

ЗНИЖЕННЯ РИЗИКУ ЕЛЕКТРОТРАВМИ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

В. П. Колосюк, В. В. Лисенко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна.

Викладено методологію оцінки ефективності захисного вимкнення електроенергії у системі електропостачання споживачів з ізолюованою нейтраллю живильного трансформатора. Обґрунтовано послідовність виникнення електротравм у часі представляти пуассонівським потоком небезпечних подій, а самі події - ураження людей електрострумом визначати на основі «дерев відмов» з аналізом формування небезпеки як співпадіння у часі небезпечних станів електроустановки і людини за логічними принципами «і-і» та «або-або». Отримано математичні моделі ураження електрострумом для електроустановки без захисного вимкнення та з системою захисного вимкнення. Запропоновано ефективність захисного вимкнення електроенергії визначати за критеріям електробезпеки: ймовірності ураження людей електрострумом та кратності зниження такої ймовірності за рахунок захисної дії засобів електробезпеки. Показано пріоритетне значення захисного вимкнення напруги у зниженні ймовірності ураження електрострумом та кількості уражень у залежності від ймовірності безвідмовної роботи системи захисного вимкнення.

Ключові слова: електроустановка, захисне вимкнення, небезпечні події, небезпечні стани, дерево відмов, ймовірність події та стану.

СНИЖЕНИЕ РИСКА ЭЛЕКТРОТРАВМЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

В. П. Колосюк, В. В. Лысенко

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
Ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина.

Изложена методология оценки эффективности защитного отключения электроэнергии в системе электроснабжения потребителей с изолированной нейтралью питающего трансформатора. Обоснована последовательность возникновения електротравм во времени представлением пуассоновским потоком опасных событий, а сами события - поражения электротоком определять на основе «дерева отказов» с анализом формирования опасности как совпадения во времени опасных состояний электроустановки и человека по логическим принципам «и-и» и «или-или». Получены математические модели поражения электротоком для электроустановки без защитного отключения и с системой защитного отключения. Предложено эффективность защитного отключения электроэнергии определять по критериям электробезопасности: вероятности поражения электротоком и кратности снижения такой вероятности за счет защитного действия средств электробезопасности. Показано приоритетное значение защитного отключения напряжения в снижении вероятности поражения электротоком и ко-

ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

личества поражений в зависимости от безотказной работы системы защитного отключения.

Ключевые слова: електроустановка, захисне відключення, небезпечні події, небезпечні стани, дерево відмов, ймовірність події та стани.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Як свідчить досвід розслідування електротравм, небезпека ураження виникає тоді, коли у результаті пробію ізоляції корпуси електрообладнання попадають під напругу, а людина торкається їх (рис. 1, а), або коли людина при обслуговуванні чи ремонті безпосередньо торкається струмопровідних частин (рис. 1, б), що знаходяться під напругою, або що не дуже часто, у разі двофазного пробію ізоляції коли людина попадає під дію лінійної напруги (рис. 1, в) [1].

