

Piotr GAWOR
Politechnika Śląska, Gliwice

ANALIZA WYPADKÓW OPARZENIA ŁUKIEM ELEKTRYCZNYM W ZAKŁADACH GÓRNICZYCH

Streszczenie. Oparzenie łukiem elektrycznym należy do najczęściej występujących wypadków elektrycznych. Przeprowadzono analizę dokumentacji powypadkowych dotyczących oparzenia łukiem elektrycznym, zaistniałych w latach 1990-1999. Na jej podstawie zaproponowano zbiór czynników charakteryzujących w sposób możliwie pełny sytuacje prowadzące do oparzenia łukiem elektrycznym i opracowano drzewo zdarzeń prowadzących do wypadków.

ANALYSIS OF ACCIDENTS WITH ELECTRIC ARC BURN IN COAL MINES

Summary. Electric arc burn belongs to the most common electric accidents. On the ground of the analysis of electric accidents records from 1990-1999 it was proposed a collection of factors that characterise the situations leading to the electric arc burn and it was described a tree of events (fault tree) that lead to such accidents.

1. Wstęp

W statystykach wypadków elektrycznych [3], [4] oparzenia łukiem elektrycznym stanowią zwykle ponad połowę liczby wszystkich wypadków. Są więc istotną grupą wypadków, wymagającą zwrócenia szczególnej uwagi. Należą do wypadków, których dokładna analiza napotyka na duże trudności. Najczęściej spowodowane są błędnym działaniem poszkodowanego, jak np. praca pod napięciem czy brak przygotowania miejsca pracy. W związku z tym poszkodowany nie jest zazwyczaj zainteresowany ujawnianiem podczas dochodzenia powypadkowego niektórych okoliczności wypadku, zwłaszcza takich, które obciążałyby jego samego. Dodatkowo szok, wywołany urazem termicznym i prowadzoną ewentualną akcją ratowniczą (np. gaszenie palącego się ubrania), może zatrzeć pamięć i ograniczyć umiejętność szczegółowego odtworzenia przebiegu wypadku. Utrudnia to analizę wypadków i obiektywnie ustalanie przyczyn oraz sposobów ich zapobiegania w przyszłości.

W artykule przeprowadzono analizę czynników i okoliczności, które mogą doprowadzić do zaistnienia wypadku oparzenia łukiem elektrycznym oraz przyporządkowano im określone powiązania, tworząc odpowiednie drzewo zdarzeń.

2. Czynniki wpływające na możliwość zaistnienia wypadku oparzenia łukiem elektrycznym

Warunkiem koniecznym zaistnienia wypadku oparzenia łukiem elektrycznym jest jednoczesne powstanie łuku elektrycznego w miejscu dostępnym¹⁾ urządzenia elektrycznego i znalezienia się człowieka w zasięgu cieplnego działania tego łuku.

Łuk elektryczny może powstać w jednej z trzech sytuacji;

- stopienia się elementu obwodu elektrycznego,
- zwarcia łukowego międzyfazowego lub doziemnego,
- otwierania styków odłącznika w obciążonym obwodzie.

Stopienie się elementu obwodu elektrycznego może nastąpić w stanie roboczym lub podczas zwarcia w wyniku nadmiernego nagrzania się tych elementów albo ich fragmentów. W stanie roboczym znaczących przyrostów temperatury należy się spodziewać w miejscach połączeń obwodów, a więc na złączach (np. połączenie żył roboczych kabla w mufie, połączenie szyn zbiorczych w rozdzielnicy SN) lub zaciskach. Do czynników składających się na możliwość powstania nadmiernych przyrostów temperatury w stanie roboczym należy zaliczyć:

- obciążenie prądem elektrycznym,
- zły stan złącza lub zacisku wynikający ze złego montażu lub utleniania się,
- brak kontroli złącz.

O wystąpieniu nadmiernych przyrostów temperatury w stanie zwarcia decydują przede wszystkim błędy w doborze wytrzymałości zwarciowej elementów obwodów lub zmiana warunków zwarciowych spowodowana np. zmianą sposobu zasilania.

