

УДК 697.92

**В.Г. РИЖКОВ** (канд. техн. наук, доц.)

**К.В. БСЛОКОНЬ** (канд. техн. наук, доц.)

**В.Р. РУМЯНЦЕВ** (канд. техн. наук, доц.)

**Є.А. МАНІДІНА** (аспірант)

Запорізька державна інженерна академія, Запоріжжя

**О.В. МАТУХНО** (канд. техн. наук, доц.)

Національна металургійна академія України, Дніпропетровськ

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ПОБУДОВИ ДЕРЕВА ВІДМОВ ДЛЯ ПРОФІЛАКТИКИ ЕЛЕКТРОТРАВМАТИЗМУ НА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Складено дерево відмов для випадку ураження людини електричним струмом на промисловому підприємстві, знайдено мінімальні перетини та розраховано їх ймовірність. Надано рекомендації щодо зниження ризику електротравматизму.

**Ключові слова:** дерево відмов, електротравматизм, електричним струм, напруга, ізоляція, електрична дуга.

**Вступ.** Методологічною основою охорони праці є науковий аналіз умов праці, технологічних процесів, виробничого обладнання, робочих місць, трудових операцій, організації виробництва, навколишнього середовища з метою виявлення шкідливих і небезпечних виробничих факторів, виникнення можливих аврійних ситуацій. На підставі такого аналізу розробляються заходи щодо усунення небезпечних і шкідливих виробничих факторів, створення здорових умов праці. Існують закони розподілу випадкових величин, знання яких дає можливість розраховувати ймовірність різних комбінацій випадкових величин і, у підсумку, ймовірність небажаної події (небезпеки).

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Вже більше 20 років у розвинутих країнах при прийнятті рішень використовуються різні методи розрахунку ризику. Насамперед це стосується рішень відносно потенційно небезпечних об'єктів (АЕС, військові об'єкти). Але ці підходи можуть застосовуватись також до потенційно небезпечних промислових установок, для управління багатьма видами ризику в основних життєвих контекстах.

Розвинуті країни досвід та практику забезпечення безпеки високих технологій (ядерна енергетика, авіація) екстраполювали та перенесли з необхідними уточненнями та корективами на основні сфери життя і діяльності суспільства. При цьому було враховано, що випадки та інциденти, надзвичайні ситуації в авіації, на трасах газопроводів, атомній енергетиці, металургії, на воді і суші, в побуті, незважаючи на галузеве різноманіття мають однаковий теоретичний базис виникнення і логіку розвитку подій. Використання оцінки ризику в процесі забезпечення безпеки відбувалось на протязі декількох десятиріч, і довело вигоду її застосування у різних сферах. Методологія ризик-орієнтованого підходу (РОП) застосовується як у стратегічному плануванні, так і в повсякденній оперативній діяльності.

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

Найуніверсальніший і найпоширеніший метод аналізу ризиків – метод аналізу „дерев відмов”, що реалізований різними програмними продуктами (кодами). Один із найбільш розповсюджених з них – це код „IRRAS”[1-3].

Дерево відмов (ДВ) являє собою графічну модель різних паралельних і послідовних сполучень відмов (події, пов'язані з виходом з ладу елементів системи, помилками персоналу, неготовністю устаткування), що приводять до реалізації заздалегідь визначеної небажаної події. Таким чином, дерево відмов відображає логічні взаємозв'язки базисних подій, які ведуть до небажаної події, що уявляє собою „верхню подію” дерева відмов. Схеми ДВ точно визначають логічні комбінації базисних подій, що приводять до верхньої події.

ДВ є математичні імовірнісні моделі систем, що враховують можливі відмови всіх елементів, що складають систему, їхній взаємозв'язок і взаємозалежність та дозволяють розрахувати імовірність відмови системи на основі відомих характеристик надійності її елементів.