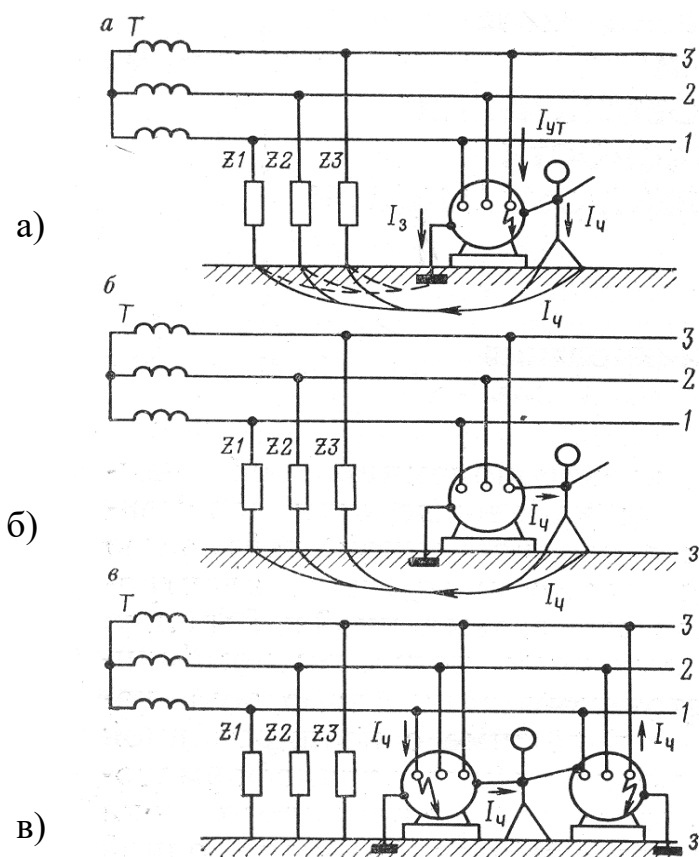


Рисунок 1 – Виникнення струму і небезпеки ураження струмом:

Т – вторинна обмотка живильного трансформатора;

Z_1, Z_2, Z_3 – опір ізоляції фаз мережі; $I_{уТ}, I_з, I_ч$ – струми відповідно витoku, через заземлення і тіло людини

У всіх приведених випадках тіло людини становиться елементом електричного кола і по тілу проходить струм, який призводить до негативної дії на органи людини і може привести до летального наслідку. Як відомо, ідея захисного вимкнення полягає у контролі опору ізоляції мережі відносно землі і коли опір, а ним може бути тіло людини, буде нижче мінімально допустимого, необхідно миттєво вимкнути напругу з мережі та таким чином знеструмити людину, попе-

ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

редивши небезпечні наслідки дії струму на організм, здійснюючи захисну дію. Теорія та практика захисного вимкнення достатньо повно розглянуті у літературних джерелах, наприклад [1, 2]. Електричні критерії безпеки розглянуті у ГОСТ 12.1.038-82 та у Звіті міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) [3, 4], а вимоги до апаратури захисту від витоків струму були викладені у ГОСТ 22929-78 [5]. Але зв'язок вказаних робіт та електричних критеріїв з ймовірністю ураження висвітлені недостатньо. Тому дійсна робота, що присвячена цим питанням, вважається актуальною і важливою.

Метою досліджень є обґрунтування ймовірнісних моделей ураження електрострумом як небезпечних подій та встановлення зв'язку ефективності захисного вимкнення електроенергії з параметрами надійності його функціонування.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Умовимося, що електроустановка складається з комутаційного апарату з захистом від струмів коротких замикань, електричного двигуна і електричних кабелів. Для реалізації ідеї захисного вимкнення у системі електропостачання (рис. 2) [6] передбачається загальний вимикач F та апарат контролю ізоляції з джерелом постійного струму G і релейним елементом вимкнення, що підключені до фаз мережі через фільтр Z_{ϕ} .

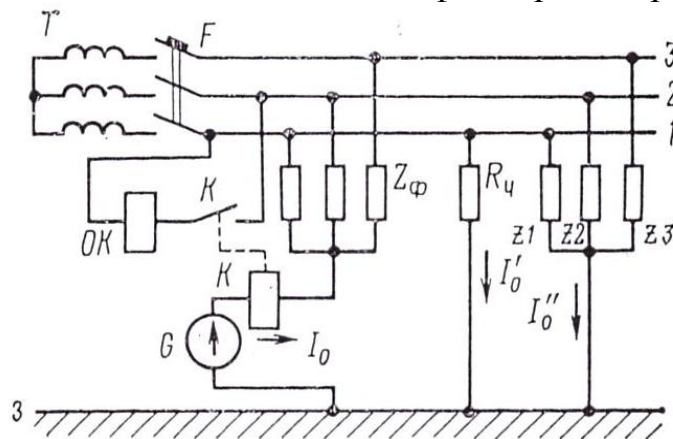


Рисунок 2 – Приклад схеми захисного вимкнення у мережі змінного струму

При низькому значенні опору контакт K розмикає коло котушки ОК вимикача F , який і знеструмлює мережу, здійснюючи захисне вимкнення.