Do zwarcia łukowego dochodzi najczęściej w warunkach pracy pod napięciem. Do ważniejszych czynników warunkujących wystąpienie zwarcia łukowego można zaliczyć:

- świadomą decyzję wykonania pracy pod napięciem,
- brak świadomości obecności napięcia w urządzeniu, przy którym przeprowadza się prace,
- realizację pracy dopuszczalnej pod napięciem,
- przerwy w pracy,
- niekompletną obudowę urządzeń,
- złe przygotowanie lub/i zabezpieczenie miejsca pracy,

¹⁾ Jako miejsce dostępne traktowana będzie przestrzeń wewnątrz obudowy urządzenia lub wewnątrz ogrodzenia wokół urządzenia (albo za barierą), a także w bezpośrednim sąsiedztwie obudowy w miejscach, w których można się liczyć z wydostaniem się łuku elektrycznego powstającego wewnątrz. Nie będzie uwzględniane powstawanie łuku elektrycznego wewnątrz komór gaszeniowych łączników podczas pracy załączeniowej lub wyłączeniowej w ramach ich zdolności łączeniowej.

- lekceważenie niebezpieczeństwa,
- błędne polecenie pracy,
- błędne wykonanie polecenia pracy,
- pracę bez polecenia,
- pracę bez nadzoru,
- używanie niewłaściwych przyrządów lub/i narzędzi.
- nieostrożne manipulowanie narzędziami w pobliżu części czynnych pod napięciem,
- upadające przedmioty, zwłaszcza metalowe (np. nakrętki, narzędzia),
- zbliżenie się do części czynnych pod napięciem, w wyniku czego może dojść do przeskoku iskry i łuku elektrycznego.

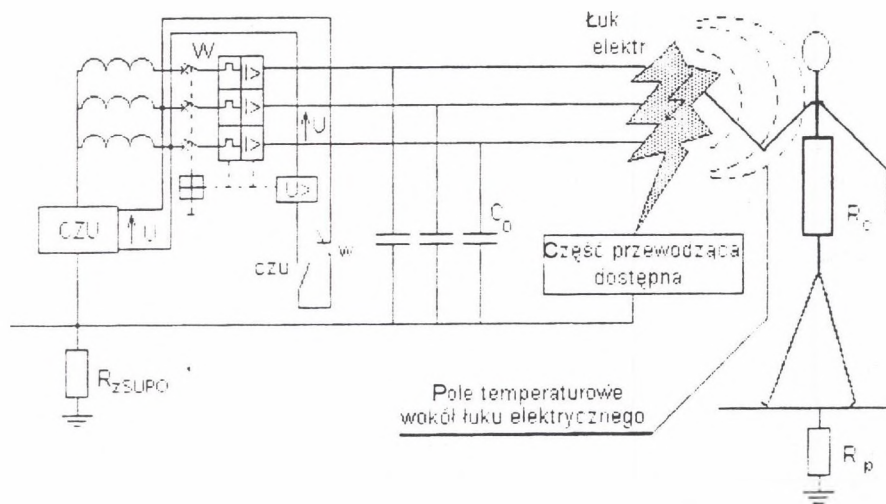
Otwieranie styków odłącznika w obciążonym obwodzie ma istotne znaczenie zwłaszcza w rozdzielnicach średniego (ew. wysokiego) napięcia. W przypadku gdy wyłącznik jest zamknięty, o możliwości otwarcia odłącznika decydują:

- brak blokady odłącznik-wyłącznik,
- uszkodzona lub błędnie działająca blokada odłącznik-wyłącznik,
- świadome ominięcie blokady,
- brak sprawdzenia stanu styków wyłącznika.

Osoba może się znaleźć w zasięgu cieplnego działania łuku elektrycznego, gdy zbliża się do części czynnych urządzenia elektrycznego znajdującego się pod napięciem. Strefa niebezpiecznego cieplnego oddziaływania łuku elektrycznego trudna jest do jednoznacznego ustalenia, zwłaszcza w urządzeniach średniego i wysokiego napięcia. Dlatego też każde nadmierne zbliżenie się do urządzenia elektrycznego pod napięciem (np. dotykanie) jest związane z ryzykiem i należy je ograniczać do niezbędnego minimum. Do ważniejszych czynników decydujących o możliwości znalezienia się człowieka w zasięgu oddziaływania łuku elektrycznego należy zaliczyć:

- nadmierne zbliżenie się do części czynnych,
- świadomy lub nieświadomy bezpośredni kontakt z urządzeniem elektrycznym,
- przebywanie osoby nieuprawnionej w pomieszczeniu ruchu elektrycznego,
- brak informacji o obecności napięcia,
- brak ochrony przed dotykiem bezpośrednim (podstawowej) w wyniku jej uszkodzenia lub świadomego zaniżenia stopnia ochrony (IP),
- brak dostosowania stopnia ochrony podstawowej do warunków środowiskowych,
- niewłaściwe przygotowanie miejsca pracy.

