

ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ



P. 3351/05

Piotr GAWOR

ANALIZA I OCENA RYZYKA
ZWIĄZANEGO Z UŻYTKOWANIEM
SIECI TRAKCJI ELEKTRYCZNEJ PRZEWODOWEJ
W ZAKŁADACH GÓRNICZYCH



Gliwice 2005

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
ZESZYTY NAUKOWE

Nr 1671



P. 3351/05

Piotr GAWOR

**ANALIZA I OCENA RYZYKA
ZWIĄZANEGO Z UŻYTKOWANIEM
SIECI TRAKCJI ELEKTRYCZNEJ PRZEWODOWEJ
W ZAKŁADACH GÓRNICZYCH**

Gliwice 2005

Opiniodawcy

Prof. dr hab. inż. Henryk MARKIEWICZ

Prof. dr hab. inż. Paweł KRZYSTOLIK

Kolegium redakcyjne

Redaktor naczelny – Prof. dr hab. inż. Andrzej BUCHACZ

Redaktor działu – Prof. dr hab. inż. Franciszek PLEWA

Sekretarz redakcji – Mgr Elżbieta LEŚKO

Redakcja

Mgr Aleksandra KŁOBUSZOWSKA

Redakcja techniczna

Alicja NOWACKA

PL ISSN 0372-9508

© Copyright by
Piotr GAWOR
Gliwice 2005

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	7
1. Wstęp	11
2. Cele i tezy pracy	14
3. Podstawy analizy ryzyka związanego z użytkowaniem urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej w warunkach kopalnianych	16
3.1. Zagrożenia elektryczne związane z użytkowaniem trakcji elektrycznej przewodowej	16
3.2. Przegląd wybranych zasad i metod stosowanych w analizie ryzyka	19
3.3. Propozycja metody analizy i oceny ryzyka związanego z użytkowaniem urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej w warunkach kopalnianych	23
3.3.1. Elementy i czynniki ryzyka oraz zasady oceny ich stanu	23
3.3.2. Zasady określania wskaźników charakteryzujących prawdopodobieństwa związane z ryzykiem	27
3.3.3. Ryzyko oceniane doraźnie i perspektywnie	30
3.3.4. Przyjęta skala poziomów ryzyka	33
3.3.5. Proponowane zasady oceny ryzyka	34
4. Ryzyko związane z występowaniem prądów błądzących	37
4.1. Zagrożenia stwarzane przez prądy błądzące	37
4.1.1. Przyczyny prądów błądzących występujących w zakładach górniczych	37
4.1.2. Rodzaje zagrożeń stwarzanych przez prądy błądzące w warunkach zakładów górniczych	37
4.1.3. Zdarzenia prowadzące do zagrożenia związanego z prądami błądzącymi przy prowadzeniu robót strzelniczych	40
4.1.4. Drzewo niezdatności prowadzących do zagrożenia przy robotach strzelniczych	41
4.2. Elementy ryzyka związanego z prądami błądzącymi przy robotach strzelniczych	46
4.3. Analiza czynników ryzyka charakteryzujących prawdopodobieństwo wystąpienia źródeł prądu błądzącego w wyrobiskach	47
4.3.1. Ważniejsze czynniki charakteryzujące powstawanie i rozprzestrzenianie się prądów błądzących	47
4.3.2. Stan sieci dolnej	48
4.3.3. Stan złączy izolujących szyny torów zelektryfikowanych od nieelektryfikowanych	50
4.3.4. Stopień odizolowania sieci dolnej od konstrukcji metalowych znajdujących się w wyrobiskach	51
4.3.5. Sposób zasilania sieci trakcyjnej	52
4.3.6. Możliwość występowania warunków sprzyjających rozprzestrzenianiu się prądów błądzących	55
4.3.7. Obciążenie sieci trakcyjnej	62
4.3.8. Usytuowanie linii trakcji elektrycznej przewodowej na powierzchni	67
4.4. Ocena prawdopodobieństwa wystąpienia źródeł prądu błądzącego	68
4.5. Ocena prawdopodobieństwa przedostania się prądów błądzących do obwodu strzałowego	69
4.6. Ocena możliwości ograniczenia względnych wartości prądu błądzącego w obwodach strzałowych	70
4.7. Zasady oceny ryzyka związanego z prądami błądzącymi przy robotach strzelniczych	72
5. Ryzyko porażenia prądem elektrycznym od urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej	74
5.1. Uwagi wstępne	74
5.2. Wypadki porażenia prądem elektrycznym od urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej zaistniałe w zakładach górniczych w okresie wybranych 10 lat	75

5.3. Drzewo niezdatności prowadzących do porażenia prądem elektrycznym od urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej	78
5.4. Elementy ryzyka porażenia prądem elektrycznym od urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej	83
5.5. Analiza czynników ryzyka charakteryzujących pojawienie się napięć dotykowych	84
5.5.1. Występowanie napięć dotykowych podczas normalnej pracy sieci trakcyjnej	84
5.5.2. Występowanie napięć dotykowych w wyniku uszkodzeń w sieci trakcyjnej	97
5.5.2.1. Rodzaje uszkodzeń w sieci trakcyjnej prowadzących do powstawania napięć dotykowych	97
5.5.2.2. Napięcia dotykowe podczas zwarcia przewodu jezdnego z szynami	97
5.5.2.3. Napięcia dotykowe podczas zwarcia przewodu jezdnego z ziemią	106
5.5.2.4. Napięcia dotykowe w sieci o uszkodzonym złączu podłużnym	110
5.5.3. Napięcia dotykowe w przypadkach awaryjnego sposobu zasilania sieci trakcyjnej	114
5.5.4. Występowanie napięć dotykowych przemiennych w pobliżu urządzeń zasilanych z sieci trakcyjnej	124
5.5.5. Propozycja metodyki oceny prawdopodobieństwa występowania niebezpiecznych napięć dotykowych	126
5.6. Analiza czynników ryzyka charakteryzujących spodziewane wartości prądów rażeniowych	128
5.6.1. Analiza napięć dotykowych i prądów rażeniowych występujących podczas dotyku bezpośredniego	128
5.6.2. Analiza napięć dotykowych i prądów rażeniowych występujących podczas dotyku pośredniego	135
5.6.3. Wzrost ryzyka porażenia prądem elektrycznym w warunkach dyskomfortu cieplnego	139
5.6.3.1. Wpływ dyskomfortu cieplnego na rezystancję ciała człowieka	139
5.6.3.2. Prognozowanie wzrostu ryzyka porażenia prądem elektrycznym w warunkach dyskomfortu cieplnego	150
5.7. Wpływ drogi przepływu prądu rażeniowego na stopień porażenia	157
5.7.1. Możliwości występowania różnych dróg rażenia podczas wypadków powstałych przy urządzeniach trakcji elektrycznej	157
5.7.2. Zasady oceny skutków porażenia prądami płynącymi różnymi drogami	158
5.7.3. Umowne wskaźniki równoważności skutków przepływu prądu rażeniowego stałego różnymi drogami	164
5.8. Analiza czynników ryzyka charakteryzujących czas rażenia	174
5.9. Możliwość zetknięcia się człowieka z urządzeniami trakcji elektrycznej	177
5.10. Częstość i czas przebywania człowieka w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej	179
5.11. Zasady oceny ryzyka porażenia prądem elektrycznym od urządzeń trakcji elektrycznej	179
6. Zakończenie i wnioski	182
Załącznik: Propozycja zasad tworzenia bazy danych o wypadkach elektrycznych w zakładach górniczych	185
Literatura	190
Streszczenie	197

Contents

List of key notations	7
1. Introduction	11
2. Objectives and theses of the paper	14
3. Bases for the analysis of risk involved in the operation of wired electric traction under mining conditions	16
3.1. Electric hazards related to the operation of wired electric traction	16
3.2. Review of certain principles and methods used for risk analysis	19
3.3. Proposal of the method and assessment of risk involved in the operation of wired electric traction under mining conditions	23
3.3.1. Elements and factors of risk and principles of their assessment	23
3.3.2. Principles of designating the ratios describing the probabilities related to risk	27
3.3.3. Short term and long-term risk assessment	30
3.3.4. The assumed range of risk levels	33
3.3.5. The proposed principles of risk assessment	34
4. Risk related to stray currents	37
4.1. Hazards posed by stray currents	37
4.1.1. Causes of stray currents occurring in coal mines	37
4.1.2. Types of hazards posed by stray hazards under mining conditions	37
4.1.3. Incidents that lead to stray current hazards during blasting works	40
4.1.4. Fault trees leading to blasting hazards	41
4.2. Elements of risk related to stray currents during blasting works	46
4.3. Analysis of the risk factors describing the probability of generating stray currents in mining excavations	47
4.3.1. Major factors describing the generation and propagation of stray currents ..	47
4.3.2. Condition of the lower traction system	48
4.3.3. Condition of the bonds insulating the rails of electrified tracks from unelectrified ones	50
4.3.4. Stage of the insulation of the lower traction system from metal structures located in excavations	51
4.3.5. Power supply for the traction system	52
4.3.6. Possibility of the occurrence of conditions contributing to the propagation of stray currents	55
4.3.7. Load of the traction system	62
4.3.8. Location of wired electric traction line on the surface	67
4.4. Estimation of the probability of the generation of stray currents	68
4.5. Estimation of the probability of the propagation of stray currents in blast circuits	69
4.6. Assessment of the possibility of reducing the relative values of stray currents blast circuits	70
4.7. Principles of assessing the risk related to stray currents during blasting works ...	72
5. Risk of electric shock from wired electric traction equipment	74
5.1. Initial remarks	74
5.2. Electric shock accidents caused by electric traction equipment in coal mines during the specified 10-year period	75
5.3. Fault tree that leads to electric shocks from wired electric traction equipment	78
5.4. Elements of the risk of electric shocks from wired electric traction equipment ...	83

