

УДК 622.628

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241120.111.705

## РОЛЬ ТА РІВЕНЬ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ЗАХИСНОГО ВИМКНЕННЯ НАПРУГИ У ЗНИЖЕННІ РИЗИКУ ЕЛЕКТРОТРАВМУВАННЯ ЛЮДЕЙ

КОЛОСЮК В. П.<sup>1\*</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
ЧЕБЕНКО В. М.<sup>2</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
КОЛОСЮК А. В.<sup>3</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,  
БРЕДУН Ю. М.<sup>4</sup>, *асист.*

<sup>1\*</sup> Кафедра охорони праці, цивільної та промислової безпеки, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Першотравнева, 20, 39600, Кременчук, Україна, e-mail: [bgd@kdu.edu.ua](mailto:bgd@kdu.edu.ua)

<sup>2</sup> Кафедра технології машинобудування, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Першотравнева, 20, 39600, Кременчук, Україна, e-mail: [bgd@kdu.edu.ua](mailto:bgd@kdu.edu.ua)

<sup>3</sup> Кафедра прикладної екології, хімії та охорони праці, Донбаська національна академія будівництва та архітектури, вул. Героїв Небесної Сотні, 14, 84333, Краматорськ, Україна, e-mail: [wwhale@rambler.ru](mailto:wwhale@rambler.ru)

<sup>4</sup> Кафедра охорони праці, цивільної та промислової безпеки, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Першотравнева, 20, 39600, Кременчук, Україна, e-mail: [bgd@kdu.edu.ua](mailto:bgd@kdu.edu.ua)

**Анотація.** *Постановка проблеми.* Захисне вимкнення електроенергії застосовується як засіб безпеки в електроустановках. Завдяки вимкненню напруги за достатньо короткий час людина, що випадково попала під напругу, знеструмлюється і, як показує досвід, залишається живою, не отримуючи небезпечних ушкоджень [1]. Захисне вимкнення здійснюється апаратурою захисту від витоків струму, яка регламентується Правилами безпеки вугільних шахт та правилами безпеки інших галузей, що ведуть підземні роботи і застосовують систему електропостачання з ізолюваною нейтраллю. Але апаратура може не діяти у результаті відмови її конструктивних елементів, особливо елементів електричної схеми, тобто недостатньої надійності приладів. Практичний досвід свідчить, що всі смертельні випадки ураження струмом, які щорічно відбуваються у шахтах, виникають за недіючої системи захисного вимкнення, але в літературних джерелах ці питання та роль надійності висвітлені недостатньо. **Мета статті** полягає в розкритті умов зменшення ризику електроураження шляхом застосування системи захисного вимкнення напруги в системі електропостачання та в обґрунтуванні рекомендації щодо припустимого рівня її надійності для зниження ризику ураження струмом. **Висновок.** Доцільно розглянути логікоматематичну схему формування електротравми як «дерева відмов» електрозахисних засобів у системі електропостачання споживачів з ізолюваною нейтраллю живильного трансформатора; обґрунтувати математичну модель електротравми та встановити зв'язок імовірності ураження струмом з імовірністю безвідмовної роботи системи захисного вимкнення напруги; розкрити значення надійності захисного вимкнення напруги у зниженні ймовірності ураження електрострумом та обґрунтувати формулу для визначення необхідного рівня надійності апаратури захисного вимкнення залежно від припустимого ризику електротравмування.

**Ключові слова:** *ризик; захисне вимкнення; ізоляція; струм витoku; ймовірність події; надійність*

## РОЛЬ И УРОВЕНЬ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМИ ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СНИЖЕНИИ РИСКА ЭЛЕКТРОТРАВМИРОВАНИЯ ЛЮДЕЙ

КОЛОСЮК В. П.<sup>1\*</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
ЧЕБЕНКО В. Н.<sup>2</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
КОЛОСЮК А. В.<sup>3</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,  
БРЕДУН Ю. Н.<sup>4</sup>, *асист.*

<sup>1\*</sup> Кафедра охраны труда, гражданской и промышленной безопасности, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, ул. Первомайская, 20, 39600, Кременчуг, Украина, e-mail: [bgd@kdu.edu.ua](mailto:bgd@kdu.edu.ua)

<sup>2</sup> Кафедра технологии машиностроения, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, ул. Первомайская, 20, 39600, Кременчуг, Украина, e-mail: [bgd@kdu.edu.ua](mailto:bgd@kdu.edu.ua)

