

ЗАСТОСУВАННЯ РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОТРАВМАТИЗМУ НА МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Запорізька державна інженерна академія

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

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

Електротравматизм відрізняється від інших видів травмування низкою особливостей:

- небезпека поразки електричним струмом збільшується тим, що робітник не може виявити наявності напруги дистанційно без спеціальних пристроїв;
- частка електротравм у загальному виробничому травматизмі відносно мала – 0,5...1,5 %, але у травматизмі із смертельними наслідками сягає 40 %;
- різке погіршення стану здоров'я потерпілого від електричного удару може спостерігатися через декілька годин, а іноді днів після нещасного випадку;
- електричний струм справляє на організм різноманітний вплив (розрізняють термічну, електролітичну, механічну та біологічну дію струму) і спричинює різні види травм: електричний удар, опік (контактний чи дуговий), електричний знак, металізацію шкіри, електрофтальмію, механічні пошкодження;
- на сьогоднішній день вважають, що немає абсолютно безпечної напруги та сили струму [1]; є випадки смеральної поразки від напруг менших ніж 12 В; з іншого боку, іноді потерпілий виживає після дії напруги 60 кВ і вище.

Як видно з вищезазначеного, електричні травми є дуже небезпечними та захист від них, враховуючи повсюдне використання електричного струму у металургії, є актуальним. Для ефективного захисту треба мати точний і досконалий аналіз причин електротравм.

Вже більше двадцяти років у розвинутих країнах під час прийняття рішень використовують різні методи розрахунку 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, а також для управління багатьма видами ризику в основних життєвих контекстах.

Досвід розвинутих країн та практика забезпечення безпеки високих технологій (ядерна енергетика, авіація) екстраполювали й перенесли 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, незважаючи на галузеве різноманіття мають однакові теоретичний базис виникнення та логіку розвитку подій. Використання оцінки ризику під час забезпечення безпеки було засвоєно на протязі декількох десятиріч і доведено їх вигоду для різних сфер застосування. Методологію ризик-орієнтованого підходу

(РОП) застосовують як у стратегічному плануванні, так і під час повсякденної оперативної діяльності.

Постановка завдання. Виходячи з вищенаведеного було поставлене завдання проаналізувати виробничий електротравматизм у металургійному комплексі України на основі РОП.

Основна частина. До основи аналізу небезпеки із застосуванням РОП покладено побудову дерева відмов. Дерево відмов (ДВ) є графічною моделлю різних паралельних і послідовних сполучень базисних подій, які ведуть до реалізації заздалегідь визначеної небажаної події.

Використовуючи статистичні дані [1-6], побудовано дерево відмов (ДВ), де верхньою, небажаною подією є поразка робітника 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 працівника 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-T} – можливість однофазного дотику робітника до відкритих струмоведучих частин;
 - A_{1-T} – 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 приймали значення ймовірності базисних подій, що наведені у табл. 1.

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

Значення ймовірностей базисних подій вводили до програми "IRRAS". Розрахунки, виконані 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 $(0,5...1,5) \cdot 10^{-5}$.

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 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}	$0,5 \cdot 10^{-6}$	5
5	A_{12}, A_{14}	$0,5 \cdot 10^{-6}$	5
6	A_{12}, A_{15}	$0,2 \cdot 10^{-6}$	2
7	A_1, A_2, A_3	$0,2 \cdot 10^{-6}$	2
8	A_{16}, A_{17}, A_{18}	$0,2 \cdot 10^{-6}$	2
9	A_{19}, A_{20}	$0,1 \cdot 10^{-6}$	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 , що 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 неспрацьовування апаратів захисту (A_{11}). Інші події цього перетину мають високу ймовірність.