5.5. Analysis of the risk factors describing the generation of touch voltages	84
5.5.1. Touch voltages under normal operating conditions of the traction system ..	84
5.5.2. Touch voltages under the conditions of damage to the traction system	97
5.5.2.1. Types of damages to the traction system leading to the generation of touch voltages	97
5.5.2.2. Touch voltages during faults between the contact wire and the rails	97
5.5.2.3. Touch voltages during faults between the contact wire and the earth ...	106
5.5.2.4. Touch voltages in the system with damaged rail bond	110
5.5.3. Touch voltages during emergency supply of the electric traction system ...	114
5.5.4. Alternating touch voltages in the vicinity of equipment supplied from the traction system	124
5.5.5. Proposal of the method of estimating the probability of generating hazardous touch voltages	126
5.6. Analysis of the risk factors describing the expected values of shock currents	128
5.6.1. Analysis of touch voltages and shock currents at direct contact	128
5.6.2. Analysis of touch voltages and shock currents at indirect contact	135
5.6.3. Increase of the electric shock risk under the conditions of thermal discomfort	139
5.6.3.1. Impact of thermal discomfort on human body resistance	139
5.6.3.2. Forecast of the increase of electric shock risk under the conditions of thermal discomfort	150
5.7. Impact of the shock current passage paths on the degree of electric shock	157
5.7.1. Possibilities of different shock current passage paths during accidents in electric traction equipment	157
5.7.2. Principles of assessing the consequences of electric shocks from currents passing along different paths	158
5.7.3. Assumed equivalence ratios of the consequences of direct shock currents passage along different paths	164
5.8. Analysis of the risk factors describing the duration of the electric shock	174
5.9. Possibility of contact between man and electric traction equipment	177
5.10. Frequency and duration of man's presence in the vicinity of electric traction equipment	179
5.11 Principles of assessing the electric shock risk from electric traction equipment	179
6. Conclusions	182
Attachment: Proposal of the principles of creating databases on electricity-related accidents occurring in coal mines	185
References	190
Summary	197

Wykaz ważniejszych oznaczeń

ch, sh,	skrótowe, użyte we wzorach ze względów edytorskich nazwy funkcji hiperbolicznych cosh i sinh, (np. $cha(l-s)$, $sha(l)$),
F_F	współczynnik prądu serca,
F_L	wskaźnik charakteryzujący działanie prądu rażeniowego na układ nerwowy i tkankę wewnętrzną,
F_Q	wskaźnik charakteryzujący ciepłe działanie prądu rażeniowego,
F_w	wypadkowy wskaźnik stopnia (ciężkości) porażenia,
I_{c1}	prąd rażeniowy odczytany z krzywej c1 (prądów niefibrylujących) wykresu $t_r(I_r)$ wg raportu IEC 479 [72],
I_{doz}	prąd zwarcia doziemnego,
I_L	prąd obciążenia lokomotywy,
I_o	prąd obciążenia odbiornika zasilanego z sieci trakcyjnej,
I_{pk}	prąd pobierany przez nieruchomą lokomotywę, której koła stykają się z szynami przez warstwę rozsypanego pyłu kamiennego,
I_r	prąd rażeniowy,
$I_{r(A-B)}$	prąd rażeniowy płynący od punktu A do punktu B
$I_{r(DI-Dp)}$	prąd rażeniowy płynący od dłoni lewej do dłoni prawej,
$I_{r(DI-Kp)}$	prąd rażeniowy płynący od dłoni lewej do klatki piersiowej,
$I_{r(DI-S)}$	prąd rażeniowy płynący od dłoni lewej do stopy,
$I_{r(DI-SS)}$	prąd rażeniowy płynący od dłoni lewej do obydwu stóp,
$I_{r(Dp-S)}$	prąd rażeniowy płynący od dłoni prawej do stopy,
$I_{r(Dp-SS)}$	prąd rażeniowy płynący od dłoni prawej do obydwu stóp,
$I_{r(Kp-SS)}$	prąd rażeniowy płynący od klatki piersiowej do obydwu stóp,
I_r^{\uparrow}	prąd rażeniowy płynący w górę (wstępujący),
I_r^{\downarrow}	prąd rażeniowy płynący w dół (zstępujący),
I_r^{\leftrightarrow}	prąd rażeniowy płynący poprzecznie,
I_S	prąd obciążenia stacji zasilającej sieć trakcyjną,
I_z	prąd zwarcia w sieci trakcyjnej (przy zwarcia przewodu jezdnego z szynami),
I_{zom}	największa wartość zastępczego prądu obciążenia sieci trakcyjnej,
$k_R(Kw)$	współczynnik uwzględniający zmienność rezystancji skóry w zależności od liczby katastrofni wilgotnych,
$k_R(\delta)$	współczynnik uwzględniający zmienność rezystancji skóry w zależności od wskaźnika dyskomfortu cieplnego,
Kw	liczba katastrofni wilgotnych,
l	długość linii trakcji elektrycznej,
L	lokomotywa,
l_i	współrzędna granicy rejonu zasilania ze stacji SZ _i ,
$P\{S_j\}$	prawdopodobieństwo wystąpienia ciężkości skutków S _j ,
$P\{Z_j\}$	prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia Z _j ,
p_C	wskaźnik liczbowy częstości wykonywania prac lub przebywania w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej,
p_{Sj}	wskaźnik liczbowy charakteryzujący prawdopodobieństwo wystąpienia ciężkości skutków S _j ,
p_{Zj}	wskaźnik liczbowy charakteryzujący prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia Z _j ,
q	współrzędna położenia lokomotywy,

$R(U_d)$	rezystancja ciała człowieka dla napięcia U_d i określonej populacji wg raportu IEC [72],
$R(U_d, Kw)$	rezystancja ciała człowieka przy określonym napięciu dotykowym i określonej liczbie katastroficznych wilgotnych,
$R(U_d, \delta)$	rezystancja ciała człowieka przy określonym napięciu dotykowym i wskaźniku dyskomfortu cieplnego,
R_{B-sz}	rezystancja przejścia pomiędzy punktem wypływu prądu rażeniowego (B) i szynami,
R_{B-z}	rezystancja przejścia pomiędzy punktem wypływu prądu rażeniowego i ziemią,
R_c	rezystancja ciała człowieka,
R_{do}	rezystancja przewodu uszyniającego roboczego odbiornika zasilanego z przewodu jezdnego,
R_{do-z}	rezystancja przejścia względem ziemi uszkodzonego (odłączonego od szyn) przewodu uszyniającego roboczego odbiornika zasilanego z przewodu jezdnego,
R_{go}	rezystancja górnego przewodu zasilającego odbiornik zasilany z przewodu jezdnego,
R_i	ryzyko istotne,
R_{nt}	ryzyko nietolerowane,
R_t	ryzyko tolerowane (BR – brak ryzyka),
R_u	ryzyko umiarkowane,
R_n	rezystancja jednej nogi,
R_p	rezystancja przejścia,
R_p	rezystancja uszkodzonego złącza podłużnego sieci dolnej,
R_{PE}	rezystancja przewodu uszyniającego ochronnego,
R_{pk}	rezystancja warstwy pyłu kamiennego rozsypanego na szynach,
R_{pp}	rezystancja przedmiotu przewodzącego, za pośrednictwem którego dotknięto przewodu jezdnego,
R_{q-s}	rezystancja zastępcza szyn pomiędzy punktami q (współrzędna lokomotywy) i s (współrzędna punktu powrotnego),
R_r	rezystancja jednej ręki,
R_s	rezystancja skóry w przyjętym modelu,
r_s	rezystancja wzdłużna szyn,
R_{sd}	rezystancja sieci dolnej,
R_{sg}	rezystancja sieci górnej,
R_{SZ}	rezystancja zastępcza stacji prostownikowej wraz z siecią zasilającą średniego napięcia,
R_{sz}	rezystancja zastępcza szyn pomiędzy punktem wypływu prądu rażeniowego lub prądu obciążenia i punktem powrotnym,
R_{1sz}	rezystancja jednostkowa sieci dolnej (szyn) równa rezystancji odcinka sieci dolnej o długości 1 km,
R_{sz-z}	rezystancja zastępcza szyn względem ziemi,
R_w	rezystancja wewnętrzna ciała człowieka w przyjętym modelu,
R_{z-sz}	rezystancja zastępcza obwodu ziemnopowrotnego: ziemia – szyny – punkt zasilający dolny,
s	współrzędne położenia stacji zasilającej (punktu powrotnego),
SZ	stacja zasilająca sieć trakcyjną,
t_{c1}	czas rażenia odczytany z krzywej $c1$ (prądów niefibrylujących) wykresu $t_r(I_r)$ wg raportu IEC 479 [72],
t_r	czas rażenia,
U_d	napięcie dotykowe,
U_{ddoz}	napięcie dotykowe podczas doziemienia w sieci trakcyjnej,
U_{dm}	największa wartość napięcia dotykowego,

U_{dp}	napięcie dotykowe w sieci trakcyjnej z uszkodzonym złączem podłużnym sieci dolnej,
U_{dz}	napięcie dotykowe podczas zwarcia sieci trakcyjnej,
U_n	napięcie znamionowe (nominalne) sieci trakcyjnej,
U_{zr}	napięcie źródła zasilającego sieć trakcyjną (przyjmowane równe znamionowemu),
$V(x)$	potencjał szyn względem ziemi w punkcie o współrzędnej x,
$V(x)$	względna wartość potencjału szyn, odniesiona do spadku napięcia na jednostkowej rezystancji sieci dolnej, R_{1sz}
V_{szpz}	potencjał szyn w punkcie zasilającym dolnym (punkcie powrotnym),
W	umowne wagi liczbowe przyporządkowane stanom czynników ryzyka,
w	wartości względne umownych wag liczbowych przyporządkowanych stanom czynników ryzyka,
x	współrzędna dowolnego punktu linii trakcji elektrycznej,
x_p	współrzędna miejsca uszkodzenia złącza podłużnego sieci dolnej,
Z	impedancja ciała człowieka,
z	współrzędna miejsca zwarcia w sieci trakcyjnej,
Z_0	impedancja standardowa człowieka [40],
α	współczynnik upływu,
δ	bezwymiarowy wskaźnik dyskomfortu cieplnego,
ΔV_{sz}	spadek napięcia w szynach,
ΣI_b	sumaryczna wartość prądów błądzących powstających w określonych warunkach obciążenia i zasilania sieci trakcyjnej.

1. WSTĘP

Jednym z ważniejszych elementów zarządzania bezpieczeństwem w zakładach górniczych jest analiza i ocena ryzyka. Wraz z ustawowym wymaganiem zobowiązującym pracodawcę do informowania pracowników o ryzyku zawodowym¹ ujawniło się zapotrzebowanie na możliwie proste metody analizy ryzyka charakterystycznego tak w stosunku do różnych grup zawodowych, jak i w odniesieniu do poszczególnych zagrożeń.