Oddziaływanie cieplne łuku elektrycznego na osoby znajdujące się w pobliżu zależne jest od sposobu palenia się łuku (rozkładu przestrzennego pola temperatury) oraz od czasu jego utrzymania się. Samo zjawisko łuku elektrycznego wywołanego w sposób przypadkowy i palącego się w powietrzu, w miejscu nie przystosowanym do tego, jest na tyle skomplikowane, że próby analitycznego określenia drogi, długości, kształtu, rezystancji, temperatury i tym podobnych parametrów łuku, decydujących o możliwości oparzenia, zawodzą.



Rys.1. Zwarcie łukowe w niskonapięciowej sieci IT zasilanej z przewoźnej stacji transformatorowej
 Fig.1. Arc shorting in the low voltage network IT supplied from the mobile transformer station

Na rys. 1 przedstawiono przypadek zwarcia łukowego w niskonapięciowej sieci IT, zasilającej maszyny prądowe. Sieć zasilana jest z przewoźnej stacji transformatorowej wyposażonej między innymi w samoczynny wyłącznik zabezpieczeniowy W i centralne zabezpieczenie upływowe CZU. Zwarcie łukowe wywołane błędnym działaniem uszkodzonego lub innym czynnikiem przypadkowym obejmuje swym zasięgiem różne fazy i najbliższe elementy części przewodzących dostępnych. Świadczą o tym zauważane zwykle podczas oględzin miejsca wypadku i opisywane w protokołach ślady nadtopień i opaleń części czynnych i metalowych części obudowy urządzenia, w którym powstał łuk elektryczny.

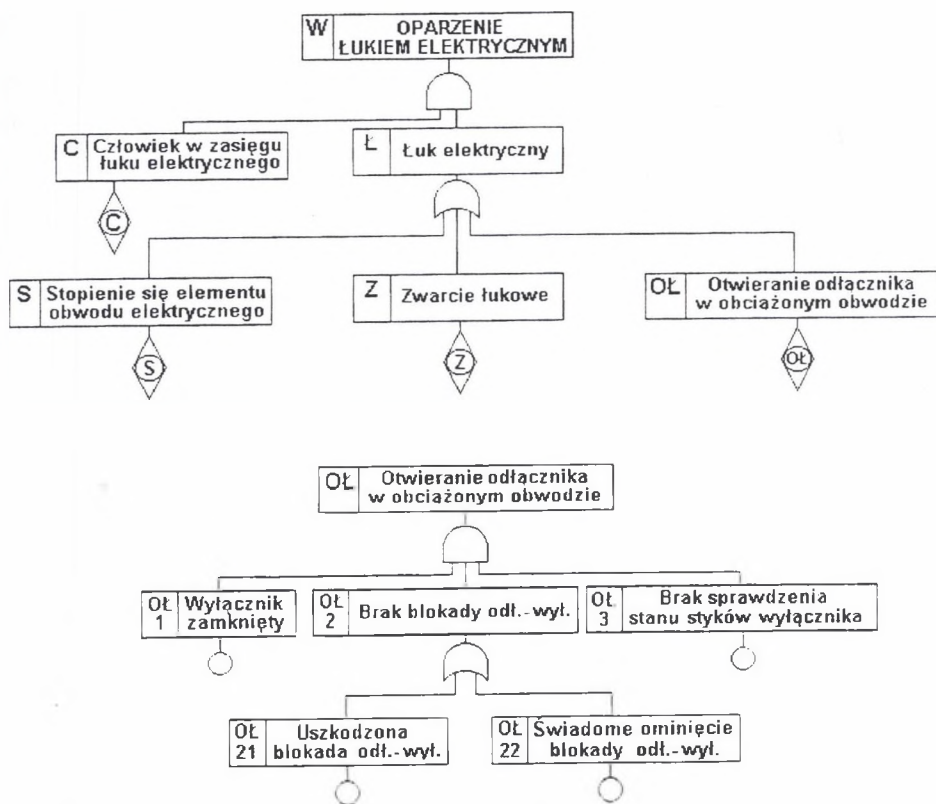
Czas trwania zwarcia łukowego wynika z działania zabezpieczeń zwarciovych i/lub upływowych. Działanie zabezpieczeń zwarciovych w wyłączniku zabezpieczeniowym w warunkach zwarcia łukowego może odbiegać od działania przy zwarciu metalicznym, do którego została dobrana czułość zabezpieczenia. W skrajnym przypadku rezystancja łuku elektrycznego może do tego stopnia ograniczyć wartość prądu zwarciovego, że wyzwalacz zwarciovych wyłącznika zabezpieczeniowego w ogóle nie zadziała i wyłączenie nastąpi dopiero po dłuższym czasie pod wpływem zabezpieczenia przeciążeniowego w stacji transformatorowej bądź nawet w rozdzielnicy średniego napięcia, z której zasilana jest ta stacja. Z kolei warunki działania zabezpieczeń upływowych podczas równoczesnego doziemnego i międzyfazowego zwarcia łukowego też różnią się od normalnych. Wynika to przede wszystkim ze znacznego ograniczenia wartości napięć międzyprzewodowych (np. napięcie U na rys. 1) na skutek dużych spadków napięcia wywołanych prądem zwarciovym. Szczególnie niekorzystny pod tym względem jest przypadek (występujący najczęściej - por. [2, 3] zwarcia łukowego wywołanego w komorze dolnego napięcia przewoźnej stacji transformatorowej. Napięcie międzyprzewodowe jest wówczas bliskie zeru i CZU może nie spowodować wyłączenia sieci spod napięcia z dwóch powodów:

- a) niewłaściwego działania układu mierzącego wypadkową rezystancję izolacji doziemnej,
- b) zbyt niskiej wartości napięcia zasilającego pomocniczy wyłącznik wzrostowy wyłącznika zabezpieczeniowego współpracujący z CZU.

O czasie trwania zwarcia łukowego będzie więc i w tym przypadku decydowało działanie zabezpieczeń nadmiarowoprądowych. Przedłużający się czas trwania zwarcia łukowego zwiększa ryzyko wypadku oparzenia.

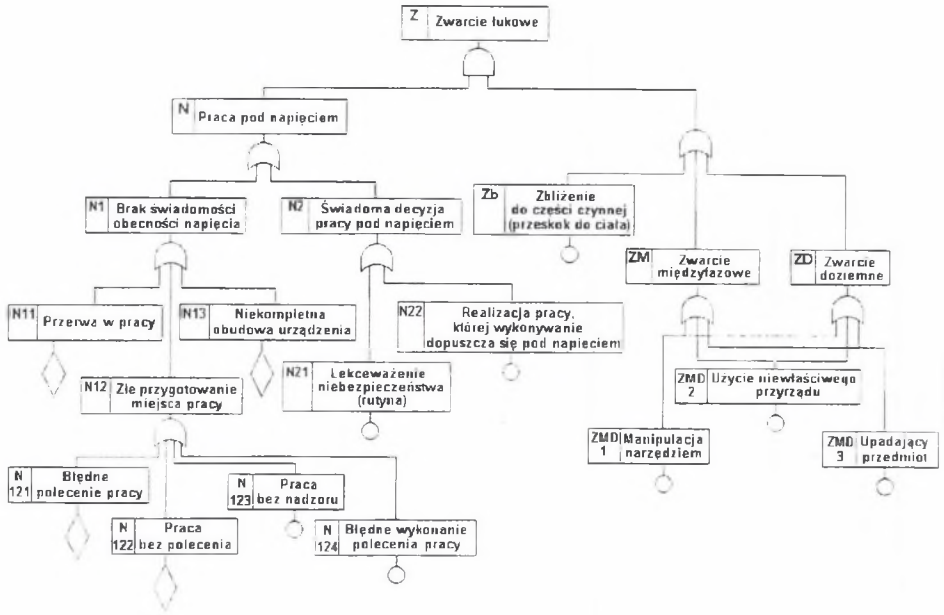
3. Drzewo zdarzeń prowadzących do wypadku oparzenia łukiem elektrycznym

Sposób wzajemnego powiązania czynników prowadzących do wypadku oparzenia łukiem elektrycznym przedstawić można graficznie w postaci drzewa zdarzeń. Na rys. 2a

