%, отже ймовірність ураження струмом на виробництві за рік складає $(0,5...1,5) \cdot 10^{-5}$.

У табл. 2 наведено результати розрахунків мінімальних перетинів – низок базисних подій, які зумовлюють наступ верхньої (небажаної) події.

Таблиця 2 – Результати розрахунку мінімальних перетинів для випадку ураження людини струмом

| Номер мінімального перетину | Базисні події, що складають мінімальний перетин | Значення ймовірності мінімального перетину | Вклад мінімального перетину у загальний ризик, % |
|-----------------------------|---|--|--|
| 1 | A_6, A_7 | $4 \cdot 10^{-6}$ | 40 |
| 2 | A_8, A_9, A_{10}, A_{11} | $2,5 \cdot 10^{-6}$ | 25 |
| 3 | A_2, A_3, A_4, A_5 | $1,8 \cdot 10^{-6}$ | 18 |
| 4 | A_{12}, A_{13} | $5 \cdot 10^{-7}$ | 5 |
| 5 | A_{12}, A_{14} | $5 \cdot 10^{-7}$ | 5 |
| 6 | A_{12}, A_{15} | $2 \cdot 10^{-7}$ | 2 |
| 7 | A_1, A_2, A_3 | $2 \cdot 10^{-7}$ | 2 |
| 8 | A_{16}, A_{17}, A_{18} | $2 \cdot 10^{-7}$ | 2 |
| 9 | A_{19}, A_{20} | 10^{-7} | 1 |

Найбільш важливий мінімальний перетин № 1 складається з двох базисних подій: дотику до відкритих струмоведучих частин під час проведення ремонтних робіт (A_6) і одночасного помилкового подання напруги (A_7).

Подію A_7 , хоча у даному ДВ вона розглядається як базисна, можна подати як наслідок інших подій: відсутність на рубильнику плакату «не вмикати, працюють люди»; помилкове відключення не тієї установки; невідключення установки перед початком робіт; зловмисне подання напруги.

Мінімальний перетин № 2 теж досить небезпечний. Він складається з первинних подій, що обумовлюють ураження струмом внаслідок дотику до неструмоведучих частин установки, що випадково опинилися під напругою. З цих подій найменшу ймовірність має неспрацьовування апаратів захисту (A_{11}). Інші події цього перетину мають високу ймовірність.

Найбільш важливий мінімальний перетин № 1 складається з двох базисних подій: дотику до відкритих струмоведучих частин під час проведення ремонтних робіт (A_6) і одночасного помилкового подання напруги (A_7).

Подію A_7 , хоча у даному ДВ вона розглядається як базисна, можна подати як наслідок інших подій: відсутність на рубильнику плакату «не вмикати, працюють люди»; помилкове відключення не тієї установки; невідключення установки перед початком робіт; зловмисне подання напруги.

– RRR – коефіцієнт зменшення ризику, що показує, як зменшиться імовірність верхньої події, якщо імовірність події X зменшиться до нуля:

$$RRR = \frac{F(X)}{F(0)}; \quad (3)$$

– RRI – інтервал зменшення ризику:

$$RRI = F(X) - F(0); \quad (4)$$

– RIR – коефіцієнт збільшення ризику, що показує, як збільшиться імовірність верхньої події, якщо імовірність події X збільшиться до одиниці:

$$RIR = \frac{F(1)}{F(X)}; \quad (5)$$

– RII – інтервал збільшення ризику:

$$RII = F(1) - F(X). \quad (6)$$

Показник Бирнбаума B дорівнює сумі інтервалів зміни ризику:

$$B = RII + RRI. \quad (7)$$

Показник значимості Фуссела-Веселі події X визначають як відносний внесок події X в імовірність небажаної (верхньої) події:

$$FV = \frac{F(X) - F(0)}{F(X)} = \frac{B \cdot X}{F(X)} = \frac{RRI}{F(X)}. \quad (8)$$

У табл. 3 подано перелічені коефіцієнти та показники для випадку «ураження людини струмом».