Wśród zagrożeń, z którymi należy się liczyć w zakładach górniczych, istotną rolę odgrywają tzw. zagrożenia elektryczne, należące w zasadzie do grupy zagrożeń energomechanicznych, choć niektóre z nich bardzo ściśle powiązane są z tradycyjnymi robotami specyficznymi górniczymi (np. zagrożenie od prądów błędzących przy robotach strzelniczych). Zagrożenia elektryczne dotyczą zarówno stosunkowo wąskiej grupy osób bezpośrednio zatrudnionych przy urządzeniach elektrycznych (elektromonterów), jak i bardzo szerokiego grona osób spoza ruchu elektrycznego. Decydują o tym m.in. następujące czynniki:

- powszechna obecność urządzeń elektrycznych w ogólnie dostępnych wyrobiskach górniczych,
- ograniczone wymiary większości wyrobisk uniemożliwiające umieszczenie urządzeń elektrycznych w miejscach niedostępnych dla osób spoza ruchu elektrycznego,
- konieczność wykonywania różnych, nieraz skomplikowanych prac i czynności w pobliżu pracujących urządzeń elektrycznych,
- brak możliwości zapewnienia niezawodnego odizolowania części czynnych niektórych obwodów elektrycznych (np. szyn trakcji elektrycznej przewodowej) od elementów środowiska (np. górotworu, konstrukcji metalowych) i znajdujących się w pobliżu ludzi.

Do obiektów stwarzających poważne zagrożenia elektryczne należy zaliczyć sieć trakcji elektrycznej przewodowej wraz ze związanymi z nią urządzeniami elektrycznymi. Świadczą o tym przykładowo statystyki wypadków porażenia prądem elektrycznym wskazujące na utrzymujący się, praktycznie niezmiennie od wielu lat, znaczący udział trakcji elektrycznej w wypadkach ze skutkiem śmiertelnym i ciężkim [5, 6].

¹ Przykładowo, najnowsze uregulowania prawne w górnictwie [101], w pełni zgodne z prawodawstwem Unii Europejskiej, zobowiązują przedsiębiorcę do bieżącego przeprowadzania analiz i badań niezbędnych dla bezpiecznego prowadzenia ruchu zakładu górniczego – w tym dla oceny i dokumentowania ryzyka zawodowego. Wyrazem tego zobowiązania jest tzw. dokument bezpieczeństwa stanowiący zbiór wewnętrznych regulacji oraz dokumentów umożliwiających ocenę i dokumentowanie ryzyka zawodowego oraz stosowania niezbędnych środków profilaktycznych zmniejszających to ryzyko w zakładzie górniczym.

Zagrożenia elektryczne od urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej w specyficznych warunkach podziemi kopalń są złożonym zagadnieniem naukowym trudnym do jednoznacznego zweryfikowania pomiarowego. Stąd konieczne staje się wyjście od analizy teoretycznej, z której wyprowadzone wnioski powinny być bieżąco konfrontowane przede wszystkim z wynikami analizy dokumentacji zaistniałych wypadków.

Przedmiotem pracy są dwa zagrożenia:

- **możliwość niekontrolowanego odpalenia zapalnika elektrycznego w wyniku przedostania się prądów błędzących do obwodu strzałowego,**
- **zagrożenie porażeniowe od urządzeń trakcji elektrycznej.**

Są to aktualnie najważniejsze zagrożenia elektryczne związane z pracą trakcji elektrycznej przewodowej, które ocenia się w praktyce ruchu zakładu górniczego i w stosunku do których stosuje się odpowiednie środki ochronne. Odnośnie do pozostałych potencjalnych zagrożeń związanych z występowaniem prądów błędzących (np. pożarowego, wybuchowego, korozyjnego) – nie stosuje się dotychczas określonych procedur zwalczania ich w podziemiach kopalń. Należy jednak stwierdzić, że każde działanie zmierzające do ograniczenia powstawania i rozprzestrzeniania się prądów błędzących, stanowiące jeden z elementów zwalczania zagrożenia przy robotach strzelniczych, będzie się przyczyniało do ograniczania pozostałych zagrożeń.

Z pracą trakcji elektrycznej przewodowej związana jest również możliwość wystąpienia zakłóceń w obwodach telekomunikacyjnych. Problemy te są tradycyjnie przedmiotem zainteresowania innej dyscypliny naukowej – kompatybilności elektromagnetycznej, w związku z czym wymagają rozważań teoretycznych i metodyki badań odmiennych od prezentowanych w niniejszej pracy i wykraczających poza jej zakres.

W pracy większy nacisk położono na zagrożenie porażeniowe, gdyż ciągle jeszcze trakcja elektryczna przewodowa należy do najistotniejszych przyczyn porażień, a jednocześnie w praktyce odczuwa się niedostatek jednoznacznie sformułowanych i łatwych do stosowania zasad ochrony przeciwporażeniowej w sieciach trakcyjnych, a także przestrzegania procedur organizacji bezpiecznej pracy oraz przebywania w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej. Możliwość oparcia się na dokumentacjach konkretnych wypadków porażenia prądem elektrycznym [12] pozwoliła jednocześnie na ukierunkowanie analizy teoretycznej i podjęcie próby przystosowania znanych z literatury wyników badań do warunków, w których do wypadków dochodziło i nie można wykluczyć, że w przyszłości nie dojdzie.

Problematyka zwalczania zagrożeń stwarzanych przez prądy błędzące w zakładach górniczych ma inne uwarunkowania. W latach sześćdziesiątych udział prądów błędzących jako

przyczyny wypadków przy stosowaniu środków strzałowych stanowił od kilku do ponad dwudziestu procent [7]. Podjęte w następnych latach działania, obejmujące m. in.:

- ograniczenie stosowania zapalników elektrycznych o prądzie bezpiecznym równym 200 mA,
- poznanie przyczyn powstawania prądów błędzących impulsowych [26] i wprowadzenie przyrządów do ich pomiaru [28],
- wprowadzenie nieelektrycznych metod odpalania [48],

znacznie ograniczyły zagrożenie. Opracowana została również Polska Norma [31, 90, 91, 92], w której wskazano na potrzebę systematycznej oceny ryzyka i podano czynniki charakteryzujące to ryzyko. Celowe jest jednak uzupełnienie ogólnych zaleceń normy szczegółowymi wskazówkami, pozwalającymi w sposób ujednoczony dla różnych zakładów górniczych sprostać wymaganiom wynikającym z konieczności opracowywania dokumentu bezpieczeństwa [106] w każdym z nich.

Rozważania teoretyczne przedstawione w pracy wpisane zostały w specyfikę związaną z pojęciem ryzyka. W ryzyku, rozumianym jako iloczyn (ogólniej – kombinacja) prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku i ciężkości jego skutków, nie da się uniknąć pewnego marginesu niepewności i/lub niejednoznaczności. Powoduje to dwojakie implikacje. Z jednej strony ścisła analiza ilościowa zjawisk, prowadzona z określoną dokładnością, służy w znacznej mierze do wyciągania wniosków o charakterze jakościowym, które są nie tylko formalnie zapisywane, ale i poddawane dalszej analizie z dokładnością inną, lub nawet bez zwracania szczególnej uwagi na dokładność. Z drugiej strony uwzględniając, że ryzyko powstaje w wyniku określonego *działania* podjętego w efekcie określonej *decyzji* [84], trzeba wnioski analizy teoretycznej przedstawić w formie odpowiedniej do możliwie prostego i przekonywającego wykorzystania w praktycznych działaniach technicznych i organizacyjnych.

2. CELE I TEZY PRACY

W rozważaniach dotyczących bezpieczeństwa najważniejszym celem jest zwykle ustalenie przyczyn niezadowolającego poziomu tego bezpieczeństwa lub/i wskazanie środków, których zastosowanie ma doprowadzić do osiągnięcia stanu akceptowalnego. Do najczęściej stosowanych i najbardziej efektywnych miar poziomu bezpieczeństwa należy zaliczyć obecnie ryzyko. Analiza elementów składowych ryzyka i czynników decydujących o ich kształtowaniu się losowym, a także o kształtowaniu celowym w wyniku świadomie podejmowanych działań, jest jednym z ważniejszych zadań realizowanych w ramach zarządzania bezpieczeństwem. Jest jednocześnie złożonym problemem naukowym i technicznym, którego rozwiązywanie wymaga zastosowania metod teoretycznych, bazujących na doświadczeniu praktycznym i wynikach specjalistycznych badań przeprowadzanych w miarę możliwości w warunkach rzeczywistych. Przystępując do analizy ryzyka związanego z użytkowaniem trakcji elektrycznej przewodowej w podziemiach kopalń, zwłaszcza zaś w odniesieniu do zagrożenia przy robotach strzelniczych i zagrożenia porażeniowego, należy uwzględnić konieczność ograniczeń w planowaniu i wykonywaniu badań weryfikujących rozważania teoretyczne. Ograniczenia te są oczywiste i wynikają zarówno z braku możliwości badania skutków zagrażających bezpośrednio życiu człowieka, jak i nierealności stwarzania w warunkach podziemi kopalń sytuacji i uszkodzeń prowadzących potencjalnie do zwiększenia prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia lub ekspozycji człowieka na to zagrożenie. Jednocześnie zaś istnieje zapotrzebowanie na przydatne w praktyce sposoby oceny ryzyka.

W pracy postawiono zatem dwa zasadnicze cele. Celem naukowym jest wykazanie, że w ocenie zagrożeń elektrycznych związanych z użytkowaniem trakcji elektrycznej przewodowej punktem wyjścia może i powinna być analiza teoretyczna zjawisk zachodzących w sieci dolnej traktowanej jako element obwodu ziemnopowrotnego. W analizie teoretycznej należy zwracać szczególną uwagę na warunki środowiskowe i czynniki ergonomiczne właściwe dla podziemi kopalń, gdyż mogą one rzutować na konieczność opracowania specyficznych kryteriów działania i doboru środków ochronnych. Analiza taka powinna być prowadzona w powiązaniu z analizą znanych wypadków elektrycznych.

Celem utylitarnym jest opracowanie możliwie prostej metodyki analizy i oceny ryzyka, przydatnej w praktycznych działaniach związanych z zarządzaniem bezpieczeństwem. Wynikające ze stosunkowo skomplikowanej analizy teoretycznej wnioski powinny dostarczyć wskazówek ułatwiających planowanie i przeprowadzanie działań, głównie technicznych i organizacyjnych, mających na celu utrzymywanie ryzyka na poziomie tolerowanym. Powin-

ny one również umożliwiać przewidywanie zmian ryzyka oraz przeciwdziałanie sytuacjom sprzyjającym jego narastaniu.