<sup>3</sup> Кафедра прикладной экологии, химии и охраны труда, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ул. Героев Небесной Сотни, 14, 84333, Краматорск, Украина, e-mail: [andrii\\_vladimirovich@ukr.net](mailto:andrii_vladimirovich@ukr.net)

<sup>4</sup> Кафедра охраны труда, гражданской и промышленной безопасности, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, ул. Первомайская, 20, 39600, Кременчуг, Украина, e-mail: [bgd@kdu.edu.ua](mailto:bgd@kdu.edu.ua)

**Аннотация. Постановка проблемы.** Защитное отключение электроэнергии применяется как средство безопасности в электроустановках. Благодаря отключению напряжения за достаточно короткое время человек, который случайно попал под напряжение, обесточивается и, как показывает опыт, остается живым, не получая опасных повреждений [1]. Защитное отключение осуществляется аппаратурой защиты от утечек тока, которая регламентируется Правилами безопасности угольных шахт и правилами безопасности других отраслей, ведущих подземные работы и применяющих систему электроснабжения с изолированной нейтралью. Но аппаратура может не действовать в результате отказов ее конструктивных элементов, особенно элементов электрической схемы, т. е. недостаточной надежности приборов. Практический опыт свидетельствует, что все смертельные случаи поражения током, которые происходят в шахтах, возникают при недействующей системе защитного отключения, но в литературных источниках эти вопросы и роль надежности освещены недостаточно. **Цель статьи** состоит в раскрытии условий снижения риска электротравмирования путем применения защитного отключения напряжения в системе электроснабжения и в обосновании рекомендации относительно допустимого уровня ее надежности для снижения риска электротравмирования. **Вывод.** Целесообразно рассмотреть логико-математическую схему формирования электротравмы как «дерева отказов» электрозащитных средств в системе электроснабжения потребителей с изолированной нейтралью питающего трансформатора; обосновать математическую модель электротравмы и установить связь вероятности безотказной работы системы защитного отключения напряжения; раскрыть значение надежности защитного отключения напряжения в снижении вероятности поражения и обосновать формулу для определения необходимого уровня надежности аппаратуры защитного отключения в зависимости от допустимого риска электротравмирования.

**Ключевые слова:** *риск; защитное отключение; изоляция; ток утечки; вероятность событий; надежность*

## JUSTIFICATION OF THE ROLE AND RELIABILITY OF SYSTEMS OF PROTECTIVE DISCONNECTION OF VOLTAGE TO DETERMINE THE ACCEPTED RISK OF ELECTRIC INJURY

KOLOSUK V.P.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
CHEBENKO V.M.<sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
KOLOSUK A.V.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,  
BREDUN Yu.M.<sup>4</sup>, *Assist.*

<sup>1</sup> Life Safety department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20, Pershotravneva Str., 39600, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: [bgd@kdu.edu.ua](mailto:bgd@kdu.edu.ua)

<sup>2</sup> Manufacturing engineering department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20, Pershotravneva Str., 39600, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: [bgd@kdu.edu.ua](mailto:bgd@kdu.edu.ua)

<sup>3</sup> Department of Applied Ecology, Chemistry and Labor Protection, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, 14, Heroyiv Nebesnoyi Sotni Str., 84333, Kramatorsk, Ukraine, e-mail: [wwhale@rambler.ru](mailto:wwhale@rambler.ru)

<sup>4</sup> Life Safety department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20, Pershotravneva Str., 39600, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: [bgd@kdu.edu.ua](mailto:bgd@kdu.edu.ua)

**Annotation. Formulation of the problem.** Protective blackout is used as a means of electrical safety in electrical installations. By disconnecting the voltage for a sufficiently short time, a person who accidentally comes under voltage is de-energized and, as experience shows, remains alive without receiving dangerous injuries [1]. Protective shutdown is carried out by current leakage protection equipment, which is regulated by the Coal Mine Safety Rules and the safety rules of other galleys that conduct underground work and use an electrical power supply system with isolated neutral. But the equipment may not operate as a result of failures of its structural elements, especially elements of the electrical circuit, i.e. insufficient reliability of the equipment. Practical experience suggests that all deaths from electric shocks that occur annually in mines arise with an inactive protective shutdown system, but in literature these issues and the role of reliability are not adequately addressed. **The purpose** of the article is to disclose the conditions for reducing the risk of electrical injuries by applying protective voltage isolation in the power supply system and to justify recommendations on the acceptable level of its reliability to reduce the risk of electrical injuries. **Conclusion.** It is advisable to consider the logical-mathematical diagram of the formation of electrical injury as a “tree” of failures of electrical protective equipment in the power supply system of consumers with an isolated neutral of the supply transformer. To substantiate the mathematical model of electric trauma and to establish a relationship between the probability of failure-free operation of the system of protective shutdown Reveal the value of the reliability of