Таблиця 3 – Показники значимості базисних подій для випадку «ураження людини струмом»

| Подія | Показники значимості | | | | | |
|----------|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|------|
| | RRI | RRR | RII | RIR | B | FV |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| A_7 | $4 \cdot 10^{-6}$ | 1,670 | 0,950 | 95000 | 0,950 | 0,40 |
| A_{11} | $2,5 \cdot 10^{-6}$ | 1,330 | 0,081 | 8100 | 0,081 | 0,25 |
| A_{13} | $5 \cdot 10^{-7}$ | 1,053 | 0,010 | 1000 | 0,010 | 0,05 |
| A_{14} | $5 \cdot 10^{-7}$ | 1,053 | 0,010 | 1000 | 0,010 | 0,05 |
| A_{15} | $2 \cdot 10^{-7}$ | 1,020 | 0,010 | 1000 | 0,010 | 0,02 |
| A_{19} | 10^{-7} | 1,010 | 0,010 | 1000 | 0,010 | 0,01 |
| A_2^* | $1,8 \cdot 10^{-6}$ | 1,220 | $8,98 \cdot 10^{-4}$ | 90,8 | $9 \cdot 10^{-4}$ | 0,18 |
| A_1 | $2 \cdot 10^{-7}$ | 1,020 | $2 \cdot 10^{-4}$ | 21 | $2 \cdot 10^{-4}$ | 0,02 |
| A_{17} | $2 \cdot 10^{-7}$ | 1,020 | $2 \cdot 10^{-4}$ | 21 | $2 \cdot 10^{-4}$ | 0,02 |
| A_4 | $1,8 \cdot 10^{-6}$ | 1,22 | $1,78 \cdot 10^{-4}$ | 18,8 | $1,8 \cdot 10^{-4}$ | 0,18 |
| A_2 | $2 \cdot 10^{-7}$ | 1,02 | 10^{-4} | 11 | 10^{-4} | 0,02 |
| A_{16} | $2 \cdot 10^{-7}$ | 1,02 | 10^{-4} | 11 | 10^{-4} | 0,02 |
| A_{12} | $1,2 \cdot 10^{-6}$ | 1,136 | $3,33 \cdot 10^{-5}$ | 4,33 | $3,45 \cdot 10^{-5}$ | 0,12 |
| A_{10} | $2,5 \cdot 10^{-6}$ | 1,33 | $2,25 \cdot 10^{-5}$ | 3,25 | $2,5 \cdot 10^{-5}$ | 0,25 |
| A_3^* | $1,8 \cdot 10^{-6}$ | 1,22 | $1,62 \cdot 10^{-5}$ | 2,62 | $1,8 \cdot 10^{-5}$ | 0,18 |
| A_{20} | 10^{-7} | 1,01 | 10^{-5} | 2 | 10^{-5} | 0,01 |
| A_6 | $4 \cdot 10^{-6}$ | 1,67 | $2 \cdot 10^{-7}$ | 1,02 | $9,6 \cdot 10^{-6}$ | 0,4 |
| A_8 | $2,5 \cdot 10^{-6}$ | 1,33 | $2,8 \cdot 10^{-7}$ | 1,028 | $2,78 \cdot 10^{-6}$ | 0,25 |
| A_9 | $2,5 \cdot 10^{-6}$ | 1,33 | $2,8 \cdot 10^{-7}$ | 1,028 | $2,78 \cdot 10^{-6}$ | 0,25 |
| A_3 | $2 \cdot 10^{-7}$ | 1,02 | $1,8 \cdot 10^{-6}$ | 1,18 | $2 \cdot 10^{-6}$ | 0,02 |
| A_{18} | $2 \cdot 10^{-7}$ | 1,02 | $1,8 \cdot 10^{-6}$ | 1,18 | $2 \cdot 10^{-6}$ | 0,02 |
| A_5 | $1,8 \cdot 10^{-6}$ | 1,22 | $2 \cdot 10^{-7}$ | 1,02 | $2 \cdot 10^{-6}$ | 0,18 |

Як видно, щодо ступеню важливості за показниками Бирнбаума та Фуссела-Веселі виділяються дві події – помилкове подання напруги під час виконання ремонтних робіт на струмовідних частинах (A_7), та неспрацьовування чи відсутність захисту у разі ураження людини за дотиком до неструмовідних частин, що випадково опинилися під напругою (A_{11}). Інші базисні події мають значно меншу важливість.