У трифазній мережі змінного струму у процесі експлуатації (рис. 1) ураження людини електрострумом може бути у трьох випадках: у разі випадкового доторкання до струмопровідної частини, яка знаходиться під напругою, у разі доторкання до корпусу, на який виникло замикання фази на корпус або двох різних фаз на різні корпуси. Ураження струмом відбуваються несподівано, але їм як подіям передують ряд небезпечних обставин або станів, які теж можна розглядати як випадкові події:

- 1) електроустановка знаходиться під напругою з ймовірністю Q_1 ;
- 2) людина торкається струмопровідної частини з ймовірністю 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 ;

ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

- 5) з часом опір ізоляції електричної мережі знижується до небезпечної величини з ймовірністю Q_5 ;
- 6) з 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 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} .

Позначимо Q_{Π} – ймовірність ураження струмом при відсутності або не дії захисного вимкнення, а Q_{Π} – ймовірність ураження струмом при застосуванні діючого захисного вимкнення. Підкреслимо, що всі ймовірності є функціями часу, а виникнення небезпечних станів, як і подій ураження струмом у часовому виміру можна представляти потоками подій, що підпорядковуються закону Пуассона. Це обґрунтовується наступним.

Ураження струмом як подія є випадковим явищем. Виникнення небезпечних станів, що формують ураження струмом, теж можна вважати випадковими явищами і якщо розглядати їх появу на протязі великого відрізка часу, то можна впевнитись у тому, що небезпечні стани як і самі небезпечні події слідуєть одне за іншим у випадкові моменти часу, тому їх можна розглядати як потоки небезпечних станів і подій. Якщо небезпечні стани і події обозначити на відрізку часу, то можна впевнитися, що ймовірність попадання того чи іншого їх числа на відрізок часу залежить від довжини відрізка і не залежить від положення цього відрізка на осі часу. За великого часу потоки небезпечних станів та подій можна розглядати однорідними, тобто приймати, що густина потоку подій, чи так звана інтенсивність - середнє число подій на одиницю часу остається постійною.

Хоча потоки можуть мати у часі місцеві згущення і розрідження, важливо, що вони не носять закономірного характеру, а середнє число подій, що попадають на одиницю часу залишається постійним для всього розглядаємого періоду. Отже, у відповідності з [7]. Потоки небезпечних станів і небезпечних подій можна розглядати як стаціонарні.

Ураження електрострумом, а також небезпечні стани у потоках виникають у послідовні моменти часу незалежно один від одного, тобто для любых непересічних ділянок часу число подій або станів, які попадають на одну з ділянок, не залежить від числа подій, які попали на іншу. Це надає основу вважати потоки небезпечних подій та небезпечних станів потоками без післядії.

Аналіз електротравматизму показує також, що ураження електрострумом, як правило, не є груповими випадками, а ймовірність одночасного попадання на елементарну ділянку часу двох або більше випадків мала у порівнянні з ймовірністю попадання одного випадку. Ураження електрострумом, а також кожного з небезпечних станів, що призводять до ураження, у потоку подій приходять по-

ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

динці, а не парами трійками і т.п. Тому потоки небезпечних подій та небезпечних станів є одинарними.

У [7] показано, що якщо потік подій володіє усіма трьома властивостями - є стаціонарним, без післядії, ординарним, то він є простішим, або стаціонарним пуассонівським потоком.

Як відомо, для стаціонарного пуассонівського потоку інтенсивність λ – середнє число подій в одиницю часу є постійним, тобто $\lambda = \text{const}$.