Dodatkowym celem utylitarnym, który pojawił się już w trakcie realizacji pracy, jest opracowanie zasad tworzenia bazy danych o wypadkach, która nawiązując do zaproponowanej w pracy metodyki analizy czynników ryzyka, pozwoliłaby gromadzić i wykorzystywać do poprawy bezpieczeństwa informacje obecnie niedostępne.

Realizacja obydwu postawionych celów wymagała przeprowadzenia analizy dostarczającej argumentów do udowodnienia następująco sformułowanych tez:

Teza 1

Istnieje potrzeba i możliwość opracowania prostej metody oceny ryzyka związanego z użytkowaniem urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej w zakładach górniczych opartej na analizie warunków pracy sieci trakcyjnej, z uwzględnieniem dostępnych danych o wypadkach elektrycznych.

Teza 2

W działaniach zmierzających do ograniczenia ryzyka związanego z pracą trakcji elektrycznej przewodowej niezbędna jest analiza warunków środowiskowych i czynników ergonomicznych towarzyszących pracy w zakładach górniczych, prowadząca do opracowania i stosowania specjalnych kryteriów doboru i działania środków ochronnych.

3. PODSTAWY ANALIZY RYZYKA ZWIĄZANEGO Z UŻYTKOWANIEM URZĄDZEŃ TRAKCJI ELEKTRYCZNEJ PRZEWODOWEJ W WARUNKACH KOPALNIANYCH

3.1. Zagrożenia elektryczne związane z użytkowaniem trakcji elektrycznej przewodowej

Trakcja elektryczna przewodowa, mimo znacznego rozwoju transportu przemożnikowego, należy nadal do ważniejszych środków transportowych w górnictwie. Zapewnia ona nie tylko transport urubku i materiałów, ale często również przewóz załogi pomiędzy szymbami i rejonami wydobywczymi. W stosowanym w kopalniach systemie trakcji elektrycznej przewodowej stałoprądowej szyny jezdne przyłączone są do bieguna ujemnego stacji prostownikowej zasilającej i stanowią tzw. sieć dolną. Ułożenie szyn na podkładach i warstwie podsypki nie zapewnia dobrego odizolowania ich od spagu wyrobiska, w związku z czym szyny należy traktować jako elementy obwodów ziemnopowrotnych [54, 69]. Bardzo niekorzystne warunki pracy sieci dolnej (odkształcanie spagu, występowanie wody o znacznej konduktywności, zanieczyszczenie torowiska węglem i skałą płonną, obecność w pobliżu szyn znacznej ilości metalowych konstrukcji) są powodem występowania znacznego upływu prądu z szyn, czyli powstawania prądów błędzących, obejmujących swym zasięgiem praktycznie całą kopalnię. Należy dodać, że w powstawaniu prądów błędzących występujących w wyrobiskach podziemnych uczestniczy nie tylko sieć trakcji elektrycznej dołowej, ale często również sieć powierzchniowa (linie tramwajowe, i kolejowe) i odwrotnie – sieć trakcyjna dołowa przyczyniać się może do występowania prądów błędzących na powierzchni. Trudności w jednoznacznym, precyzyjnym określeniu rozległości stref rozprzestrzeniania się prądów błędzących w górotworze i za pośrednictwem rozległych konstrukcji metalowych zmuszają do traktowania dwóch dowolnie skojarzonych punktów w dowolnym wyrobisku, jako źródła prądu błędzącego [89] i konieczności traktowania tych punktów, jako źródła energii przekazywanej w sposób niekontrolowany do przypadkowo przyłączonego do tych punktów obwodu zewnętrznego. Wywołuje to wiele zagrożeń szczegółowo przedstawionych na rys. 3.1.

Znaczne długości sieci trakcyjnej prowadzonej w ogólnie dostępnych wyrobiskach sprzyjają możliwości częstego kontaktu osób pracujących lub tylko obecnych w tych wyrobiskach, z częściami przewodzącymi dostępnymi oraz przewodami uszyniającymi ochronnymi urządzeń elektrycznych związanych z pracą trakcji elektrycznej (np. łączniki sekcyjne, transparenty, lampy oświetlające zasilane z przewodu jezdne), a nawet z nie izolowanymi częściami

czynnymi (przewód jezdny, szyny jezdne, przewody uszyniające robocze). Stwarza to warunki do powszechnego występowania napięć dotykowych i powstawania bardzo zróżnicowanych sytuacji prowadzących do zagrożenia porażeniowego.

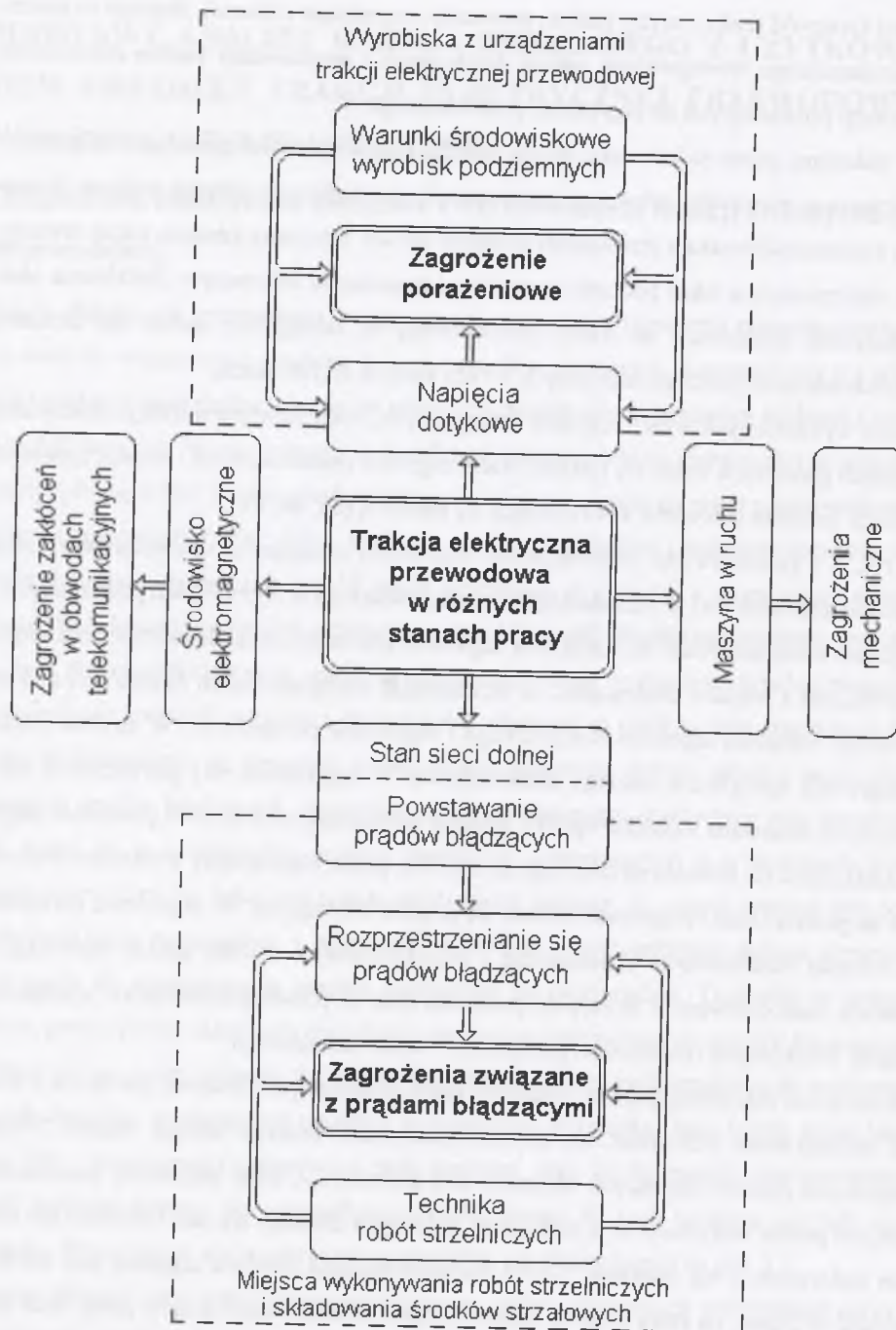
Sieć trakcyjna, mimo że jest siecią prądu stałego, stanowi również poważne źródło zakłóceń elektromagnetycznych, zwłaszcza impulsowych, powstających głównie podczas przerywanego kontaktu odbieraka z przewodem jezdny lub kół z szynami (stanom takim towarzyszy łuk elektryczny), a także podczas rozruchów i hamowania lokomotyw. Zakłócenia elektromagnetyczne pochodzące od trakcji przewodowej są szczególnie istotne dla urządzeń i sieci telekomunikacyjnych prowadzonych w tych samych wyrobiskach.

Oprócz wymienionych wyżej zagrożeń elektrycznych, z użytkowaniem trakcji elektrycznej w zakładach górniczych wiąże się również wiele zagrożeń mechanicznych i innych, typowych dla sytuacji kontaktu człowieka z poruszającą się maszyną [85, 86, 87].

Na rys. 3.1 przedstawiono schematycznie zagrożenia związane z użytkowaniem trakcji elektrycznej przewodowej w zakładach górniczych, zwłaszcza w wyrobiskach podziemnych.

W zakres niniejszej pracy wchodzi dwa najistotniejsze zagrożenia elektryczne, tzn. zagrożenia związane z prądami błędzącymi, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości niekontrolowanego odpalenia zapalnika elektrycznego i zagrożenie porażeniowe. W obydwu istotną rolę odgrywają specyficzne warunki środowiskowe. W zagrożeniu przy prowadzeniu robót strzelniczych stosowana technika wpływa głównie na prawdopodobieństwo powstania zagrożenia (zetknięcia się obwodu strzałowego ze źródłem prądu błędzącego), a warunki środowiskowe na powstawanie i rozprzestrzenianie się prądów błędzących. W zagrożeniu porażeniowym warunki środowiskowe (klimatyczne i ergonomiczne) w istotny sposób wpływają na rezystancję ciała człowieka i na stopień porażenia oraz na prawdopodobieństwo występowania napięć dotykowych i możliwości powstania obwodu rażeniowego.