Проаналізувавши результати розрахунків, можна зробити такі висновки:

– загальний ризик (імовірність) ураження струмом на виробництві на протязі року складає близько 10^{-5} . Враховуючи велику смертність електротравм, потрібно вважати цей ризик високим;

– найважливішими мінімальними перетинами є перетини, що складаються з подій A_6 , A_7 та A_8 , A_9 , A_{10} , A_{11} . Перша група подій стосується дотику до відкритих струмоведучих частин, друга – дотику до неструмовідних частин, що випадково опинилися під напругою. У сумі ці перетини дають 65 % вкладу у загальний ризик;

– визначальними базисними подіями, що здійснюють найбільший внесок у ризик, є події A_7 – помилкове подання напруги (перетин № 1) та A_{11} – неспрацьовування чи відсутність захисту – заземлення, занулення, відключення (перетин № 2). Такі базисні події є дуже небезпечними – вони з високою імовірністю ведуть до ураження струмом;

– для зниження небезпеки поразки струмом потрібно, в першу чергу, унеможливити помилкове подання напруги, або звести таку можливість до мінімуму.

Шляхи реалізації – посилення нагляду за виконанням робіт на струмоведучих частинах, за дотриманням системи нарядів-допусків, за проведенням інструктажів. Як технічний захід можна запропонувати блокування апаратів вмикання струму під час виконання ремонтних робіт.

Важливо забезпечити надійність спрацьовування захисного заземлення чи занулення. Практика показує, що надійність захисту від ураження струмом значно підвищується, якщо паралельно до заземлення (занулення) підключають устрій захисного відключення (УЗВ). Відповідно до схеми мережі та конкретної ситуації це можуть бути УЗВ, що реагують на потенціал корпусу, струм замикання на землю, напругу чи струм нульової послідовності, оперативний струм. Наприклад, система захисного заземлення дублюється УЗВ. Візьмемо імовірність неспрацьовування захисного заземлення $P_3 = 3 \cdot 10^{-5}$ (як у розрахунку), а імовірність неспрацьовування захисного відключення трохи більшою (так як система УЗВ є більш складною та має більшу кількість елементів), $P_6 = 10^{-4}$. Тоді загальна імовірність неспрацьовування захисту $P_\Sigma = P_3 \cdot P_6 = 3 \cdot 10^{-9}$. Це дуже малий, нехтовний ризик. Значення імовірності мінімального перетину № 2 зменшиться більше ніж у десять тисяч разів і складе $2,43 \cdot 10^{-10}$. Вклад мінімального перетину у загальний ризик буде дорівнювати $3,2 \cdot 10^{-3} \%$ замість 25 %.

Бібліографічний перелік

1. Попова А.Г. Улучшение условий и охраны труда операторов мобильных колёсных машин путём автоматизации устранения транспортно-технологических отказов : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Челябинск, 2006. 178 с.

2. Гуров С.В. Методы и модели анализа надёжности сложных технических систем с переменной структурой и произвольными законами распределений случайных параметров, отказов и восстановлений : диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. С.-Петербург, 1997. 328 с.

3. Травматизм на виробництві в Україні у 2017 році : статистичний збірник. Київ : Державна служба статистики України, 2018. 132 с.

4. Состояние производственного травматизма на комбинате ОАО «Запорожсталь». Отдел ОТ ОАО «Запорожсталь», 2007.

5. Профессиональная заболеваемость в Украине. *Охрана труда*. 2005. № 5.

6. Профілактика виробничого травматизму та професійних захворювань за 9 місяців 2019 року. *Фонд соціального страхування України* : веб-сайт. URL: <http://www.fssu.gov.ua/fse/control/main/uk/publish/article/951811> (дата звернення: 05.11.2020).
7. Сучасний стан охорони праці в Україні. *Асоціація «Асгоп»* : веб-сайт. URL: <https://asgop.com.ua/index.php/2019/01/02/1/> (дата звернення: 09.09.2020).
8. Травматизм на виробництві: скільки було випадків і де найнебезпечніше працювати в Україні. URL: <https://www.slovoidilo.ua/2021/04/28/infografika/suspilstvo/travmatyzm-vyrobnyctvi-skilky-bulo-vypadkiv-najnebezpechnishe-pracyuvaty-ukrayini>
9. Крюковська О.А., Гасило Ю.А. Аналіз виробничого травматизму в металургійній галузі. URL: http://library.uipa.edu.ua/images/data/zbirnik/Yak_2/20.pdf
10. Серета М.А. Стан виробничого травматизму в Україні у 2020 р. URL: <https://www.sop.com.ua/article/952-stan-virobnichogo-travmatizmu-v-ukran>