Математичні характеристики параметрів стаціонарного пуассонівського потоку відомі. Ймовірність того, що на ділянці часу Δt з'явиться подія потоку, можна зобразити виразом

$$Q_1(\Delta t) \approx 1 - e^{-\lambda \Delta t} . \quad (1)$$

Для практичного використання при розкладі у ряд Фур'є величини $e^{-\lambda \Delta t}$ величинами вищого порядку малості можна знехтувати, тому отримуємо

$$Q_1(\Delta t) \approx \lambda \Delta t . \quad (2)$$

Таким чином ймовірність появи небезпечної події (ураження струмом або будь якого з небезпечних станів, формуючих цю подію) на елементарній ділянці часу Δt можна визначати як добуток інтенсивності потоку λ та величини ділянки часу Δt .

У разі відсутності захисного вимкнення всі небезпечні події та стани вважаються незалежними, тому їх ймовірності не залежать одна від одної. Але за наявності захисного вимкнення деякі ймовірності мають інше значення, ніж за його відсутності. Так, якщо захисне вимкнення за своїм принципом дії реагує на опір ізоляції мережі, то ймовірності замикань на корпус і низького опору ізоляції будуть менші аналогічних ймовірностей у разі, коли захисне вимкнення не застосовується або не діє. Тому такі ймовірності у разі застосування захисного вимкнення позначимо: Q_3 , Q_8 , Q_5 .

З урахуванням викладеного, моделі подій «ураження струмом» можна зобразити у вигляді дерева відмов (рис. 3). У разі відсутності захисного вимкнення у схемі дерева відмов відсутня гілка дерева з елементом 10, який формалізує роль захисного вимкнення.

Для побудови математичних моделей ураження електрострумом врахуємо, що загальна ймовірність групи подій, послідовно наступних у схемі одна за іншою (логічна операція «і») підраховується по теоремі множення ймовірностей, а загальна ймовірність групи подій, паралельних у схемі дерева (логічна операція «або») підраховується за теоремою складання (додавання) ймовірностей. Позначимо на схемі: \cap – логічний елемент, що реалізує операцію «і», \cup – логічний елемент, що реалізує операцію «або».

ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

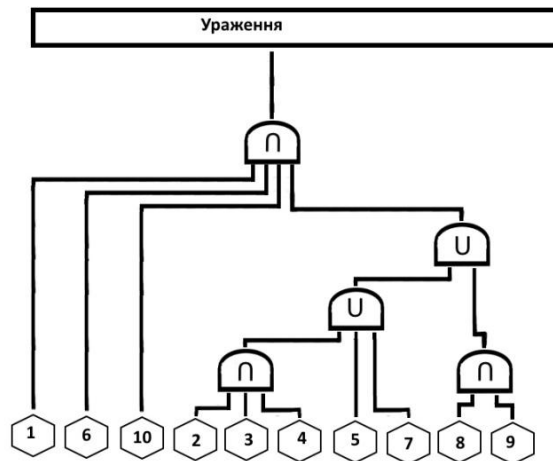


Рисунок 3 – Модель ураження електрострумом для електроустановок з захисним вимкненням

У відповідності з викладеним, виконавши математичні перетворення, отримаємо математичну модель ураження електрострумом для електроустановки, що немає захисного вимкнення

$$Q_{\Pi} = Q_1 Q_2 \{ 1 - (1 - Q_5 Q_7) \{ 1 - Q_2 Q_3 [1 - (1 - Q_4 Q_5) (1 - Q_8 Q_9)] \} \}. \quad (3)$$

Для побудови математичної моделі ураження струмом у разі застосування захисного вимкнення врахуємо, що сучасні пристрої захисного вимкнення реагують на струм витоку або на опір ізоляції мережі та струм витоку, тому вони не тільки вимикають напругу при небезпеці ураження людини, але і у разі виникнення замикань на корпус і небезпечних знижень опору ізоляції навіть тоді, коли ще безпосередньої небезпеки для людини не виникає або коли вона зовсім відсутня. У разі застосування таких пристроїв події замикання на корпус або низького опору ізоляції можуть існувати тільки тоді, коли відмовило захисне вимкнення і відсутній контроль ізоляції. Тому ймовірності замикань на землю і ймовірність низького опору ізоляції будуть нижче чим без захисного вимкнення. Таким чином у разі застосування захисного вимкнення існування подій «однофазне замикання на корпус», «двофазне замикання на корпус» і «низький опір ізоляції» залежать від сумісного існування цих подій та події «відмова захисного вимкнення». Як відомо, ймовірність сумісного виникнення двох незалежних подій А і В рівна добутку ймовірностей цих подій, тобто $Q(A B) = Q(A) Q(B)$.