protective shutdown of voltage in reducing the likelihood of damage and substantiate the formula for determining the necessary level of reliability of protective shutdown equipment, depending on the permissible risk of electrical injury.

**Keywords:** *risk; protective blackout; isolation; current leakage; probability; event; reliable*

**Постановка проблеми.** Безпека праці – один із важливих конституційних пріоритетів життєдіяльності людей. До небезпечних чинників як виробництв, так і побуту належить електрика, про що свідчать випадки ураження людей електрострумом, що відбуваються щорічно як в Україні, так і в інших країнах через порушення вимог електробезпеки під час експлуатації електроустановок. Тому удосконалення заходів та засобів електробезпеки стало актуальною сучасною проблемою. Завдання полягає в обґрунтуванні і практичній реалізації заходів та засобів попередження або зниження до припустимого рівня небезпеки уражень людей електрострумом під час експлуатації системи електропостачання споживачів та електрообладнання в особливо небезпечних умовах з ізольованою нейтраллю живильного трансформатора.

**Аналіз публікацій.** Теорія та практика електробезпеки достатньо повно розглянуті у літературних джерелах, наприклад [1–8; 12]. Електричні критерії безпеки розглянуті у ГОСТ12.1.038-82 та у Звіті міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) [6; 7], а вимоги до апаратури захисту від витоків струму викладені у ГОСТ 22929-78 [6]. У статтях [8–10] розглянуто питання ризику у зв'язку з проблемами охорони праці та використанням методології матричного ризик-орієнтованого підходу до виробничої безпеки. Але зв'язок указаних праць та електричних критеріїв з імовірністю ураження висвітлені недостатньо. Тому наше дослідження присвячене цим питанням, вважається актуальним і важливим.

**Мета статті** – обґрунтування на основі ймовірнісних моделей випадків ураження електрострумом та розкриття зв'язку ризику електротравми з параметрами надійності функціонування системи захисного вимкнення напруги як важливого засобу забезпечення електробезпеки.

**Результати дослідження.** Ідею захисного вимкнення розглянемо за публікаціями [1; 12]. Для реалізації ідеї захисного вимкнення у системі електропостачання передбачається загальний вимикач та апарат контролю ізоляції з джерелом постійного струму.

За нормального стану споживач (наприклад, електродвигун) живиться від трифазної мережі.

У разі пошкодження ізоляції (зниження опору фаз відносно землі) вимикач знеструмлює мережу, здійснюючи захисне вимкнення напруги.

Подію «ураження струмом» можна представити як збіг у часі та просторі небезпечних станів 1–10 (рис.):

1. Електроустановка перебуває під напругою з імовірністю  $Q_1$ .

2. Людина несподівано торкається струмопровідної частини з імовірністю  $Q_2$ .

3. У процесі експлуатації виникають однофазні замикання на корпус з ймовірністю  $Q_3$ .

4. У процесі експлуатації виникають відмови функціонування заземлення з ймовірністю  $Q_4$ .

5. Із часом опір ізоляції електричної мережі знижується до небезпечної величини з ймовірністю  $Q_5$ .

6. Із часом опір тіла людини знижується до небезпечної величини з ймовірністю  $Q_6$ .

7. У процесі роботи виникають доторкання людей до струмопровідних частин з ймовірністю  $Q_7$ .

8. У процесі експлуатації виникають замикання на корпус двох різних фаз з ймовірністю  $Q_8$ ;

9. У процесі роботи виникають відмови захисту від струмів короткого замикання з ймовірністю  $Q_9$ .

10. У процесі експлуатації виникають відмови захисного знеструмлення з ймовірністю  $Q_{10}$ .

Умовне позначення  $\Pi$  показує логічну операцію «і – і», що підраховується за теоремою множення ймовірностей для

групи послідовних подій. Умовне позначення  $U$  показує логічну операцію «або – або», що підраховується за теоремою складання (додавання) ймовірностей для групи альтернативних (паралельних) подій.