**Постановка задачі.** Проаналізувати виробничий травматизм у металургійному комплексі України на основі РОП.

**Основна частина.** Використовуючи статистичні дані [4-6], було побудовано дерево відмов, де верхньою, небажаною подією є поразка людини електричним струмом на виробництві протягом року (рис. 1). На цьому ДВ базисними є наступні події:

- $A_1$  – двофазний дотик до відкритих струмоведучих частин;
  - $A_2$  – доступність відкритих струмоведучих частин;
  - $A_3$  – поява робітника у зоні відкритих струмоведучих частин;
  - $A_4$  – однофазний дотик до відкритих струмоведучих частин;
  - $A_5$  – наявність струмопровідної основи у разі  $A_4$ ;
  - $A_6$  – дотик до відкритих струмоведучих частин під час проведення ремонтних робіт;
  - $A_7$  – помилкове подання напруги;
  - $A_8$  – дотик до неструмоведучих частин установки, що випадково опинилася під напругою;
  - $A_9$  – наявність струмопровідної основи у разі  $A_8$ ;
  - $A_{10}$  – пробивання на корпус;
  - $A_{11}$  – неспрацьовування чи відсутність захисту (заземлення, занулення, відключення);
  - $A_{12}$  – дотик до струмоведучих частин із пошкодженою чи недостатньою ізоляцією;
  - $A_{13}$  – пошкодження ізоляції внаслідок старіння;
  - $A_{14}$  – механічне, термічне або 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 робітника у зоні напруги кроку;
  - $A_{19}$  – наближення робітника до струмоведучих частин високої напруги;
  - $A_{20}$  – утворення електричної дуги.
- До подій, що настають внаслідок реалізації базисних подій, слід віднести:
- $A_{2-3}$  – можливість дотику робітника до відкритих струмоведучих частин;
  - $A_{1-3}$  – ураження струмом внаслідок двофазного дотику робітника до відкритих струмоведучих частин;
  - $A_{4-7}$  – можливість однофазного дотику робітника до відкритих струмоведучих частин;