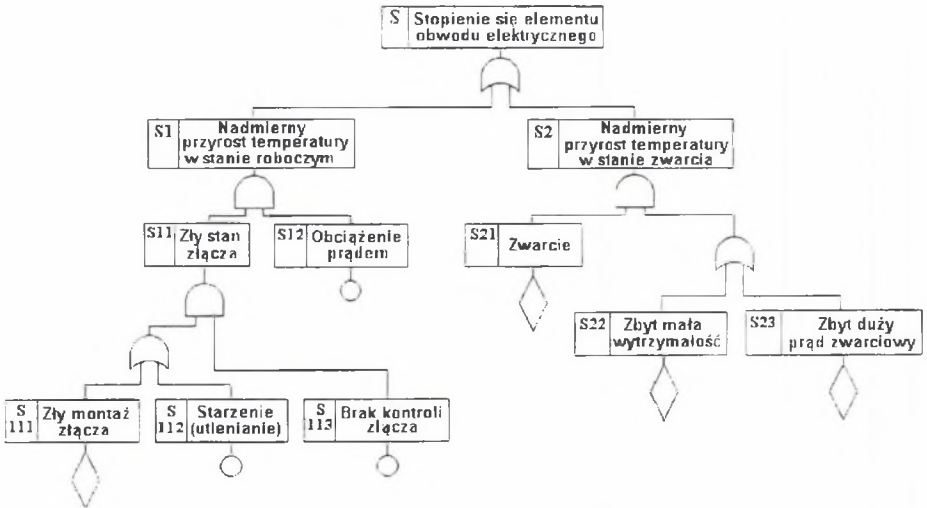


Rys.2. Ogólna postać drzewa zdarzeń prowadzących do wypadku oparzenia łukiem elektrycznym (a) i jeden z jego szczegółowych fragmentów (b)

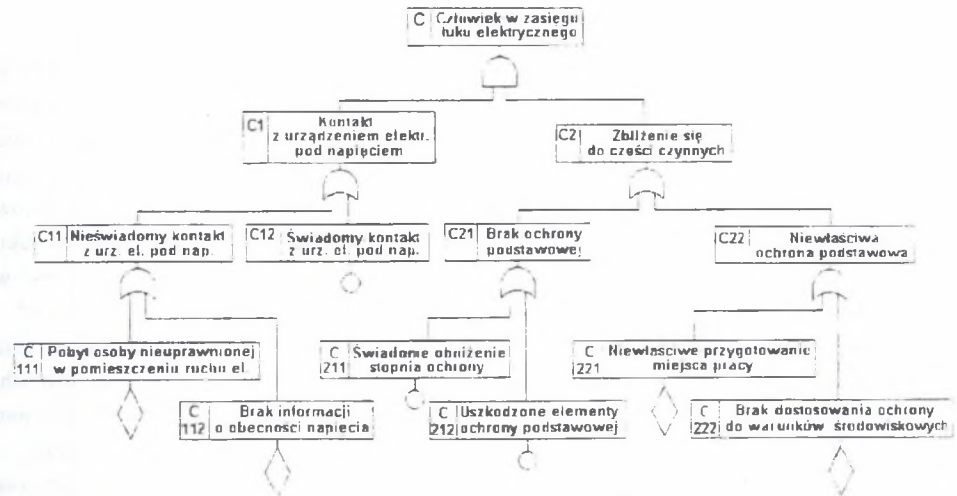
Fig.2. General form of the tree of events that lead to the accident of electric burn (a) and one of its particular fragments (b)



Rys.3. Drzewo zdarzeń prowadzących do powstania zwarcia łukowego
Fig.3. Tree of events that lead to the origin of arc shorting



Rys.4. Drzewo zdarzeń prowadzących do powstania łuku elektrycznego w wyniku stopienia się elementu obwodu elektrycznego
Fig.4. Tree of events that lead to the origin of electric arc as an effect of fusion of the electric circuit element



Rys.5. Drzewo zdarzeń prowadzących do sytuacji, w której człowiek znajduje się w zasięgu łuku elektrycznego
 Fig.5. Tree of events that lead to the situation, when the human is in the range of electric arc

przedstawiono zdarzenie szczytowe, czyli wypadek oparzenia łukiem elektrycznym, na który składa się pięć zasadniczych elementów powiązanych wyrażeniem logicznym:

$$W = C \cdot \bar{L} = C \cdot (O\bar{L} + Z + S), \tag{1}$$

w którym poszczególne symbole odpowiadają pokazanym na rysunku.