Підкреслимо, що всі ймовірності являють собою функції часу, а виникнення небезпечних станів, як і подій ураження струмом, можна уявляти як потік подій, що слідує одна за одною і підпорядковуються закону Пуассона. Тому для визначення ймовірностей таких подій використовуємо формулу (1) [1]:

$$Q(\Delta t) \approx \lambda \Delta t, \quad (1)$$

де  $\Delta t$  – елементарна ділянка часу, на якій розглядається процес;  $\lambda$  – інтенсивність потоку подій, тобто середня кількість подій, що з'явилися на елементарній ділянці часу.

У разі відсутності захисного вимкнення всі небезпечні події та стани вважаються незалежними, тому їх імовірності не залежать одна від одної. Але за наявності захисного вимкнення деякі ймовірності мають інше значення, ніж за його відсутності. Так, якщо захисне вимкнення реагує на опір ізоляції мережі, то ймовірності замикань на корпус і низького опору ізоляції будуть менші аналогічних імовірностей у разі, коли захисне вимкнення не застосовується або не діє. Тому такі ймовірності у разі застосування захисного вимкнення відповідно позначимо:  $Q_3'$ ,  $Q_8'$ ,  $Q_5'$  та будемо вважати залежними від імовірності відмови  $Q_{10}$ . З урахуванням викладеного, модель події «ураження струмом» можна зобразити у вигляді «дерева відмов» (рис.) [11].

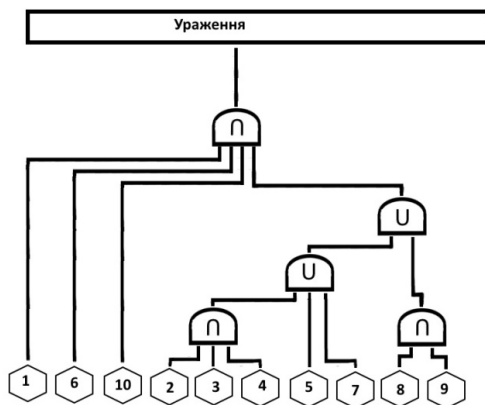


Рис. 1. Структурна модель формування уражень електрострумом

Для побудови математичних моделей ураження електрострумом врахуємо, що загальна ймовірність групи подій, послідовно наступних у схемі одна за іншою (логічна операція «і» – умовне позначення  $\cap$ ) і підраховується за теоремою множення ймовірностей, а загальна ймовірність групи подій, паралельних у схемі дерева (логічна операція «або» – умовне позначення  $U$ ) – за теоремою складання (додавання) ймовірностей.

У відповідності з викладеним, виконавши математичні перетворення, отримаємо математичну ймовірнісну модель ураження електрострумом для електроустановки без захисного вимкнення:

$$Q_{\Pi} = Q_1 Q_2 \{1 - (1 - Q_5 Q_7) \{1 - Q_2 Q_3 [1 - (1 - Q_4 Q_5) (1 - Q_8 Q_9)]\}\}. \quad (2)$$

$$Q_3' = Q_3 Q_{10}; Q_5' = Q_5 Q_{10}; Q_8' = Q_8 Q_{10}. \quad (3)$$

Тоді ймовірнісна математична модель ураження електрострумом буде:

$$Q_{\Pi}' = Q_1 Q_2 Q_{10} \{1 - (1 - Q_5 Q_7 Q_{10} \{1 - Q_2 Q_3 Q_{10}' [1 - (1 - Q_5 Q_4 Q_{10}) (1 - Q_8 Q_9 Q_{10})]\}\}\}. \quad (4)$$

Як відомо, захисне заземлення попереджає ураження струмом у разі дотику людини до корпусу електрообладнання, якщо на ньому з'явилась напруга у результаті пошкодження ізоляції; захисна дія ізоляції струмопровідних частин попереджає виникнення струму витoku у випадку її пошкодження і тому попереджає ураження струмом при дотику як до струмопровідної частини, так і до корпусу, а система захисного вимкнення вимикає напругу в разі пошкодження ізоляції і дотику людини до струмопровідної частини.