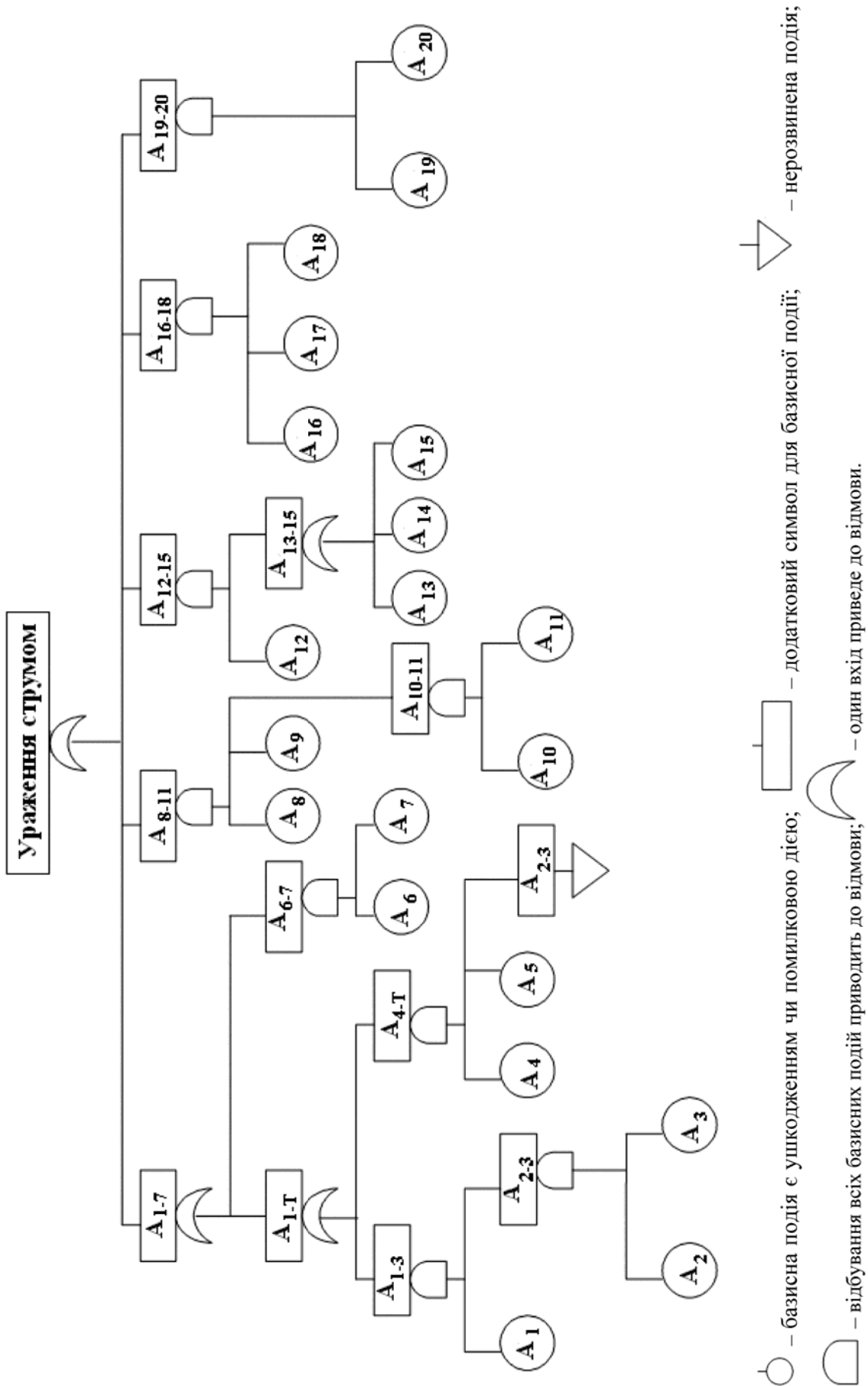


Рис. 1. Дерево відмов для аналізу ураження людини струмом

$A_{1-7}$  – ураження струмом внаслідок випадкового дотику до відкритих струмоведучих частин;

$A_{6-7}$  – ураження струмом внаслідок дотику до відкритих струмоведучих частин під час проведення ремонтних робіт;

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

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

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

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

$A_{12-15}$  – ураження струмом внаслідок дотику до струмоведучих 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 ймовірності базисних подій, що наведені у табл. 1. Значення ймовірностей базисних подій було закладено до програми "IRRAS". Розрахунки, проведені за цією програмою, дозволили одержати значення ймовірності небажаної події (ураження людини струмом)  $P_y = 10^{-5}$ . Це відповідає реальним цифрам: ймовірність травмування на виробництві в Україні дорівнює приблизно  $10^{-3}$ , частка електротравм у загальному травматизмі складає 0,5...1,5 %, отже ймовірність ураження струмом на виробництві за рік сягає  $(0,5...1,5) \cdot 10^{-5}$ .

Таблиця 1 – Значення ймовірностей базисних подій  $P_i$  для випадку ураження людини струмом

Подія	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$	$A_9$	$A_{10}$
$P_i$	$10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,10	0,01	0,90	0,95	$4,2 \cdot 10^{-6}$	0,90	0,90	0,10
Подія	$A_{11}$	$A_{12}$	$A_{13}$	$A_{14}$	$A_{15}$	$A_{16}$	$A_{17}$	$A_{18}$	$A_{19}$	$A_{20}$
$P_i$	$3 \cdot 10^{-5}$	0,10	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$10^{-3}$	0,10	$10^{-5}$	0,01

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

Таблиця 2 – Результати розрахунків 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	$A_6, A_7$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	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	$A_{12}, A_{13}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	5
5	$A_{12}, A_{14}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	5
6	$A_{12}, A_{15}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	2
7	$A_1, A_2, A_3$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	2
8	$A_{16}, A_{17}, A_{18}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	2
9	$A_{19}, A_{20}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	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  $A_7$ , яку в даному ДВ розглядають як базисну, 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, які випадково опинилися під напругою. З цих подій найменшу ймовірність має неспрацювання апаратів захисту ( $A_{11}$ ). Інші події цього перетину мають високу ймовірність.

Окрім мінімальних перетинів, існують показники значимості базисних подій. Загальна ідея визначення значимості базисних подій для системи полягає у визначенні зміни ймовірності верхньої події за умови, що цікавляча нас базисна подія ніколи не відбудеться (ймовірність  $P = 0$ ), чи є абсолютно достовірною ( $P = 1$ ).

Існують два основних показники значимості, що широко використовуюються під час аналізу безпеки: значимість за Бирнбаумом і значимість за Фусселлом-Веселі.

Показник значимості Бирнбаума  $B(x)$  події  $X$  визначається як похідна ймовірності  $P$  верхньої (небажаної) події по ймовірності події  $X$ :

$$B(x) = \frac{d}{dx} P(x). \quad (1)$$

У програмі «IRRAS» показник значимості Бирнбаума події  $X$  визначається також через нижченаведені коефіцієнти й інтервали зміни ризику:  $RRR$ ,  $RIR$  – відповідно коефіцієнт зменшення та збільшення ризику;  $RRI$ ,  $RII$  – відповідно інтервал зменшення та збільшення ризику.

Показник значимості Фуссела-Веселі події  $X$  визначається як відносний внесок події  $X$  в ймовірність небажаної (верхньої) події:

$$FV = \frac{RRI}{F(X)}. \quad (2)$$

Важливість подій (значимість) відносно їх впливу на реалізацію небажаної події (ураження людини струмом) подано у табл. 3.