References

1. Popova A.G. Uluchshenie uslovij i okhrany truda operatorov mobilnykh kolyosnykh mashin putyom avtomatizacii ustraneniya transportno-tehnologicheskikh otkazov : dissertacziya na soiskanie uchyonoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Chelyabinsk, 2006. 178 s.
2. Gurov S.V. Metody i modeli analiza nadyozhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem s peremennoj strukturoj i proizvolnymi zakonami rapredelenij sluchajnykh parametrov, otkazov i vosstanovlenij : dissertacziya na soiskanie uchyonoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. S.-Petrburg, 1997. 328 s.
3. Travmatyzm na vyrobnyctvi v Ukrayini u 2017 roci : statystychnyj zbirnyk. Kyiv : Derzhavna sluzhba statystyky Ukrayiny, 2018. 132 s.
4. Sostoyanie proizvodstvennogo travmatizma na kombinatе ОАО «Zaporozhstal». Zaporozhe : Otdel OT ОАО «Zaporozhstal», 2007. 70 p.
5. Professionalnaya zaboлеваemost v Ukraine. *Okhrana truda*. 2005. No. 5.
6. Profilaktyka vyrobnychogo travmatyzmu ta profesijnyx захворуван за 9 misyaciv 2019 roku. *Fond socialnogo straxuvannya Ukrayiny* : veb-sajt. URL: <http://www.fssu.gov.ua/fse/control/main/uk/publish/article/951811> (data zvernennya: 05.11.2020).
7. Suchasnyj stan oxorony praci v Ukrayini. *Asociaciya "Asgop"* : veb-sajt. URL : <https://asgop.com.ua/index.php/2019/01/02/1/> (data zvernennya: 09.09.2020).
8. Travmatyzm na vyrobnyctvi: skilky bulo vypadkiv i de najnebezpechnishe pracyuvaty v Ukrayini. URL: <https://www.slovoidilo.ua/2021/04/28/infografika/suspilstvo/travmatyzm-vyrobnyctvi-skilky-bulo-vypadkiv-najnebezpechnishe-pracyuvaty-ukrayini>
9. Kryukovska O.A., Gasylo Yu.A. Analiz vyrobnychogo travmatyzmu v metalurgijnij galuzi. URL: http://library.uipa.edu.ua/images/data/zbirnik/Yak_2/20.pdf
10. Sereta M.A. Stan vyrobnychogo travmatyzmu v Ukrayini u 2020 r. URL: <https://www.sop.com.ua/article/952-stan-virobnichogo-travmatizmu-v-ukran>

Ryzhkov Vadim, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Zaporizhzhia National University
Belokon Karina, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Zaporizhzhia National University
Manidina Eugene, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Zaporizhzhia National University

APPLICATION OF FAILURE TREE FOR ANALYSIS OF ELECTROTRAUMATISM IN METALLURGY AND CHOICE OF PROTECTIVE EQUIPMENT

lectric injuries at work are highly lethal, which requires careful compliance with the rules and regulations of electrical safety, the use of protective equipment. Any metallurgical enterprise has an extensive electrical network, a significant number of electricity consumers. In addition, unfavorable working conditions and the presence of factors of increased and special risk of electric shock are added here. All of the above have increased requirements for electrical safety. Of great importance for the prevention of electrocution is the study of statistics, the identification of the immediate causes of electric shock and a number of events that often lead to an accident. One of the methods of risk assessment is the method of constructing a failure tree. The failure tree is a graphical model of various parallel and sequential combinations of

failures that lead to the implementation of a predetermined adverse event. Failures – base events can be events related to the failure of system elements, personnel errors, equipment unpreparedness. A failure tree has been constructed in which the top, undesirable event is the electric shock of a person at work during the year. Various equipment problems, lack or failure of means of protection, violation of safety rules by personnel, etc. were taken as basic events. Based on the constructed failure tree, the probability of electric shock was calculated, the most dangerous series of events leading to an accident were identified. Analysis of the result of the calculation showed that to reduce the risk of electric shock, it is necessary, first of all, to prevent erroneous voltage supply, or to minimize this possibility. As a technical measure it is possible to offer blocking of devices of switching on of current during carrying out repair work. It is important to ensure the reliability of the protective earthing or grounding. Practice shows that the reliability of protection against electric shock is significantly increased if a protective circuit breaker is connected in parallel to grounding (zeroing).

Keywords: electrical safety; risk-oriented approach, failure tree, minimum cross section, protection methods

Стаття надійшла: 14.10.2021 р.