Перехід від імовірностей відмов до ймовірностей безвідмовної роботи здійснюється за виразами:

$$Q_{10} = 1 - P_{10}; Q_4 = 1 - P_4; Q_5 = 1 - P_5; Q_9 = 1 - P_9, \quad (5)$$

де  $P_{10}$ ,  $P_4$ ,  $P_5$ ,  $P_9$  – ймовірності безвідмовної роботи відповідно захисного вимкнення, заземлення, ізоляції, захисту від струмів короткого замикання.

Доцільно також використати статистичні дані про параметри небезпечних станів систем електропостачання вугільної дільниці, отримані свого часу на шахтах

шляхом безперервних спостережень протягом 7,5 місяця (табл. 1) [5].

За отриманими даними захисне вимкнення забезпечує зниження ймовірності ураження струмом з  $0,416 \cdot 10^{-2}$  до  $9,6 \cdot 10^{-4}$ , а з

урахуванням інших засобів захисту – з  $6,37 \cdot 10^{-2}$  до  $1,6 \cdot 10^{-4}$  (табл. 2), тобто приблизно у 400 разів.

Таблиця 1

Статистичні дані небезпечних станів системи електропостачання

Номер	Найменування стану	Середній час між виникненням небезпечного стану, год	Середній час існування небезпечного стану, год	Ймовірність небезпечного стану
1	Доторкання людини до корпусу обладнання	0,28	0,364	0,338
2	Однофазне замикання на землю або корпус	2 692,75	40,170	0,166
3	Відмова заземлення	2 980,00	446,000	0,020
4	Пошкодження ізоляції	1 555,63	142,440	0,166
5	Доторкання людини до струмопровідних частин	1 621,00	0,873	0,380
6	Однофазні парні замикання на землю	–	–	0
7	Відмова захисту від струмів коротких замикань	2 352,00	150,00	0,060
8	Відмова захисного вимкнення	244,00	1,250	0,050

Таблиця 2

Зниження ймовірності ураження струмом у разі застосування засобів захисту

Засоби захисту від уражень електрострумом	Ймовірність ураження струмом, $Q_{\Pi}$	Кратність зниження ймовірності ураження $n = Q_{\Pi} / Q_{\Pi}'$
Захисне вимкання без захисної дії заземлення, ізоляції і захисту від струмів коротких замикань;	$9,6 \cdot 10^{-4}$	430
Захисне вимкання з урахуванням заземлення, ізоляції і захисту від струмів коротких замикань;	$1,58 \cdot 10^{-4}$	403
<i>Електрична ізоляція мережі електропостачання:</i>		
– без урахування захисного вимкання, заземлення і захисту від струмів коротких замикань;	$3 \cdot 10^{-2}$	13,8
– без урахування захисного вимкання, але з урахуванням заземлення і захисту від струмів коротких замикань.	$1,95 \cdot 10^{-2}$	19,5
<i>Захисне заземлення:</i>		
– без урахування захисного вимкання, ізоляції і захисту від струмів коротких замикань;	$3,8 \cdot 10^{-1}$	1,1
– з урахуванням ізоляції і захисту від струмів коротких замикань, але без урахування захисного вимкнення.	$6,39 \cdot 10^{-1}$	1,13
<i>Захист від струмів коротких замикань:</i>		
– без врахування захисного вимкання, заземлення та ізоляції;	$4,15 \cdot 10^{-1}$	1,0
– з урахуванням заземлення та ізоляції, але без урахування захисного вимкнення.	$6,37 \cdot 10^{-2}$	1,13

Результати більш детального вивчення за однакової ймовірності їх безвідмовної роботи, рівної ймовірності безвідмовної роботи захисного вимкнення  $P_{10} = 0,95$ , наведені у таблиці 3.

Аналіз залежностей  $Q_{\Pi}' = f(Q_{10})$  або  $Q_{\Pi}' = f(1-P_{10})^2$  свідчить, що вони з

достатньою для практики точністю можуть бути представлені формулами:

$$Q_{\Pi}' = Q_{\Pi} Q_{10}^2 \text{ або } Q_{\Pi}' = Q_{\Pi} (1 - P_{10})^2. \quad (6)$$

У відповідності з формулою (6) можна визначити кратність зниження ймовірності ураження електрострумом за наявності

захисного вимкнення у системі електропостачання споживачів:

$$n = Q_{П} / Q_{П'} = 1 / (1 - P_{10})^2. \quad (7)$$

Чим більша надійність захисного вимкнення, тим у більше разів зменшується ймовірність ураження струмом, тобто зменшується ризик електроураження людей (табл. 3).