Terytorialnie zagrożenie przy prowadzeniu robót strzelniczych związane jest ściśle z miejscami wykonywania tych robót, ale dotyczy praktycznie każdego takiego miejsca (obszar występowania prądów błędzących obejmuje całą kopalnię). Z kolei zagrożenie porażeniowe istotne jest przede wszystkim w wyrobiskach, w których znajduje się sieć trakcyjna lub urządzenia elektryczne z nią związane. Cechą charakterystyczną obydwu zagrożeń jest ich duża zmienność w czasie, na którą wpływa między innymi zróżnicowanie stanów pracy sieci trakcyjnej i możliwości uszkodzeń sieci dolnej. W mniejszym stopniu dotyczy to zagrożenia zakłóceń w obwodach telekomunikacyjnych, w odniesieniu do którego zastosowane poprawnie środki ograniczające zakłócenia (lub zapewniające odporność obwodów) pozwalają uznać zagrożenie za zminimalizowane w dłuższej perspektywie czasowej.



Rys. 3.1. Zagrożenia związane z użytkowaniem urządzeń trakcji elektrycznej w warunkach podziemi kopalń
 Fig. 3.1. Hazards related to the operation of electric traction equipment in underground coal mines

3.2. Przegląd wybranych zasad i metod stosowanych w analizie ryzyka

Ryzyko jest pojęciem i zjawiskiem towarzyszącym wielu działaniom człowieka w życiu codziennym. Przykładowe zwroty: „podjąć ryzyko”, „ryzykowne działanie”, „ryzyko transakcji”, „uniknąć ryzyka”, „zmniejszać ryzyko” są powszechnie używane i intuicyjnie zrozumiałe.

Ryzyko związane z działalnością techniczną poddawane refleksji naukowej ma już stosunkowo długą historię, początkowo związaną z występującymi katastrofami, a następnie z rozwojem takich dziedzin, jak ochrona pracy i zarządzanie bezpieczeństwem. Ryzyko, zwłaszcza w ujęciu definicji parametrycznych [79], traktowane jest jako miara bezpieczeństwa [68, 74]. Pojęcie ryzyka zawsze obejmuje dwa rodzaje elementów: częstość lub prawdopodobieństwo występowania zdarzenia wywołującego zagrożenie i konsekwencje tego zdarzenia [100] (konsekwencje bywają określane również jako ciężkość szkody [85], ciężkość urazu [71], wielkość poniesionych strat [79]). W odniesieniu do ryzyka związanego z porażeniem prądem elektrycznym niebezpiecznym zdarzeniem może być przykładowo rażenie prądem (traktowane jako fakt przepływu prądu elektrycznego przez organizm człowieka), a konsekwencjami – porażenie elektryczne, czyli wystąpienie patofizjologicznych reakcji organizmu ludzkiego [52, 53]. Sposób powiązania prawdopodobieństwa występowania zdarzenia wywołującego zagrożenie (w skrócie – zagrożenia) z ciężkością skutków tego zagrożenia przedstawiany jest za pomocą iloczynu [74, 79], kombinacji [100] lub funkcji [85], albo określenia [71] koniunkcji (logiczne i).

Ryzyko jako miara, a także jako zjawisko podlegające zarządzaniu, powinno być wyrażone ilościowo. Biorąc pod uwagę złożoność zjawisk, zachowań i postaw, jakich ryzyko dotyczy, trzeba zdawać sobie sprawę z trudności, napotykanych przy podejmowaniu prób ściśle ilościowego opisu [55] poszczególnych elementów składających się na ryzyko. Znajduje to wyraz m. in. w normie określającej zasady oceny ryzyka związanego z maszynami [85], w której znajdujemy następującą uwagę: *Zastosowanie metod ilościowych jest ograniczone liczbą możliwych do uzyskania użytecznych danych i dlatego w wielu zastosowaniach możliwa jest tylko jakościowa ocena ryzyka. Dlatego też decyzje podejmowane w procesie oceny ryzyka (...) powinny być wsparte metodami jakościowymi uzupełnianymi tak dalece, jak jest to możliwe, metodami ilościowymi.*

W literaturze przedmiotu spotyka się zróżnicowane podejście do analizy i oceny ryzyka [4, 23, 39, 47, 50, 51, 52, 57, 58, 65, 68, 70, 71, 72, 74, 79]. Najprostszym sposobem jest oszacowanie ryzyka w skali trójstopniowej, rozróżniającej ryzyko: małe, średnie i duże. Przypisuje się tym określeniom umowne wartości liczbowe, np. odpowiednio 1, 2 i 3, w zależności od

prawdopodobieństwa zagrożenia i ciężkości następstw [100], w sposób przedstawiony w tabelicy 3.1.

Tablica 3.1

Zasady oszacowania ryzyka zawodowego w skali trójstopniowej
(macierz ryzyka) wg PN-N-18002:2000 [100]

Prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia	Ciężkość następstw		
	mała	średnia	duża
Mało prawdopodobne	małe 1	małe 1	średnie 2
Prawdopodobne	małe 1	średnie 2	duże 3
Wysoko prawdopodobne	średnie 2	duże 3	duże 3

Dysponując odpowiednią liczbą danych statystycznych, przyjmując odpowiednie założenia i stosując odpowiedni aparat matematyczny, można obliczać tzw. wskaźnik ryzyka i porównywać jego wartość z przyjętymi umownie wartościami granicznymi. Przykładowo, oceniając ryzyko zawodowe związane z porażeniem prądem elektrycznym niskiego napięcia, ryzyku małemu autorzy [51] przypisują wstępnie wartość wskaźnika $R_s \leq 10^{-5}$ w odniesieniu do jednego roku, ryzyku średniemu $10^{-5} < R_s < 10^{-4}$, a ryzyku dużemu $R_s \geq 10^{-4}$. Innym przykładem trójstopniowego kryterium, z użyciem innych określeń poszczególnych stopni, może być zaproponowane [68] kryterium indywidualnego ryzyka śmierci na skutek wypadków przy pracy. Wg tej propozycji z ryzykiem niedopuszczalnym mamy do czynienia, gdy jego wskaźnik, wyrażany liczbą zgonów na rok i osobę, jest większy niż 10^{-3} , ryzyko tolerowalne powinno się charakteryzować wartością wskaźnika z przedziału od 10^{-5} do 10^{-3} , zaś ryzyko można uznać za akceptowalne, gdy wskaźnik jest mniejszy niż 10^{-5} .

Rozszerzeniem i uszczegółowieniem skali trójstopniowej może być zastosowanie skali czterostopniowej [96] lub pięciostopniowej [100]. W pierwszym przypadku wprowadza się dodatkowo ryzyko pomijalne, wyróżniając w macierzy ryzyka przykładowo cztery kategorie następstw (lekkie, poważne, ciężkie i katastroficzne) i sześć kategorii częstości występowania (wyjątkowe, mało prawdopodobne, rzadkie, sporadyczne prawdopodobne i częste) [96].

W drugim przypadku dodatkowo określa się ryzyko bardzo małe i bardzo duże, przy trójstopniowych skalach prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia i ciężkości następstw wykorzystanych w macierzy ryzyka [100].

Innym sposobem jest nadanie różnym poziomom ryzyka nazw nawiązujących do potocznego rozumienia ryzyka i przypisanie im liczb w porządku rosnącym w miarę wzrostu ryzyka od 0 do 8 [74] lub malejącym [72, wg normy MIL STD 882] od 20 do 1. W tabelicy 3.2 zestawiono omawiane kryteria oceny ryzyka, a w tabelicy 3.3 zasady przypisywania poszczególnym poziomom ryzyka wskaźników liczbowych.

Do jeszcze bardziej rozbudowanych metod szacowania ryzyka zaliczyć należy bezwymiarowy wskaźnik poziomu ryzyka (WPR) obliczany jako iloczyn czterech wielkości [68]:

$$WPR = A \cdot B \cdot C \cdot D \quad (3.1)$$

gdzie

- A – prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia,
- B – częstość ekspozycji na zagrożenie,
- C – największa prawdopodobna strata,
- D – liczba osób narażonych na zagrożenie.

Tablica 3.2

Porównanie równych zasad określania wskaźników i poziomów ryzyka

Kryteria oceny ryzyka wg MIL STD 882 [72]		Gradacja poziomów ryzyka wg [74]	
Proponowane kryterium	wskaźnik ryzyka	poziom ryzyka	wielkość ryzyka
Nieakceptowalne, działanie niedopuszczalne	1-6	ryzyko nie tolerowane	7-8
Niepożądane, ograniczyć czasowo działanie i zaostrzyć procedury kontroli	7-11	ryzyko istotne, rzeczywiste	5-6
Akceptowalne przy stałej kontroli	12-17	ryzyko umiarkowane	3-4
Akceptowalne bez dalszej kontroli	18-20	ryzyko tolerowane	1-2
		ryzyko nie występuje	0

Tablica 3.3

Zasady przypisywania poszczególnym kryteriom (poziomom) ryzyka wg tablicy 3.2 wskaźników liczbowych

Przewidywane prawdopodobieństwo (Prawdopodobieństwo)	Kategoria następstw, wg [72] (Konsekwencje, wg [74])			
	I katastroficzne (katastrofalne)	II krytyczne (krytyczne)	III nieznaczące (marginalne)	IV bez znaczenia (nieistotne)
Częste (Częste)	1 (8)	3 (8)	7 (5)	13 (1)
Prawdopodobne (Możliwe)	2 (8)	5 (8)	9 (4)	16 (1)
Czasami (Okazjonalne)	4 (8)	6 (6)	11 (3)	18 (0)
Niewielkie (Nikle)	8 (6)	10 (6)	14 (2)	19 (0)
Nieprawdopodobne (Nieprawdopodobne)	12 (3)	15 (2)	17 (1)	20 (0)

Poszczególne elementy składowe oceniane są wg następujących zasad.

- Prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia (A), w skali 7-stopniowej: niemożliwe (0), bardzo małe (1), małe (2), możliwe (5), prawdopodobne (8), spodziewane (10) i pewne (15).
- Częstość ekspozycji na zagrożenie (B), w skali 7-stopniowej: bardzo rzadko (0,1), raz w roku (0,2), raz w miesiącu (1,0), raz w tygodniu (1,5), raz dziennie (2,5), raz na godzinę (4) i ciągle (5).
- Największa prawdopodobna strata (C) w skali 7-stopniowej: otarcie, stłuczenie (0,1), skaleczenie, zmiżdżenie (0,5), złamanie kości, np. palca (1), złamanie głównych kości, np., noga (2), utrata 1 kończyny lub oka (4), utrata 2 kończyn, lub oczu (8) i śmierć (15).
- Liczba osób narażonych na zagrożenie (D), w skali 5-stopniowej: 1÷2 osób (1), 3÷7 osób (2), 8÷15 osób (4), 16÷50 osób (8) i ponad 50 osób (12).