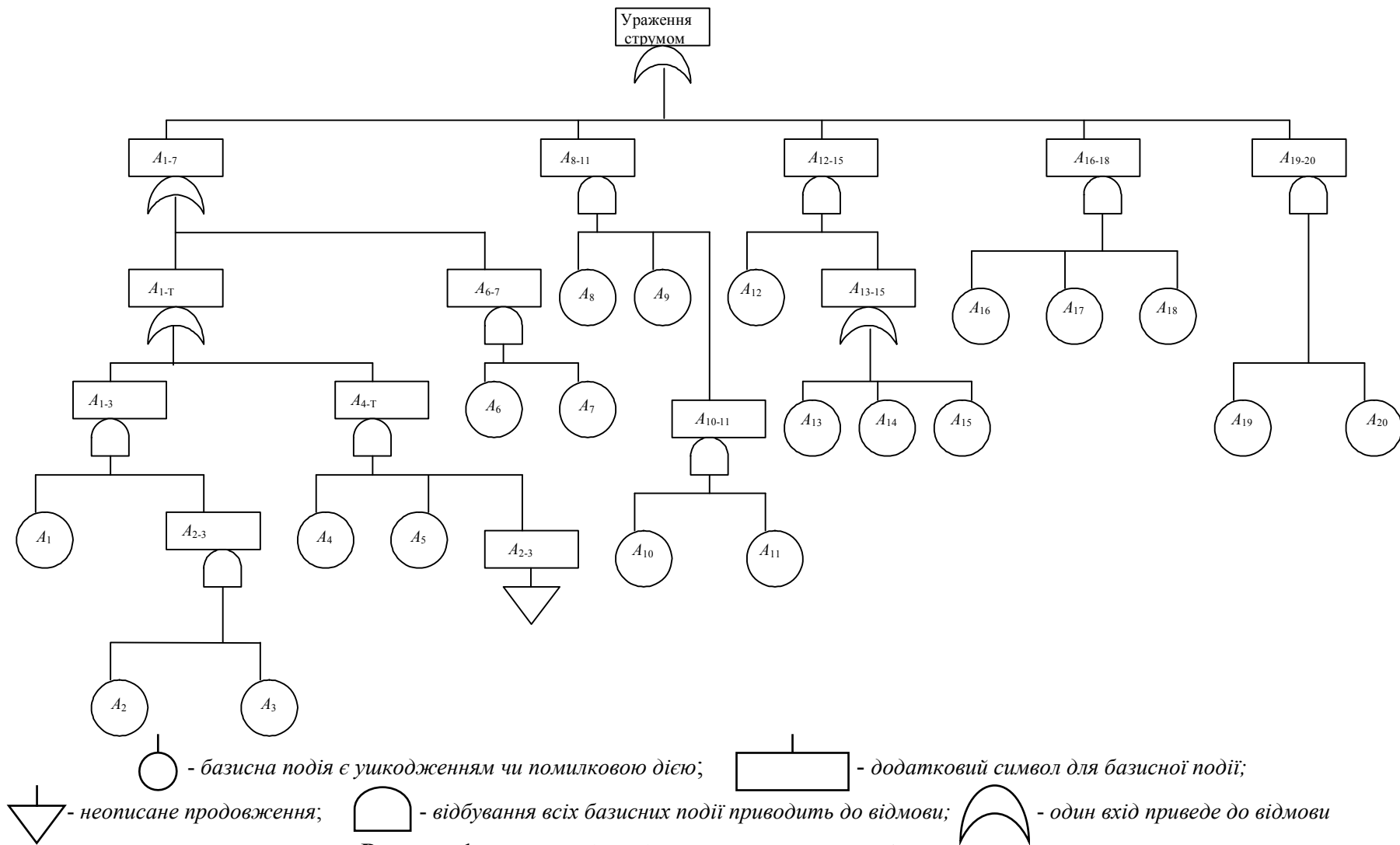


Рисунок 1 – Дерево відмов для аналізу ураження робітника струмом

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

Подія	Показники значимості					
	<i>RRI</i>	<i>RRR</i>	<i>RII</i>	<i>RIR</i>	<i>B</i>	<i>FV</i>
A_7	$4,0 \cdot 10^{-6}$	1,67	$9,5 \cdot 10^{-2}$	95000	$9,5 \cdot 10^{-2}$	0,40
A_{11}	$2,5 \cdot 10^{-6}$	1,33	$8,1 \cdot 10^{-2}$	8100	$8,0 \cdot 10^{-2}$	0,25
A_{13}	$5,0 \cdot 10^{-7}$	1,05	$1,0 \cdot 10^{-2}$	1000	$1,0 \cdot 10^{-2}$	0,05
A_{14}	$5,0 \cdot 10^{-7}$	1,05	$1,0 \cdot 10^{-2}$	1000	$1,0 \cdot 10^{-2}$	0,05
A_{15}	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1,02	$1,0 \cdot 10^{-2}$	1000	$1,0 \cdot 10^{-2}$	0,02
A_{19}	$1,0 \cdot 10^{-7}$	1,01	$1,0 \cdot 10^{-2}$	1000	$1,0 \cdot 10^{-2}$	0,01
A_2	$1,8 \cdot 10^{-6}$	1,22	$9,0 \cdot 10^{-4}$	90,8	$9,0 \cdot 10^{-4}$	0,18
A_1	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1,02	$2,0 \cdot 10^{-4}$	21,0	$2,0 \cdot 10^{-4}$	0,02
A_{17}	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1,02	$2,0 \cdot 10^{-4}$	21,0	$2,0 \cdot 10^{-4}$	0,02
A_4	$1,8 \cdot 10^{-6}$	1,22	$1,8 \cdot 10^{-4}$	18,80	$1,8 \cdot 10^{-4}$	0,18
A_2	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1,02	$1,0 \cdot 10^{-4}$	11,0	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,02
A_{16}	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1,02	$1,0 \cdot 10^{-4}$	11,0	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,02
A_{12}	$1,2 \cdot 10^{-6}$	1,14	$3,3 \cdot 10^{-5}$	4,33	$3,4 \cdot 10^{-5}$	0,12
A_{10}	$2,5 \cdot 10^{-6}$	1,33	$2,2 \cdot 10^{-5}$	3,25	$2,5 \cdot 10^{-5}$	0,25
A_3	$1,8 \cdot 10^{-6}$	1,22	$1,6 \cdot 10^{-5}$	2,62	$1,8 \cdot 10^{-5}$	0,18
A_{20}	$1,0 \cdot 10^{-7}$	1,01	$2,0 \cdot 10^{-5}$	2,00	$1,0 \cdot 10^{-5}$	0,01
A_6	$4,0 \cdot 10^{-6}$	1,67	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1,02	$9,6 \cdot 10^{-6}$	0,40
A_8	$2,5 \cdot 10^{-6}$	1,33	$2,8 \cdot 10^{-7}$	1,03	$2,8 \cdot 10^{-6}$	0,25
A_9	$2,5 \cdot 10^{-6}$	1,33	$2,8 \cdot 10^{-7}$	1,03	$2,8 \cdot 10^{-6}$	0,25
A_3	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1,02	$1,8 \cdot 10^{-6}$	1,18	$2,0 \cdot 10^{-6}$	0,02
A_{18}	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1,02	$1,8 \cdot 10^{-6}$	1,18	$2,0 \cdot 10^{-6}$	0,02
A_5	$1,8 \cdot 10^{-6}$	1,22	$2,0 \cdot 10^{-7}$	1,02	$2,0 \cdot 10^{-6}$	0,18

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 використовують 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 щодо ймовірності події X :

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