Таблиця 3

**Зменшення ризику ураження струмом залежно від надійності захисного вимкнення**

Кратність зниження ймовірності ураження електрострумом	Ймовірність безвідмовної роботи захисного вимкнення						
	0	0,5	0,834	0,9	0,95	0,98	0,99
За рахунок захисного вимкнення без урахування заземлення, ізоляції і захисту від струмів коротких замикань	1	4,025	36,6	101	403,2	2572,7	10 011
За рахунок захисного вимкнення з урахуванням заземлення, ізоляції і захисту від струмів коротких замикань	1	4,1	38,8	107,8	433,5	2712,4	10892

Для практичного використання кратність зниження ризику можна визначати за спрощеною формулою (8), виходячи тільки з фактичної ймовірності безвідмовної роботи системи захисного вимкнення:

$$P_{10} = 1 - \sqrt{Q'_{П.Т} / Q_{П.Т}}, \quad (8)$$

де  $Q'_{П.Т}$  і  $Q_{П.Т}$  – ймовірності ураження струмом у разі дотику до струмопровідних частин відповідно за застосування захисного вимкнення та його відсутності або відмови.

Практична реалізація заходів безпеки має зводитись до забезпечення зниження ймовірності ураження струмом не вище нормованої або припустимої величини  $Q_H$ , що встановлюється стандартами або іншими нормативами з безпеки праці. Тому приймемо  $Q'_{п.т} = Q_H$  та маємо:

$$P_{10} = 1 - \sqrt{Q_H / Q_{П.Т}}. \quad (9)$$

Якщо дотик до струмопровідної частини, що перебувають під напругою, розглядати не як нормальний, а як аварійний режим обслуговування, то для такого режиму можна припустити  $Q_H = 10^{-3}$  [5]. Це відповідає тому, що людина у разі її дотику до струмопровідної частини не буде уражена струмом з ймовірністю  $P_{Н.Т} = 1 - 10^{-3} = 0,999$ . За таких умов ймовірність безвідмовної роботи захисного вимкнення має бути:

$$P_{10} = 1 - \sqrt{Q_{Н.Т} / Q_5}. \quad (10)$$

Це дозволяє за допустимого рівня ризику електроураження визначати

необхідний рівень надійності апаратури захисного вимкнення за показником ймовірності відмови ізоляції системи електропостачання  $Q_5$ . Необхідно врахувати, що, оскільки рівень ізоляції автоматично контролюється самою апаратурою захисного вимкнення і в разі пошкодження ізоляції напруга з мережі вимикається, то небезпечне існування відмови ізоляції може бути тільки у разі відмови захисного вимкнення. Тому є можливість під час розрахунків припустити, що ймовірність відмови ізоляції буде не вища ймовірності відмови апаратури захисного вимкнення:  $Q_5 \leq Q_{10}$ .

У разі фактичної ймовірності  $Q_5 = 0,166$  (табл. 1) маємо  $P_{10} = 0,922$ .

Таким чином, для гарантування електробезпеки у разі дотику людини до струмопровідної частини, що перебуває під напругою, ймовірність безвідмовної роботи захисного вимкнення має становити не менше 0,922.

На відміну від доторкання до струмопровідної частини, доторкання до корпусу, що потрапив під напругу, слід вважати нормальним режимом, тому що під час виконання технологічних операцій людина має керувати машинами та обладнанням і тому може торкатись корпусних металевих частин. Для нормального режиму роботи ймовірність ураження струмом, яке може відбутись у разі замикання фази на корпус, має бути нижча, ніж для розглянутого аварійного режиму. За аналогією з ГОСТ 12.1.010–76

для цих умов доцільно прийняти припустиму ймовірність  $Q_H = 10^{-6}$  [5].

Це означає, що для гарантування електробезпеки у разі дотику до корпусу, на якому з'явилась напруга, ймовірність безвідмовної роботи апаратури захисного вимкнення залежить від імовірності безвідмовної роботи захисного заземлення. За наявними статистичними даними (табл. 1) для заземлення маємо:  $Q_4 = 0,02$  і  $P_4 = 0,98$ . Тому необхідна ймовірність захисного вимкнення має бути:  $P_{10} = 0,95$ . За такої надійності забезпечується електробезпека як у разі дотику до корпусу, що опинився під напругою, так і до струмопровідної частини електроустановки, яка нормально перебуває під напругою.