Wskaźnikowi WPR nadaje się jedno z 8 możliwych określeń ryzyka, w zależności od wartości iloczynu A·B·C·D: akceptowalne (0÷1), bardzo małe (2÷5), małe (6÷10), znaczące (11÷50), wysokie (51÷100), bardzo wysokie (101÷500), ekstremalne (501÷1000) i niedopuszczalne (ponad 1000). Każdemu poziomowi przypisuje się odpowiednie działania zapobiegawcze, od ryzyka akceptowalnego (przy którym nie wymaga się podejmowania specjal-

nych działań) poprzez konieczność podjęcia działań zapobiegawczych w czasie od 1 roku do natychmiastowego, po zatrzymanie produkcji.

Jak wynika z powyższego przeglądu najbardziej charakterystycznych metod stosowanych w analizie i ocenie ryzyka, nie ma obecnie jednego, obowiązującego sposobu przypisywania ryzyku określonej wartości liczbowej. Można wyróżnić dwa zasadniczo odmienne sposoby podejścia. W jednym wskaźnik charakteryzujący poziom ryzyka przyjmuje wartości większe od jedności i określany jest w sposób umowny, odpowiadający w jakimś stopniu intuicyjnemu (potocznemu) odczuwaniu zagrożenia. W większości metod większemu ryzyku przypisuje się większe wartości wskaźnika, choć są i takie [np. 72], w których zasada jest odwrotna.

Drugi sposób polega na możliwie dokładnym obliczaniu wartości wskaźników cząstkowych, charakteryzujących poszczególne elementy składowe ryzyka, przy czym wskaźniki te traktuje się jako miary prawdopodobieństwa zaistnienia poszczególnych zdarzeń. W takim ujęciu wskaźniki cząstkowe mają wartości nie większe od jedności, a wskaźnik charakteryzujący wypadkowy poziom ryzyka, jako iloczyn wskaźników składowych, przyjmuje wartości z przedziału [0,1]. Warto zauważyć, że w takim ujęciu (probabilistycznym), jednym z zasadniczych problemów jest konieczność wartościowania konsekwencji wypadków w zależności od ciężkości urazu [68]. Ustalanie wzajemnej zależności ilościowej pomiędzy skutkami, przykładowo, wypadku śmiertelnego i wypadku lekkiego (z świadomością, że granica pomiędzy wypadkiem lekkim i ciężkim jest zwykle umowna) i próba traktowania ich w kategoriach ekonomicznych mogą napotykać opory albo być obciążone znacznym udziałem czynnika subiektywnego. Trzeba przy tym mieć świadomość, że podstawą metod obliczeniowych, stosowanych w określaniu prawdopodobieństwa, jest odpowiednio duża, statystycznie wiarygodna liczba danych. Nie jest ona zwykle dostępna, zwłaszcza w odniesieniu do szczególnych informacji mogących mieć znaczenie przy ocenie okoliczności i skutków specyficznych, jednostkowych wypadków związanych z zagrożeniami elektrycznymi w zakładach górniczych.

3.3. Propozycja metody analizy i oceny ryzyka związanego z użytkowaniem urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej w warunkach kopalnianych

3.3.1. Elementy i czynniki ryzyka oraz zasady oceny ich stanu

Przegląd ważniejszych zasad i metod stosowanych w analizie i ocenie ryzyka (rozdz. 3.2), wskazuje na różnorodność podejścia do oceny ilościowej. Świadczy to o złożoności zagadnienia, a także o celowości indywidualnego traktowania różnych sytuacji, zwłaszcza tych,

które mogą prowadzić do sporadycznych wypadków o bardzo poważnych następstwach, lub w których mamy do czynienia ze specyficznymi warunkami, nie spotykanymi gdzie indziej. Do takich sytuacji należą zagrożenia elektryczne związane z użytkowaniem urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej w podziemiach kopalń.

Dlatego też na potrzeby niniejszej pracy opracowano metodykę oceny ilościowej ryzyka, łączącą wnioski wynikające z analizy teoretycznej zjawisk prowadzących do powstawania zagrożeń elektrycznych, z doświadczeniami praktyki w zakresie ich ograniczania oraz z wymaganiami i zaleceniami normalizacyjno-przepisowymi, uwzględniającą przedstawione w rozdz. 3.2 zasady.

Analiza teoretyczna jest niezbędna i stanowi punkt wyjścia pozwalający przewidywać sytuacje stwarzające największe zagrożenie, mimo że prawdopodobieństwo wystąpienia takich sytuacji może być niewielkie. Prawdopodobieństwo to nie jest zresztą znane i trudno sobie niejednokrotnie wyobrazić sposób zbierania danych umożliwiających jego określenie na potrzeby praktyczne. Wyniki obliczeń teoretycznych w niektórych przypadkach nie będą mogły być weryfikowane badaniami. Spowodowane to jest zbyt dużym ryzykiem z nimi związanym (np. badanie rezystancji ciała człowieka wzdłuż rzeczywistych, zróżnicowanych dróg przepływu prądu rażeniowego, w zróżnicowanych warunkach środowiskowych) lub znacznymi trudnościami techniczno-organizacyjnymi przy planowaniu i realizacji takich badań (np. badanie rozkładów napięć dotykowych w różnych stanach pracy sieci trakcyjnej). Czasem analiza teoretyczna może być próbą zilustrowania i uzasadnienia rzeczywistych sytuacji wypadkowych. Szczegółowość i poprawność wniosków uzależniona jednak jest wówczas od szczegółowości danych zebranych w ramach dochodzenia powypadkowego. Często dane te są niewystarczające, zwłaszcza w odniesieniu do zagadnień, których stan poznania naukowego stale jeszcze nie jest pełny.

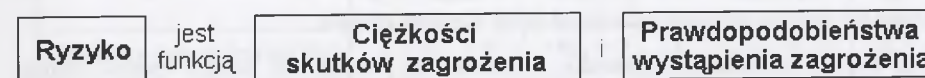
Rozważania teoretyczne powinny nawiązywać do doświadczeń praktycznych i wymagań bądź zaleceń normalizacyjno-przepisowych w zakresie ograniczania zagrożeń. W odniesieniu do zagrożeń stwarzanych przez prądy błądzące w zakładach górniczych można się oprzeć na względnie szczegółowych ustaleniach polskiej normy [89, 90, 91] i stosownego rozporządzenia Ministra Gospodarki [101, 102, 105, 107, 108]. Zagrożenie porażeniowe od urządzeń trakcji elektrycznej natomiast nie znajduje aktualnie wystarczającego odzwierciedlenia w istniejących normach. W normie dotyczącej budowy sieci trakcji elektrycznej dołowej [93] wymienione są wprawdzie zalecane środki ochrony przeciwporażeniowej, ale brakuje szczegółów pozwalających uwzględnić, przykładowo, warunki środowiskowe i ograniczenia ergonomiczne właściwe dla wyrobisk podziemnych. Jest to jednocześnie zagadnienie na tyle specy-

ficzne, że ustalenia normalizacyjne dotyczące ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach elektrycznych w obiektach budowlanych [np. 99] mogą być podstawą ogólnych tylko założeń i podjęcie próby uwzględnienia warunków znacznie odbiegających od przyjmowanych powszechnie jest niezbędne.

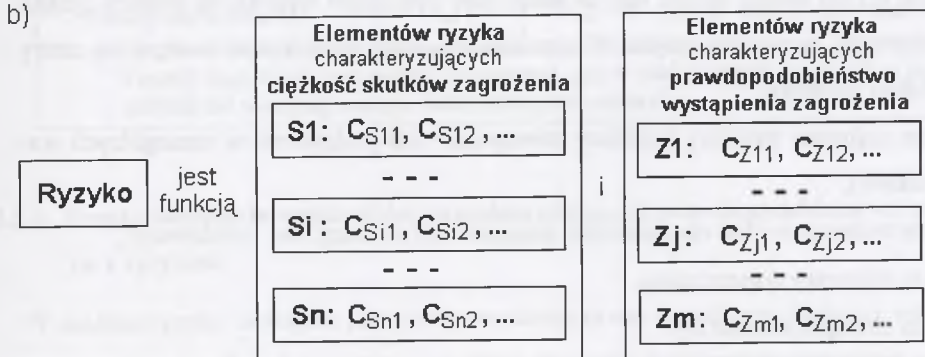
W proponowanej metodyce oceny ryzyka nie przewiduje się ustalenia ilościowego kryterium dopuszczalności ryzyka (w tym zwłaszcza ryzyka wypadku śmiertelnego). Ustalenie takich kryteriów w wielu przypadkach jest bardzo trudne i wymaga podjęcia wyważonej decyzji uwzględniającej rozważania natury społecznej, ekonomicznej oraz politycznej [96].

W odniesieniu do ryzyka związanego z wykonywaniem pracy określonej grupy zawodowej korzystniejsze wydaje się poprzestanie na określeniu jakościowych kryteriów umownych, łatwych do analizy i opisu praktycznego. Nieuniknione będą kryteria umowne, w których trudne do obliczenia prawdopodobieństwa przyjmowane będą jako równe 0 lub 1.

a)



b)



Rys. 3.2. Przyjęta w pracy definicja ryzyka (a) i bardziej szczegółowy opis elementów składowych ryzyka stosowany przy jego ocenie (b)

Fig. 3.2. The definition of risk assumed in the paper (a) and more detailed description of the risk elements used for risk assessment (b)

Traktując ryzyko jako funkcję dwóch składników: ciężkości skutków zagrożenia i prawdopodobieństwa jego wystąpienia (rys. 3.2a), proponuje się każdy z tych składników analizować dwustopniowo. W tym celu wyróżniono **czynniki ryzyka** i **elementy ryzyka**. Czynniki ryzyka są to podlegające analizie (ocenie) niezależne pojedyncze zjawiska, zdarzenia, cechy,

czynności lub zachowania składające się w odpowiednim połączeniu na zaistnienie wypadku lub powstanie warunków wpływających na jego skutki. Odpowiednio (skojarzone?) zgrupowane czynniki ryzyka składają się na **elementy ryzyka**, czyli niezależne zjawiska lub zdarzenia złożone, których jednoczesne wystąpienie w wystarczającym stopniu opisuje ciężkość skutków lub prawdopodobieństwo zaistnienia określonego zagrożenia w określonych warunkach.