З урахуванням цього при застосуванні захисного вимкнення, що реагує на опір ізоляції та замикання на корпус, маємо

$$Q_3' = Q_3 Q_{10}; \quad Q_5' = Q_5 Q_{10}; \quad Q_8' = Q_8 Q_{10}'. \quad (4)$$

Тоді математична модель ураження електрострумом у разі застосування захисного вимкнення буде

$$Q_{\Pi}' = Q_1 Q_2 Q_{10} \{ 1 - (1 - Q_5 Q_7 Q_{10} \{ 1 - Q_2 Q_3 Q_{10} [1 - (1 - Q_5 Q_4 Q_{10}) (1 - Q_8 Q_9 Q_{10})] \} \} \}. \quad (5)$$

ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Для оцінки ефективності захисних засобів більш доцільно користуватись не ймовірностями їх відмов, а ймовірностями безвідмовної роботи, тому що такий показник - параметр їх надійності нормується технічною документацією і забезпечується на стадіях створення засобів захисту. Це особливо відноситься до пристроїв захисного вимкнення та захисту від струмів коротких замикань. Перехід від ймовірностей відмов до ймовірностей безвідмовної роботи здійснюється за виразами

$$Q_{10} = 1 - P_{10}; \quad Q_4 = 1 - P_4; \quad Q_5 = 1 - P_5; \quad Q_9 = 1 - P_9, \quad (6)$$

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

Якщо у формули (3) та (4) підставити значення Q_{10} , Q_4 , Q_5 , Q_9 з формули (6), отримаємо залежності ймовірності уражень електрострумом від параметрів надійності засобів захисту. Для оцінки ефективності доцільно використати статистичні дані про параметри небезпечних станів систем електропостачання вугільної дільниці, які отримані у свій час у Донбасі на шахті «Росія» шляхом 7,5 місяців спостережень (табл. 1) [8].

Таблиця 1 – Статистичні дані небезпечних станів системи електропостачання

| № | Найменування стану | Середній час між виникненням небезпечного стану, год. | Середній час існування небезпечного стану, год. | Ймовірність Небезпечного стану |
|---|--|---|---|--------------------------------|
| 1 | Доторкання людини до корпусу електрообладнання | 0,28 | 0,364 | 0,338 |
| 2 | Однофазне замикання на землю або корпус | 2692,75 | 40,17 | 0,166 |
| 3 | Відмова заземлення | 2980 | 446 | 0,02 |
| 4 | Пошкодження ізоляції (для комбайна і конвеєра) | 1555,63 | 142,44 | 0,166 |
| 5 | Доторкання людини до струмопровідних частин пускової апаратури | 1621 | 0,873 | 0,38 |
| 6 | Однофазні парні замикання на землю | -- | -- | 0 |
| 7 | Відмова захисту від струмів коротких замикань | 2352 | 150 | 0,06 |
| 8 | Відмова захисного вимкнення (захисту від витоків струму) | 244 | 1,25 | 0,05 |

Комп'ютерні розрахунки показали, що 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 $6,37$ до $1,6 \cdot 10^{-4}$ (табл. 2), тобто приблизно у 400 разів.

**ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА
НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ**

Таблиця 2 – Зниження ймовірності ураження струмом при застосуванні засобів захисту

| Засоби захисту від уражень електрострумом | Ймовірність ураження струмом, Q_{II} | Кратність зниження ймовірності ураження n |
|---|--|---|
| Захисне вимикання: без захисної дії заземлення ізоляції і захисту від струмів коротких замикань: | $9,6 \cdot 10^{-4}$ | 430 |
| з врахуванням заземлення, ізоляції і захисту від струмів коротких замикань | $1,58 \cdot 10^{-4}$ | 403 |
| Електрична ізоляція мережі електропостачання: без врахування захисного вимикання, заземлення і захисту від струмів коротких замикань | $3 \cdot 10^{-2}$ | 13,8 |
| без врахування захисного вимикання, але з врахуванням заземлення і захисту від коротких замикань | $1,95 \cdot 10^{-2}$ | 19,5 |
| Захисне заземлення: без врахування захисного вимикання, 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 врахування захисного вимкнення | $6,39 \cdot 10^{-1}$ | 1,13 |
| Захист від струмів коротких замикань: без врахування захисного вимикання, заземлення і ізоляції | $4,15 \cdot 10^{-1}$ | 1,0 |
| з урахуванням заземлення і ізоляції, але без врахування захисного вимикання | $6,37 \cdot 10^{-2}$ | 1,13 |

Більш детальне вивчення ефективності засобів захисту, виконане за результатами комп'ютерних розрахунків при однаковій ймовірності їх безвідмовної роботи, рівній ймовірності безвідмовній роботі захисного вимкнення $P_{10} = 0,95$ (табл. 2), свідчить про наступне. Захисна дія електричної ізоляції мережі електропостачання знижує ймовірність ураження струмом приблизно у 14 разів(без врахування інших засобів захисту). Ефективність захисного заземлення і захисту від коротких замикань у порівнянні з захисним вимиканням не велика, що пояснюється тим, що вони не впливають на ураження струмом у разі дотику людини до струмопровідних частин. Заземлення є ефективним засобом захисту від уражень струмом тільки тоді, коли людина торкається корпусу, який виявився

ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

під напругою, і електричне коло заземлення виявляється включеним паралельно тілу людини і тому струм відводиться у землю минаючи людину.

Аналіз залежності $Q_{\Pi}' = f(Q_{10})$ або $Q_{\Pi}' = f(1 - P_{10})^2$ свідчить, що вони з достатньою для практики точністю можуть бути представлені формулами

$$Q_{\Pi}' = Q_{\Pi} Q_{10}^2 \quad \text{або} \quad Q_{\Pi}' = Q_{\Pi} (1 - P_{10})^2 . \quad (7)$$

При цьому похибка ймовірності ураження струмом не вище 9%, коли розглядається зниження ймовірності ураження за рахунок захисного вимкнення без врахування заземлення і захисту від струмів коротких замикань, та не вище +1%, коли разом з захисним вимкненням враховується заземлення і захист від струмів коротких замикань.

У відповідності з формулою (7) можна визначити кратність зниження ймовірності ураження електрострумом за наявності захисного вимкнення у системі електропостачання споживачів

$$n = Q_{\Pi} / Q_{\Pi}' = 1 / (1 - P_{10})^2 . \quad (8)$$

Кратність показує у скільки разів зменшується ймовірність ураження струмом за рахунок застосування засобів безпеки, у даному випадку формула (8) відтворює залежність кратності зниження ймовірності ураження струмом від одного з показників надійності захисного вимкнення - ймовірності безвідмовної роботи засобів системи захисного вимкнення. Чим більша надійність захисного вимкнення тим у більшій кратності зменшується ймовірність ураження струмом, тобто зменшується ризик електротравмування людей (табл. 3).

Таблиця 3 – Зменшення ризику ураження струмом у залежності 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 врахування 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 врахуванням заземлення, ізоляції і захисту від струмів коротких замикань | 1 | 4,1 | 38,8 | 107,8 | 433,5 | 2712,4 | 10 892 |

ОХОРОНА ПРАЦІ Й БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА НА ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

З приведених даних видно пріоритетне значення надійності функціонування захисного вимкнення електроенергії як засобу попередження уражень людей струмом. Виходячи з реальної можливості у забезпеченні надійності технічних засобів, можна розраховувати на зниження ймовірності зниження ризику ураження струмом за рахунок захисного вимкнення не менше, ніж у 100 разів. При цьому для практичного використання кратність зниження ризику можна визначати за спрощеною формулою, виходячи тільки з фактичної ймовірності безвідмовної роботи системи захисного вимкнення електроенергії. Для забезпечення надійності апаратури захисного вимкнення в умовах експлуатації необхідно суворо здійснювати її перевірку справності та профілактику відповідно до вимог виробників апаратури як це викладено у роботах [1, 6, 9].