У програмі «IRRAS» показник значимості Бирнбаума події X визначають також через нижченаведені коефіцієнти й інтервали змінювання ризику: RRR , RIR – відповідно коефіцієнти зменшення та збільшення ризику; RRI , RIR – відповідно інтервали 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 працівника 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 вико-нання ремонтних робіт на струмоведучих частинах (A_7), та неспрацьовування чи відсутність захисту у випадку ураження робітника при дотику до неструмоведучих частин, які випадково опинилися під напругою (A_{11}). Інші базисні події мають значно меншу важливість.

Аналіз результатів розрахунків дозволяє зробити такі висновки:

1. Загальний ризик (ймовірність) ураження струмом на виробництві на протязі року складає близько 10^{-5} . Враховуючи велику смертність елетротравм, такий ризик слід вважати високим.

2. 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 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). Це зрозуміло, тому що зазначені базисні події є дуже небезпечними – вони з високою ймовірністю ведуть до ураження струмом.

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, за дотриманням системи нарядів-допусків, за проведенням інструктажів. Як технічний захід можна запропонувати блокування апаратів вмикання струму під час проведення 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) [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 неспрацьовування захисного заземлення такою, що дорівнює $P_z = 3 \cdot 10^{-5}$ [8], а ймовірність неспрацьовування захисного відключення трохи більшою (тому що система УЗВ складніша та має більшу кількість елементів), $P_e = 10^{-4}$. Тоді загальна ймовірність неспрацьовування захисту $P_{\Sigma} = P_z \cdot P_e = 3 \cdot 10^{-9}$. Це є нехтовно малим 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 %.

Заключення. Застосовано ризик-орієнтований підхід до електротравматизму в металургійній галузі. Побудовано ДВ для випадку електротравми. Результати аналізу ДВ дають можливість розробити рекомендації щодо зниження рівню електротравматизму в металургії.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Долин П. А. Основы техники безопасности в электроустановках / П. А. Долин. – М.: Энергоиздат, 1984. – С. 448.
2. Оперативные данные о состоянии производственного травматизма за 2008 г. по сравнению с 2007 г. // Охрана труда. – 2009. – № 2. – С. 6.

3. Оперативные данные о состоянии производственного травматизма за 2007 г. по сравнению с 2006 г. // Охрана труда. – 2008. – № 3. – С. 51.
4. Лубянова И. В. О диагностике профессиональной заболеваемости в Украине / И. В. Лубянова // Охрана труда. – 2005. – № 5. – С. 39-40.
5. Манойлов В. Е. Основы электробезопасности / В. Е. Манойлов. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 384 с.
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.

Стаття надійшла до редакції 02.12.2010 р.
Рецензент, проф. В.І. Сокольник