Elementy ryzyka składające się na ciężkość skutków zagrożenia oznaczono symbolami $S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n$, a czynniki ryzyka związane z tymi elementami odpowiednio symbolami $C_{S11}, C_{S12}, \dots, C_{S1i}, \dots, C_{S1n}, \dots$ (rys. 3.2b). Podobnie, symbolami $Z_1, Z_2, \dots, Z_j, \dots, Z_m$ oznaczono elementy ryzyka określające prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia, a czynniki ryzyka opisujące te elementy symbolami $C_{Z11}, C_{Z12}, \dots, C_{Zj1}, \dots, C_{Zm2}, \dots$.

Każdemu z elementów ryzyka można przypisać pewną miarę liczbową charakteryzującą wpływ na poziom ryzyka. Sposób określenia poszczególnych miar wynika ze szczegółowego opisu czynników ryzyka składających się na dany element ryzyka.

Czynniki ryzyka (pojedyncze zjawiska, zdarzenia itp.) mogą być bardzo zróżnicowane, przy czym część z nich może mieć charakter czynników niemierzalnych. Analizując określony czynnik ryzyka należy ocenić jego aktualny stan pod kątem wpływu na element ryzyka i w konsekwencji, na poziom ryzyka. W tym celu proponuje się wyróżnić następujące cztery stany każdego czynnika:

- stan najlepszy możliwy (możliwy teoretycznie lub praktycznie w szczególnych warunkach),
- stan technicznie i/lub ekonomicznie uzasadniony (zalecany, ew. oczekiwany),
- stan najgorszy dopuszczalny,
- stan niedopuszczalnie zły.

Każdemu stanowi należy następnie przypisać umowną wagę liczbową, która stanowić będzie podstawę do obliczania wskaźników charakteryzujących prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia i prawdopodobieństwo wystąpienia ciężkości skutków.

W przypadku czynników ryzyka określonych wieloma parametrami lub oceny łącznego efektu kilku czynników, wypadkowy stan powinien wynikać z średniej ocen cząstkowych. Proponowane wartości wag przypisywanych czynnikom ryzyka przedstawiono w tablicy 3.4. Można posługiwać się wartościami bezwzględnymi wag lub ich wartościami względnymi, odniesionymi do największej możliwej wagi bezwzględnej, równej 4. Wypadkowy wskaźnik liczbowy stanu czynnika ryzyka obliczyć można jako średnią arytmetyczną.

Podstawą przypisania wagi liczbowej czynnikowi powinna być możliwie wszechstronna analiza jego natury, zgodności z wymaganiami, ale i możliwościami realizacji w określonych warunkach. Wartości przybliżone przyjmowane mogą być wstępnie, w przypadkach, gdy nie ma podstaw (możliwości) do oceny dokładniejszej.

Tablica 3.4

Umowne wartości wag liczbowych przyporządkowanych poszczególnym stanom czynników ryzyka

Ocena stanu czynnika ryzyka	Umowne wartości wag liczbowych przyporządkowane stanom czynników ryzyka			
	wartości bezwzględne		wartości względne	
	przedział wartości	wartości przybliżone	przedział wartości	wartości przybliżone
Najlepszy możliwy	$0^*)$	0	$0^*)$	0
	$0 < W_{nm} \leq 1$	$W_{nm} = 1$	$0 < w_{nm} \leq 0,25$	$w_{nm} = 0,25$
Zalecany (uzasadniony t/e)	$1 < W_z \leq 2$	$W_z = 2$	$0,25 < w_z \leq 0,50$	$w_z = 0,50$
Najgorszy dopuszczalny	$2 < W_d \leq 3$	$W_d = 3$	$0,50 < w_d \leq 0,75$	$w_d = 0,75$
Niedopuszczalnie zły	$3 < W_{nd} \leq 4$	$W_{nd} = 4$	$0,75 < w_{nd} \leq 1,00$	$w_{nd} = 1,00$
*) Wartość wagi równą zero należy przyjmować, gdy w zakładzie górniczym lub w jego pobliżu nie występuje trakcja elektryczna przewodowa ² .				

3.3.2. Zasady określania wskaźników charakteryzujących prawdopodobieństwa związane z ryzykiem

W analizie ryzyka niezbędne jest przeprowadzenie oceny prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia i prawdopodobieństwa wystąpienia ciężkości skutków tego zagrożenia.

Ocena prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia polega w większości przypadków na zakwalifikowaniu spodziewanej częstości wystąpienia zagrożenia do jednego z kilku umownych przedziałów. Analizując czynniki ryzyka związanego z zagrożeniami, w których nie ma możliwości jednoznacznego zdefiniowania prawdopodobieństwa poszczególnych zdarzeń i analizowania ich rozkładów zgodnie z zasadami rachunku prawdopodobieństwa, przyjmuje się zwykle 3 do 5 przedziałów określonych bardziej intuicyjnymi niż ilościowymi kwalifika-

² Nie dotyczy to sytuacji, gdy źródła prądu błędzącego wywoływane mogą być innymi niż trakcja elektryczna przewodowa przyczynami prądów błędzących.

torami. W tabelicy 3.5 zestawiono najczęściej stosowane umowne przedziały prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia przy analizie ryzyka.

Zważywszy, że do oceny czynników ryzyka decydujących o wystąpieniu zagrożenia zastosowano kryterium czterostopniowe, z możliwością przypisania czynnikowi wagi równej zero, gdy w zakładzie górnym nie występuje trakcja elektryczna przewodowa (por. tablica 3.4), za bardziej przydatne w analizie ryzyka związanego z użytkowaniem urządzeń trakcji elektrycznej dołowej można uznać równoważne podziały prawdopodobieństwa przedstawione w kolumnach 1 i 2 tabelicy 3.5.

Wartość liczbowa wskaźnika p_z będącego podstawą oceny prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia Z_j (elementy Z_j i czynniki C_{Z_j} rys. 3.2b) obliczyć można z wyrażenia:

$$p_{Z_j} = \frac{\sum_{a=1}^k W_{Z_a}}{4k} \Rightarrow P\{Z_j\} \quad (3.2a)$$

w którym

W_{Z_a} – wartość liczbowa wagi charakteryzująca stan określonego czynnika,

k – liczba ocenianych czynników,

$P\{Z_j\}$ – prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia.

Tablica 3.5

Określenia używane do oceny prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia

Określenie przewidywanego prawdopodobieństwa wg:		
[72]	[74]	[100]
1	2	3
Częste	częste	wysoce prawdopodobne
Prawdopodobne	możliwe	prawdopodobne
Czasami	okazjonalne	
Niewielkie	nikłe	mało prawdopodobne
Nieprawdopodobne	nieprawdopodobne	

Podobnie wartości wskaźnika p_s charakteryzującego prawdopodobieństwo wystąpienia ciężkości skutków S_j (elementy S_j i czynniki C_{S_j} , rys. 3.2) obliczyć można z wyrażenia:

$$p_{S_j} = \frac{\sum_{a=1}^k W_{S_a}}{4k} \Rightarrow P\{S_j\} \quad (3.2b)$$

Poszczególnym poziomom ocenianego prawdopodobieństwa odpowiadać będą wówczas wartości wskaźnika p zestawione w tabelicy 3.6.

Tablica 3.6

Zasady określania umownego poziomu prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia na podstawie wartości wskaźników p_{Z_j} i p_{S_j} ze wzoru (3.2)

Umowny symbol kategorii prawdopodobieństwa ^{*)}	Określenie przewidywanego prawdopodobieństwa	Wartość wskaźnika $p_{Z(S_j)}$ wg wzoru (3.2)
A	częste (pewne)	$0,75 < p_{Z(S_j)} \leq 1,00$
B	możliwe (prawdopodobne)	$0,50 < p_{Z(S_j)} \leq 0,75$
C	okazjonalne (czasami)	$0,25 < p_{Z(S_j)} \leq 0,50$
D	nikłe (niewielkie)	$0,00 < p_{Z(S_j)} \leq 0,25$
E	nieprawdopodobne (niemożliwe)	$p_{Z(S_j)} = 0$

^{*)} Oznaczenia literowe występują w niektórych opracowaniach [np. 72] i wykorzystywane są do symbolicznego zapisu sposobu oceny wskaźnika ryzyka

Oprócz elementów lub czynników ryzyka, dla których stosując odpowiednią analizę można wyznaczyć wskaźniki prawdopodobieństwa wg wzoru (3.2), występują takie zdarzenia (zjawiska, czynności, zachowania się osób), których możliwość zaistnienia rozpatrywana może być jedynie w kategoriach: pewne – niemożliwe. Przykładem może być próba oceny prawdopodobieństwa ciężkości skutków niekontrolowanego odpalenia zapalnika elektrycznego pod wpływem prądów błądzących. Są to wypadki na tyle rzadkie, że nie ma możliwości przeprowadzenia statystycznej oceny. Z kolei technika wykonywania robót strzelniczych z wykorzystaniem zapalników elektrycznych (w ramach której strzałowy ma bezpośredni kontakt z obwodem strzałowym i z górotworem) nie upoważnia do ilościowych rozważań szans uniknięcia najcięższych obrażeń. W takich przypadkach proponuje się prawdopodobieństwo określać wg zasad przedstawionych w tabelicy 3.7.

Tablica 3.7

Zasady szacowania prawdopodobieństwa w przypadku braku możliwości przeprowadzenia racjonalnej analizy okoliczności wystąpienia zagrożenia lub ciężkości skutków

Zastosowane środki techniczne lub organizacyjne	Prawdopodobieństwo wystąpienia elementu ryzyka (zagrożenia lub ciężkości skutków)	
	określenie przewidywanego prawdopodobieństwa	wartość wskaźnika liczbowego prawdopodobieństwa P_{ψ} (P_{zj})
Zastosowanie środków technicznych jednocześnie eliminujących jeden z niezależnych elementów ryzyka przed podjęciem działania lub rezygnacja z działania albo świadome zastosowanie i przestrzeganie podczas działania wszystkich procedur i zasad bezpiecznej pracy określonych w obowiązujących dokumentach (np. w dokumencie bezpieczeństwa)	nieprawdopodobne (niemożliwe)	0
Działanie nie spełniające powyższych wymagań	częste (pewne)	1

Szacowanie prawdopodobieństwa zgodnie z tablicą 3.7 pociąga za sobą następujące konsekwencje:

- po przypisaniu określonemu zagrożeniu wskaźnika prawdopodobieństwa skutków najcięższych równego jeden (np. w wyniku stwierdzenia świadomego pominięcia choćby jednej z procedur lub zasad bezpiecznej pracy), poziom ryzyka określony będzie wyłącznie prawdopodobieństwem wystąpienia tego zagrożenia,
- możliwość przypisania jednemu z elementów charakteryzujących powstawanie zagrożenia wskaźnika prawdopodobieństwa równego zero zwalnia z analizy pozostałych elementów.