Як видно, програма «IRRAS» виділяє щодо ступеня важливості за показниками Бирнбаума та Фуссела-Веселі дві події – помилкове подання напруги під час виконання ремонтних робіт на струмоведучих частинах ( $A_7$ ), та неспрацювання чи відсутність захисту у випадку ураження робітника при дотику до неструмоведучих частин, що випадково опинилися під напругою ( $A_{11}$ ). Інші базисні події мають значно меншу важливість.

Важливо забезпечити надійність спрацювання захисного заземлення чи занулення. Практика показує, що надійність захисту від ураження струмом значно підвищується, якщо паралельно до заземлення (занулення) підключають устрій захисного відключення (УЗВ) [7]. Відповідно до схеми мережі та конкретної ситуації ними 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. Беруть ймовірність неспрацювання захисного заземлення таким, що дорівнює  $P_3 = 3 \cdot 10^{-5}$  [8], а ймовірність неспрацювання захисного відключення трохи більшою (так як система УЗВ є більш складною та має більшу кількість елементів),  $P_6 = 10^{-4}$ . Тоді загальна ймовір-

ність неспрацьовування захисту  $P_{\Sigma} = P_3 \cdot P_6 = 3 \cdot 10^{-9}$ . Це є дуже малим, нехтовним ризиком. Значення ймовірності мінімального перетину № 2 зменшиться більш ніж у десять тисяч разів і складає  $2,43 \cdot 10^{-10}$ . Вклад мінімального перетину у загальний ризик буде дорівнювати  $3,2 \cdot 10^{-3}\%$  замість 25 %.

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

Подія	Показники значимості					
	<i>RRI</i>	<i>RRR</i>	<i>RII</i>	<i>RIR</i>	<i>B</i>	<i>FV</i>
A <sub>7</sub>	$4,0 \cdot 10^{-6}$	1,67	0,950	95000	0,95	0,40
A <sub>11</sub>	$2,5 \cdot 10^{-6}$	1,33	0,081	8100	0,08	0,25
A <sub>13</sub>	$5,0 \cdot 10^{-7}$	1,05	0,010	1000	0,01	0,05
A <sub>14</sub>	$5,0 \cdot 10^{-7}$	1,05	0,010	1000	0,01	0,05
A <sub>15</sub>	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1,02	0,010	1000	0,01	0,02
A <sub>19</sub>	$1,0 \cdot 10^{-7}$	1,01	0,010	1000	0,01	0,01
A <sub>2</sub> *	$1,8 \cdot 10^{-6}$	1,22	$9,0 \cdot 10^{-4}$	90,8	$9 \cdot 10^{-4}$	0,18
A <sub>1</sub>	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1,02	$2,0 \cdot 10^{-4}$	21	$2 \cdot 10^{-4}$	0,02
A <sub>17</sub>	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1,02	$2,0 \cdot 10^{-4}$	21	$2 \cdot 10^{-4}$	0,02
A <sub>4</sub>	$1,8 \cdot 10^{-6}$	1,22	$1,8 \cdot 10^{-4}$	18,80	$1,8 \cdot 10^{-4}$	0,18
A <sub>2</sub>	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1,02	$1,0 \cdot 10^{-4}$	11	$10^{-4}$	0,02
A <sub>16</sub>	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1,02	$1,0 \cdot 10^{-4}$	11	$10^{-4}$	0,02
A <sub>12</sub>	$1,2 \cdot 10^{-6}$	1,14	$3,3 \cdot 10^{-5}$	4,33	$3,4 \cdot 10^{-5}$	0,12
A <sub>10</sub>	$2,5 \cdot 10^{-6}$	1,33	$2,2 \cdot 10^{-5}$	3,25	$2,5 \cdot 10^{-5}$	0,25
A <sub>3</sub> *	$1,8 \cdot 10^{-6}$	1,22	$1,6 \cdot 10^{-5}$	2,62	$1,8 \cdot 10^{-5}$	0,18
A <sub>20</sub>	$1,0 \cdot 10^{-7}$	1,01	$2,0 \cdot 10^{-5}$	2	$10^{-5}$	0,01
A <sub>6</sub>	$4,0 \cdot 10^{-6}$	1,67	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1,02	$9,6 \cdot 10^{-6}$	0,40
A <sub>8</sub>	$2,5 \cdot 10^{-6}$	1,33	$2,8 \cdot 10^{-7}$	1,03	$2,8 \cdot 10^{-6}$	0,25
A <sub>9</sub>	$2,5 \cdot 10^{-6}$	1,33	$2,8 \cdot 10^{-7}$	1,03	$2,8 \cdot 10^{-6}$	0,25
A <sub>3</sub>	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1,02	$1,8 \cdot 10^{-6}$	1,18	$2 \cdot 10^{-6}$	0,02
A <sub>18</sub>	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1,02	$1,8 \cdot 10^{-6}$	1,18	$2 \cdot 10^{-6}$	0,02
A <sub>5</sub>	$1,8 \cdot 10^{-6}$	1,22	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1,02	$2 \cdot 10^{-6}$	0,18