ВИСНОВКИ. 1. Обґрунтовано послідовність уражень електрострумом у часі представити як пуассонівський потік випадкових подій, що дає можливість визначати ймовірність ураження як добуток інтенсивності потоку і часового терміну, за який розглядаються події.

2. Ризик ураження струмом, який оцінюється ймовірністю цієї події, залежить від ймовірностей дотику людини до струмопровідної частини та корпусу при однофазному чи двофазному замиканні на корпус, ймовірностей пошкодження ізоляції електромережі, відмов заземлення, захисту від коротких замикань і захисного вимкнення електроенергії, та обчислюється як логічна операція «і», коли у «дереві відмов» такі небезпечні стани слідуєть по одній гілці послідовно одна за другою, чи як логічна операція «або» коли вони слідуєть альтернативно по різних гілках «дерева відмов».

3. Доведено, що ефективність захисного вимкнення, як засобу електробезпеки, набагато перевищує ефективність разом взятих заземлення, ізоляції та захисту від замикань на землю, тому що, контролюючи опір електромережі відносно землі, захисне вимкнення попереджає існування під напругою пошкодження ізоляції мережі, однофазних та двофазних замикань на землю, а також протікання струму через тіло людини і небезпечних струмів витоків з мережі шляхом вчасного вимикання напруги.

4. Запропоновано для практики визначати відносне зниження ймовірності ризику ураження електрострумом за рахунок захисного вимкнення за обґрунтованою формулою у залежності від ймовірності його безвідмовної роботи або зворотно пропорційно квадрату ймовірності відмов захисного вимкнення. В умовах експлуатації рекомендується суворо витримувати вимогу керівництв з експлуатації апаратури захисту від витоків струму щодо її справності шляхом використання передбаченої у конструкції апаратів кнопки перевірки справності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Колосюк В. П. Защитное отключение рудничных электроустановок. М.: Недра, 1980, 334 с.
2. Яковс А. И., Луковников А. В. Электробезопасность в сельском хозяйстве. М.: Издательство «Колос». 1981. 273 с.
3. Долин П. А. Основы техники безопасности в электроустановках. Учеб. пособие для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат. 1984. 448 с.

4. Технический отчет ИЕС 479 – 1. Действие тока на людей и домашний скот. Часть 1: Общие аспекты. Третье издание. 1994. 09.
5. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия. ГОСТ 22929 – 78 – М.: Госстандарт СССР, 1979. 17 с.
6. Колосюк В. П. Техника безопасности при эксплуатации рудничных электроустановок. М.: Недра, 1987. 407 с.
7. Вентцель Е. С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972.
8. Ткачук С. П., Колосюк В. П., Ихно С. А. Взрывопожаробезопасность горного оборудования. К.: «Основа». 2000. 695 с.
9. Колосюк В. П., Товстик Ю. В. Электробезопасность в горной промышленности: монография / Под ред. д.т.н. В. П. Колосюка. Донецк: Изд-во «Нюлиж» (донецкое отделение), 2014. 475 с.