Analizując bardziej szczegółowo poszczególne elementy, każdemu z nich przyporządkować można podrzewo. Na rys. 2b pokazane jest podrzewo zdarzeń składających się na otwieranie odłącznika w obciążonym obwodzie (OŁ), dla którego można napisać wyrażenie logiczne:

$$O\bar{L} = O\bar{L}1 \cdot O\bar{L}2 \cdot O\bar{L}3 = O\bar{L}1 \cdot O\bar{L}3 \cdot (O\bar{L}21 + O\bar{L}22) \tag{2}$$

Rysunek przedstawia podrzewo zdarzeń prowadzących do powstania zwarcia łukowego opisane wyrażeniami:

$$Z = N \cdot (Zb + ZM + ZD) = N \cdot (Zb + ZMD1 + ZMD2 + ZMD3) \tag{3}$$

$$N = N11 + N121 + N122 + N123 + N124 + N13 + N21 + N22 \tag{4}$$

Na rys. 4 pokazane jest podrzewo zdarzeń prowadzących do stopienia się elementu obwodu elektrycznego, w konsekwencji czego dochodzi do powstania łuku elektrycznego. Odpowiada temu podrzewu równanie:

$$S = S1 + S2 = [(S111 + S112) \cdot S113] \cdot S12 + (S22 + S23) \cdot S21 \tag{5}$$

4. Zakończenie

Wypadki oparzenia łukiem elektrycznym należą do najczęściej występujących wypadków elektrycznych. Jako powód zdecydowanej większości wypadków można traktować błędne działania człowieka, w tym zwłaszcza świadome podejmowanie pracy przy urządzeniu znajdującym się pod napięciem. Zły stan techniczny urządzenia bardzo rzadko jest przyczyną tego rodzaju wypadków. Wobec tendencji utrzymywania się znaczącej liczby wypadków związanych z łukiem elektrycznym istniejące środki zapobiegające należy ocenić jako niewystarczające i podjąć działania zmierzające do ich poprawy. Działania powinny pójść w dwóch kierunkach:

- a) zaproponowania i opracowania środków technicznych zmierzających do ograniczenia oddziaływania ciepłego powstałego łuku elektrycznego na osoby dokonujące określonych, ryzykownych czynności przy urządzeniach elektrycznych; należy przy tym wziąć pod uwagę, że łuk elektryczny powstaje najczęściej w wyniku błędnego działania tych osób.
- b) wprowadzenia środków organizacyjnych mających na celu wpływanie na świadomość ryzyka i motywację do bezpiecznego działania osób, które w ramach swych obowiązków zawodowych wykonują czynności związane z czynnikami prowadzącymi do wypadków oparzenia łukiem elektrycznym.

W realizacji obydwu kierunków pomocne mogą być ustalenia wynikające z analizy przedstawionego drzewa zdarzeń prowadzących do wypadków oparzenia łukiem elektrycznym.

LITERATURA

1. Buehl R., Majka A., Saferna J., Sakiel S., Strużyna J.: Porażenia i oparzenia prądem i łukiem elektrycznym. Etiologia i pomoc przedlekarska. WNT, Warszawa 1993
2. Długaj J.: Niebezpieczeństwo oparzeń łukiem elektrycznym przy obsłudze i eksploatacji urządzeń elektrycznych w górnictwie. Praca dyplomowa magisterska wykonana w Katedrze Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa Politechniki Śląskiej. Gliwice 1999 (nie publikowana)
3. Dudziński P.: Analiza wpływu technicznych warunków środowiskowych na ryzyko wypadków elektrycznych w kopalniach. Praca dyplomowa magisterska wykonana w Katedrze Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa Politechniki Śląskiej. Gliwice 1998 (nie publikowana)
4. Gawor P.: Wypadki spowodowane dotykiem bezpośrednim w niskonapięciowych sieciach kopalń węgla kamiennego. Materiały XI Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Bezpieczeństwo elektryczne” T.I. Wrocław 1997
5. Saferna J.: Fizyczne własności łuku elektrycznego i ochrona człowieka przed skutkami jego działania. Wiadomości Elektrotechniczne nr 3-4. 1987

Abstract

The paper presents the analysis of factors and circumstances that may lead to the presence of electric arc burn accident; there was assigned specified connections of factors and circumstances that enabled to create suitable event tree (fault tree). Settlements that arise from the analysis of presented event tree may be helpful in projecting or undertaking activities tending to limitation of electric arc burn risk.

Activities should come into two directions:

- proposing and describing engineered agents tending to reduce the thermal influence of the originated electric arc for the persons that make specified, hazardous activities with electric devices; it should be taken into consideration that the electric arc originates as an effect of the wrong work of mentioned persons,
- introduction of organizational means which are to influence for the consciousness of the risk and motivation to the safe activity of the persons, which within their professional duties make activities connected with factors that lead to the electric arc burn accidents.