За відомої ймовірності безвідмовної роботи можна визначити такі показники надійності як інтенсивність потоку подій ( $\lambda$ ) та напрацювання на подію ( $T$ ), якщо відомий закон розподілу відмов. За стаціонарного пуассонівського потоку ймовірність небезпечної події (відмови)  $Q$  визначається за формулою (1), ймовірність безвідмовної роботи  $P$  як зворотна величина ймовірності небезпечної події (відмови) – за виразом  $P = 1 - Q$ ; інтенсивність подій  $\lambda = 1 / T$ , 1/ год, де  $T$  – напрацювання на відмову – середній термін у годинах між двома сусідніми подіями у потоці подій ( $T = 1 / \lambda$ , год).

### Висновки.

Доведено, що захисне вимкнення, контролюючи опір ізоляції електромережі відносно землі, попереджає перебування під напругою мережі з пошкодженою ізоляцією, однофазними та двофазними замиканнями на землю, а також протікання струму через тіло людини і небезпечних струмів витоку з мережі шляхом вчасного вимкнення напруги системою.

Показано, що за ймовірності безвідмовної роботи захисного вимкнення не менше 0,95 попереджається ураження струмом як у разі дотику людини до корпусу, що опинився під напругою, так і в разі випадкового дотику до струмопровідної частини електрообладнання.

На основі отриманих результатів рекомендується розробникам та виробникам апаратури захисного вимкнення конструктивно забезпечувати її ймовірність безвідмовної роботи не нижче 0,95 та зазначати про це у технічній і експлуатаційній документації виробів, а замовникам – у договорах на поставку вимагати від виробників декларування забезпечення такої надійності та реалізації її в обладнанні яке постачається.

Як метод підвищення ймовірності безвідмовної роботи пропонується планування і здійснення в ремонтну зміну періодичної перевірки і відновлення справності апаратури захисту від витоків струму.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Колосюк В. П. Защитное отключение рудничных электроустановок. Москва : Недра, 1980. 334 с.
2. Синчук О. Н., Ликаренко А. Г., Петриченко А. А., Шкрабец Ф. П. Аппаратурное решение проблем электробезопасности при эксплуатации участковых распределительных сетей железорудных шахт. *Горный журнал*. № 5 (2214). Москва, 2015. С. 77–83.
3. Долин П. А. Основы техники безопасности в электроустановках : учеб. пособ., 2-е изд. перераб. и доп. Москва : Энергоатомиздат, 1984. 448 с.
4. Колосюк В. П. Техника безопасности при эксплуатации рудничных электроустановок. Москва : Недра, 1987. 407 с.
5. Ткачук С. П., Колосюк В. П., Ихно С. А. Взрывопожаробезопасность горного оборудования : монография. Киев: «Основа», 2000. 695 с.
6. ГОСТ 22929. Аппараты защиты от токов утечки, рудничные, для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия. Москва : Госстандарт СССР, 1979. 17 с.
7. Технический отчет IEC 479 – 1. Действие тока на людей и домашний скот. Часть 1: Общие аспекты. IEC479-1. 1994. С. 09.
8. Булат А. Ф., Бунько Т. В., Кокаулин И. Е., Круковский А. П., Яценко И. А., Софийский К. К., Шейко А. В. Риск-ориентированный подход в охране труда и производственной безопасности в угольных шахтах : концепция, нормативная база, оценка и управление рисками. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Дніпро, 2018. 322 с. С. 313–321.

9. Парашенко И. И., Журавель В. С., Андриянов Ю. И., Корявка В. В. Определение величины риска на здоровье населения от шумовой нагрузки в центральной части г. Полтавы. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Днепро, 2018. С. 100–104.
10. Третьяков О. В., Шестеренко С. В., Доронин Е. В., Головенко Н. Н. Риск-ориентированный подход определения условий труда на рабочих местах. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Днепро, 2018. С. 131–138.
11. Колосюк В. П., Лисенко В. В. Зниження ризику електротравмування у системах електропостачання з ізольованою нейтраллю. *Науково-виробничий журнал*. Кременчук : Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2019. Вип. 2 (24). С. 87–98.
12. Патент на корисну модель № 34432. Пристрій для захисного вимкнення живлення передвижної машини. Бюл. № 15, 11.08.2008. С. 1–4.