RISK REDUCTION OF ELECTRIC TRAUMA IN ISOLATED NEUTRAL POWER SUPPLY SYSTEMS

V. Kolosyuk, V. Lysenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: gzk@kdu.edu.ua

Purpose. The purpose of the research is to substantiate probable models of electrocution as a hazardous event and to establish the relationship of the power cut-off efficiency with the parameters of its reliability. **Methodology.** To construct mathematical models of electric shock, we take into account that the total probability of a group of events sequentially following in the scheme one after another (logical operation "and") is calculated by the probability multiplication theorem, and the total probability of a group of events parallel to the tree scheme (logical operation "or") is calculated by the theorem of adding probabilities. **Results.** It is justified the sequence of electric shocks over time and is represented as a Poisson flow of random events, which makes it possible to determine the probability of a damage as the product of the intensity of the flow and the time period for which the events are considered. The risk of electric shock, which is estimated by the likelihood of this event, depends on the probabilities of human contact to the conductive part and the housing in the case of single-phase or two-phase closure to the housing, the probability of damage to the electrical insulation, failure of grounding, protection against short circuits, and is calculated as a logical operation "and" when in the "failure tree" such dangerous states follow one branch consecutively one after the other, or as a logical operation "or" when they follow alternatively by different branches "fault tree". It is proved that the efficiency of the protective shutdown, as a means of electrocution, far exceeds the efficiency of the combined grounding, insulation and earth fault protection, because, by controlling the resistance of the grid against the earth, the protective shutdown prevents the existence of voltage damage to the insulation of the network, single and two-phase earth faulting, as well as the flow of current through the human body and dangerous leakage currents by temporarily turning off the voltage. It is proposed to determine for practice the relative reduction of the risk of electric shock due to the safety shutdown by a reasonable

formula, depending on the probability of its failure-free operation or inversely proportional to the square of the probability of failure of the safety shutdown. In operating conditions, it is recommended to strictly comply with the requirements of the operating manuals of the equipment against leakage of the current to its serviceability by using the button provided in the design of the devices check the service. **Originality.** For the first time, it was obtained that the mathematical models of electric shock for electrical installation without safety shutdown and with safety shutdown system were obtained. It is suggested to determine the efficiency of the protective power cut-off according to the criteria of electrical safety: the probability of hitting people with electric current and the frequency of reducing such probability due to the protective action of the means of electrical safety. **Practical value.** Considering the real possibility of ensuring the reliability of the technical means, it is possible to expect to reduce the probability of reducing the risk of electric shock due to the safety shutdown not less than 100 times. However, for practical use, the risk reduction multiplicity can be determined by a simplified formula, based only on the actual probability of a trouble-free operation of the power-off system. References 9, figures 3, tables 3.

Key words: electrical installation, safety shutdown, hazardous events, hazardous states, failure tree, event and status probabilities.

REFERENCES

1. Kolosyuk, V. (1980), *Zashitnoe otklyuchenie rudnichnyh elektroustanovok*, [Protective shutdown of mine electrical installations], Nedra, Moscow, Russia.
2. Jakobs, A., Lukovnokov, A. (1981), *Elektrobezopasnost v selskom hozyajstve*, [Electrical safety in agriculture], Kolos, Moscow, Russia.
3. Dolin, P. A. (1984), *Osnovy` tekhniki bezopasnosti v e`lektroustanovkakh Energoatomizdat*, [Safety Basics in Electrical Installations], Moscow, Russia.
4. Technical report IEC 479 - 1. Current effects on people and livestock. Part 1: General Aspects. Third edition. 1994.09.
5. Mine protection devices for leakage currents for networks up to 1200 V. General specifications. GOST 22929; 78 (1979), Gosstandart of the USSR, Moscow, USSR. 17 p.
6. Kolosyuk, V. (1987), *Tekhnika bezopasnosti pri e`kspluataczii rudnichny`kh e`lektroustanovok*, [Safety during the operation of mine electrical installations.], Nedra, Moscow, Russia.
7. Ventczel, E. S. (1972), *Issledovanie operaczij*, [Operations research], Sovetskoe radio, Moscow, Russia.
8. Tkachuk, S. P., Kolosyuk, V. P., Ikhno, S. A. (2000) *Vzryvopozharno-bezopasnost gornogo oborudovaniya*, [Explosion and fire safety of mining equipment], Osnova, Kyiv, Ukraine.
9. Kolosyuk, V. P., Tovstik, Yu. V. (2014), *Elektrobezopasnost v gornoj promyshlennosti: monografiya*, [Electrical Safety in the Mining: Monograph], Noulizh, Donetsk, Ukraine.

Стаття надійшла 25.11.2019.