Оцінюючи вищесказане можна зробити такі **висновки**:

1. Загальний ризик (ймовірність) ураження струмом на виробництві на протязі року складає близько  $10^{-5}$ . Враховуючи велику кількість смертельних випадків від елетротравм, цей ризик необхідно вважати високим.

2. Найважливішими мінімальними перетинами є перетини, що складаються з подій A<sub>6</sub>, A<sub>7</sub>, A<sub>8</sub>, і A<sub>9</sub>, A<sub>10</sub>, A<sub>11</sub>. Перша група подій стосується дотику до відкритих

струмоведучих частин, друга – дотику до неструмоведучих частин, що випадково опинилися під напругою. Разом ці два перетини дають 65 % вкладу у загальний ризик.

3. 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).

4. Для зниження небезпеки поразки струмом необхідно, в першу чергу, знеможливити помилкове подання напруги, або звести цю можливість до мінімуму. Шляхи реалізації – посилення нагляду за виконанням робіт на струмоведучих частинах, дотримання системи нарядів-допусків, проведення інструктажів. Як технічний захід можна запропонувати блокування апаратів вмикання струму під час проведення ремонтних робіт.

### Список використаної літератури

1. Грабовский В.П. Основы теории надёжности автоматических систем управления / В.П. Грабовский, Л.П. Глазунов, О.В. Щербаков. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
2. Коваленко И.Н. Асимптотический метод анализа надёжности сложных систем / И.Н. Коваленко. – М.: Сов. радио, 1979. – 220 с.
3. Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування об'єктів підвищеної небезпеки. – К.: Основа, 2003. – 191 с.
4. Оперативные данные о состоянии производственного травматизма за 2008 г. по сравнению с 2007 г. // Охрана труда. – 2009. – №2. – С. 6.
5. Оперативные данные о состоянии производственного травматизма за 2007 г. по сравнению с 2006 г. // Охрана труда. – 2008. – №3. – С. 51.
6. Ажибаев К.А. Физиологические и патофизиологические механизмы поражения электрическим током / К.А. Ажибаев. – Фрунзе: Илим, 1987. – 267 с.
7. Бацеливич И.Э. Анализ влияния переходных процессов на исход травм / И.Э. Бацеливич, И.Ф. Сидоров // Машины и механизмы горных работ. – 1988. – № 3. – С. 13-15.
8. Глазенап М.С. Методика исследования электротравм / М.С. Глазенап, В.Е. Манойлов, Ю.К. Тентер. – Фрунзе: Изд-во АН Кирг. ССР, 1980. – 62 с.

*Надійшла до редакції 29.08.2013*

В.Г. Рыжков, К.В. Белоконов, В.Р. Румянцев, Е.А. Манидина, Е.В. Матухно

#### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОСТРОЕНИЯ ДЕРЕВА ОТКАЗОВ ДЛЯ ПРОФИЛАКТИКИ ЭЛЕКТРОТРАВМАТИЗМА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Составлено дерево отказов для случая поражения человека электрическим током на промышленном предприятии, найдены минимальные сечения и рассчитаны их вероятности. Даны рекомендации по снижению риска электротравматизма.

Ключевые слова: дерево отказов, электротравматизм, электрическим ток, напряжение, изоляция, электрическая дуга.

V.G. Rizhkov, K.V. Belokon', V.R. Rumiantsev, Ye.A. Manidina, Ye.V. Matukhno

#### A METHOD OF CREATING A REFUSAL TREE TO PREVENT ELECTRIC INJURIES AT INDUSTRIAL ENTERPRISES

We created a refusals tree for a case of person's electric current damage at an industrial enterprise, defined minimum sections and calculated their probabilities. Recommendations to decrease the risk of electric injury are provided.

Keywords: refusals tree, electric injury, electric current, tension, isolation, electric arc.