## REFERENCES

1. Kolosyuk V. *Zashitnoe otklyuchenie rudnichnykh elektroustanovok* [Protective shutdown of mine electrical installations]. Moscow : Nedra Publ., 2018, 344 p. (in Russian)
2. Sinchuk O.N., Likarenko A.G., Petrichenko A.A. and Shkrabec F.P. *Apparaturnoye resheniye problem elektrobezopasnosti pri ekspluatatsii uchastkovykh raspredelitel'nykh setey zhelezorudnykh shakht* [Hardware solution of electrical safety problems during the operation of local distribution networks of iron ore mines]. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal]. Vol. 5 (2214), 2015, pp. 77–83. (in Russian)
3. Dolin P.A. *Osnovy tekhniki bezopasnosti v elektroustanovkakh* [Safety Basics in Electrical Installations]. Moscow : Energoatomizdat Publ., 1984. (in Russian)
4. Kolosyuk V. *Tekhnika bezopasnosti pri ekspluatatsii rudnichnykh elektroustanovok* [Safety during the operation of mine electrical installations]. Moscow : Nedra Publ., 1987, 407 p. (in Russian)
5. Tkachuk S., Kolosyuk V. and Ykhno S. (2000) *Vzryivopozharbezopasnost gornogo oborudovaniya* [Fire and explosion safety equipment]. Kyiv, 2000, 695 p. (in Russian)
6. *GOST 22929. Apparaty zashchity ot tokov utechki rudnichne dlya setey napryazhenim do 1200 V. Obshchiye Tenicheskiye usloviya* [Mine protection devices for leakage currents for networks up to 1 200 V. General specifications. GOST 22929; 78 (1979)]. Moscow : Gosstandart of the USSR, 1979, 17 p. (in Russian).
7. *Tekhnicheskyy otchet IEC 479-1. Deystviye toka na lyudey i domashniy skot. Chast' 1: Obshchiye aspekty. IEC479-1. Tret'ye izdaniye* [Technical report IEC 479-1. Current effects on people and livestock. Part 1: General Aspects. Third edition]. 1994, p. 09. (in Russian)
8. Bulat A.F., Bun'ko T.V., Kokaulin I.E., Krukovskiy A.P., Jashhenko I.A., Sofijskij K.K. and Shejko A.V. *Risk-oriyentirovanny podkhod v okhrane truda i proizvodstvennoy bezopasnosti v ugol'nykh shakhtakh: kontsepsiya, normativnaya baza, otsenka i upravleniya riskami* [Risk is an oriented approach to labor protection and industrial safety in coal mines: conceptual, regulatory framework, assessment and risk management]. *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Construction, materials science, mechanical engineering]. Dnipro, 2018, pp. 313–321. (in Russian)
9. Parashhenko I.I., Zhuravel' V.S., Andriyanov Ju.I. and Korjavka V.V. *Opredelenie velichiny riska na zdorov'e naseleniya ot shumovoy nagruzki v central'noj chasti g. Poltavy* [Determination of the risk to public health from noise load in the central part of Poltava]. *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Construction, materials science, mechanical engineering]. Dnipro, 2018, pp. 100–104. (in Russian)
10. Tret'kov O.V., Shesterenko S.V., Doronin E.V. and Golovenko N.N. (2018), *Risk-oriyentirovanny podkhod opredeleniya usloviy truda na rabochikh mestakh* [Risk is an oriented approach to determining working conditions in the workplace]. *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Construction, materials science, mechanical engineering]. Dnipro, 2018, pp. 131–138. (in Russian)
11. Kolosyuk V.P. and Lysenko V.V. *Znyzhennya ryzyku elektrotravmuvaniya u systemakh elektropostachannya z izol'ovanoyu neytrallyu* [Reducing the risk of electric shock in power supply systems with isolated neutral]. *Naukovy-vyrobnychyy zhurnal*. [Scientific and production journal]. Kremenchuk : Kremenchug National University named after Mykhailo Ostrogradsky, 2019, iss. 2 (24), pp. 87–98. (in Ukrainian)
12. *Patent na korysnu model' №34432. Prystriy dlya zakhysnoho vymknennya zhyvlennya peredvyzhnoyi mashyny* [Patent for utility model no. 34432. Device for protective power off of a mobile machine]. Bull. no. 5, 11.08. 2008, pp. 1–4. (in Ukrainian)

Надійшла до редакції 11.10.2020.