3.3.3. Ryzyko oceniane doraźnie i perspektywnie

Ryzyko powinno być oceniane w dwóch perspektywach. Pierwsza perspektywa związana jest z ryzykiem odniesionym do pojedynczego zdarzenia (każdej z planowanych lub realizowanych prac bądź czynności), niezależnie od liczby i częstości ich zaistnienia. W tej perspektywie ocenia się ryzyko doraźnie (bieżąco), a podstawą oceny są wskaźniki charakteryzujące udział poszczególnych elementów (czynników) ryzyka, obliczone zgodnie ze wzorem (3.2).

Wypadkowy wskaźnik prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia ocenia się obliczając iloczyn wskaźników niezależnych elementów ryzyka:

$$P_Z = \prod_{j=1}^m P_{Zj} \Rightarrow P\{Z\} \quad (3.3)$$

w którym wartości wskaźników p_{zj} ustalane są indywidualnie na podstawie analizy czynników ryzyka.

Druga perspektywa wpisana jest w długofalowe zarządzanie bezpieczeństwem i dotyczy okresowej oceny ryzyka oraz jego prognozowania. Nie można wówczas pominąć elementu czasu i częstości zdarzeń. Czas trwania narażenia osób wykonujących określone prace lub znajdujących się w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej odpowiada zazwyczaj czasowi wykonywania tych prac lub pobytu w zagrożonym rejonie. Rozpatrując ten czas w dłuższej perspektywie można go zastąpić liczbą wykonywanych prac i jako podstawę oceny przyjąć ich częstość. Jednym ze sposobów (najbardziej szczegółowym i przekonywającym) uwzględniania wpływu częstości ekspozycji na zagrożenie w ocenie ryzyka jest propozycja siedmiostopniowego wskaźnika F wchodzącego w skład wskaźnika poziomu ryzyka WPR [68], por. rozdz. 3.2, wzór (3.1). Nie nadaje się ona wprawdzie do bezpośredniego wykorzystania, ale może stanowić punkt odniesienia.

Z siedmiostopniowej skali (por. tablica 3.8) dwie ostatnie częstości nie mają zastosowania np. przy prowadzeniu robót strzelniczych, natomiast dwie pierwsze można połączyć w jedną i wprowadzić nowe określenia, przypisując im umowny wskaźnik liczbowy p_c z przedziału (0,1].

Oceniając wpływ częstości ekspozycji na zagrożenie na ryzyko, należy dodatkowo uwzględnić organizację wykonywania prac i prowadzony nadzór, wyrażające się m. in. w świadomości ryzyka i sposobie monitorowania i ograniczania zagrożenia. Można się liczyć z dwoma sytuacjami:

- w systemie zarządzania bezpieczeństwem przewiduje się w odniesieniu do prac (np. robót strzelniczych) lub przebywania w pobliżu sieci trakcyjnej doraźną ocenę ryzyka przed każdym przystąpieniem do ich wykonywania,
- nie przewiduje się doraźnej oceny ryzyka.

W pierwszej sytuacji wartości wskaźnika p_C obliczyć można z wyrażenia:

$$p_C = \frac{n_{r(i)}}{n_{d,r}} \quad (3.4)$$

w którym

$n_{r(i)}$ – liczba prac wykonywanych (planowanych) w ciągu roku,

$n_{d,r}$ – liczba dni roboczych w ciągu roku.

Tablica 3.8

Zasady oceny wpływu częstości wykonywania prac lub przebywania w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej na ryzyko

Ocena wpływu częstości ekspozycji na zagrożenia na ryzyko wg [68]		Proponowany sposób oceny wpływu częstości ekspozycji na zagrożenia na ryzyko		
Określenie częstości	wskaźnik liczbowy F	określenie	wskaźnik liczbowy p_C	
			sytuacja a)	sytuacja b)
1	2	3	4	5
Bardzo rzadko	0,1	sporadycznie (rzadziej niż raz w roku)	<0,004	1
Raz w roku	0,2			
Raz w miesiącu	1,0	rzadko (rzadziej niż raz w miesiącu)	(0,004 ÷ 0,05)	1
Raz w tygodniu	1,5	często (raz w miesiącu lub częściej)	(0,05 ÷ 0,21)	1
Raz dziennie	2,5	stale (w każdym dniu roboczym lub kilka razy w tygodniu)	1	1
Raz na godzinę	4,0			
Ciągle	5,0			

Przyjmując liczbę dni roboczych $n_{d,r} = 251$ i liczby prac odpowiadające granicom przedziałów proponowanych częstości równe odpowiednio: $n_{r(1)} = 1$ (sporadycznie), $n_{r(2)} = 12$ (rzadko), $n_{r(3)} = 52$ (często) i $n_{r(4)} = 251$ (stale), otrzymamy wartości wskaźnika liczbowego p_C zestawione w kolumnie 4 tablicy 3.8.

Wskaźnik liczbowy prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia oblicza się wówczas ze wzoru (3.3) uzupełnionego o wskaźnik p_C :

$$P_Z \approx P_C \cdot \prod_{j=1}^m P_{Zj} \quad (3.5)$$

W drugiej sytuacji, przy braku doraźnej oceny ryzyka (monitorowania zagrożenia), wartość wskaźnika p_C należy przyjmować równą jeden i o poziomie ryzyka decydują tylko wskaźniki pozostałe.

3.3.4. Przyjęta skala poziomów ryzyka

Spośród przedstawionych w rozdz.3.2 różnych skal i możliwości oceny ryzyka, jako najbardziej odpowiednią w odniesieniu do ryzyka związanego z użytkowaniem urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej w podziemiach kopalń uznano ocenę w skali czterostopniowej. Zadecydowały o tym następujące argumenty:

- w skali trójstopniowej [100] brakuje stopnia pośredniego pomiędzy bezwzględnym zakazem wykonywania prac (ryzyko niedopuszczalne) i możliwością ich wykonywania (ryzyko dopuszczalne); uniemożliwia to wykonywanie prac dopuszczalnych warunkowo, tj. przy zachowaniu specjalnych środków ostrożności,
- wprowadzenie w miejsce ryzyka „średniego” dwóch innych stopni zwraca uwagę na konieczność zachowania szczególnej ostrożności w sytuacji, gdy to ryzyko zaczyna odgrywać „istotną” rolę (jest „wysokie” lub nawet „bardzo wysokie”), ale przy zachowaniu odpowiednich, dobieranych indywidualnie środków można je podjąć,

Tablica 3.9

Porównanie umownych poziomów ryzyka w różnych skalach

Określenie poziomu ryzyka w proponowanej skali czterostopniowej		Umowne poziomy ryzyka w skalach:	
		ośmiostopniowej [68]	trójstopniowej [100]
Brak ryzyka (BR)	Rt	akceptowalne	małe (dopuszczalne)
		bardzo małe	
Tolerowane	Ru	małe	Średnie (dopuszczalne)
		znaczące	
Istotne (rzeczywiste)	Ri	wysokie	
		bardzo wysokie	
Nietolerowane	Rnt	ekstremalne	Duże (niedopuszczalne)
		niedopuszczalne	

- skala ośmiostopniowa [68] jest zbyt rozbudowana, w związku z czym różnice pomiędzy sąsiednimi stopniami mogą być trudne do uchwycenia, a wynikające z nich zasady postępowania wzajemnie się pokrywają.

W tablicy 3.9 zestawiono proponowaną skalę czterostopniową (z dodatkowym wyróżnieniem w pierwszym stopniu sytuacji braku ryzyka) z innymi spotykanymi skalami.

3.3.5. Proponowane zasady oceny ryzyka

Ocena ryzyka polega na umownym najczęściej przypisywaniu albo kwalifikatora liczbowego, albo określenia odpowiadającego potocznemu rozumieniu słowa ryzyko, odpowiedniej kombinacji (iloczynowi) elementów ryzyka określających ciężkość skutków i prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia. Przykłady zasad przypisywania ryzyku kwalifikatorów liczbowych przedstawione są w tablicach 3.1 i 3.3.

Ścisłe określenie przewidywanej ciężkości następstw w odniesieniu do zagrożeń związanych z użytkowaniem trakcji elektrycznej przewodowej napotyka na trudności. Brak danych statystycznych, na podstawie których możliwe byłoby określenie empirycznego rozkładu prawdopodobieństwa ciężkości skutków, skłania do przyjęcia wariantu najgorszego, czyli zakwalifikowania ciężkości skutków do kategorii *duża* (wg tablicy 3.1), albo *krytyczna* lub *katastrofalna* (wg tablicy 3.3). W przypadku zagrożenia stwarzanego przez prądy błądzące przy robotach strzelniczych jest to założenie w pełni uprawnione. Przy rozpatrywaniu zagrożenia porażeniowego, analiza zaistniałych wypadków (por. rozdz.5.2) wskazuje na duży udział skutków śmiertelnych i ciężkich. Skłania to do przyjęcia, jako punktu odniesienia w analizie czynników ryzyka, kryterium wystąpienia patofizjologicznych skutków stwarzających zagrożenie życia (np. wystąpienie fibrylacji komór serca). Podejście takie charakterystyczne jest również w opracowaniach zasad oceny ryzyka porażenia prądem w instalacjach niskiego napięcia prądu przemiennego [51], w którym to przypadku dane statystyczne o wypadkach są znacznie bogatsze.

Konsekwencją przyjęcia takiej zasady jest traktowanie jako podstawy oceny poziomu ryzyka, analizy prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia i częstości ekspozycji na ryzyko. Propozycję sposobu przypisywania przyjętych, zgodnie z tablicą 3.9, umownych poziomów ryzyka określonym, obliczeniowym wartościom wskaźników prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia o dużej ciężkości następstw, przedstawiono w tablicy 3.10.

W przypadku gdy dostępny jest wiarygodny materiał badawczy, pozwalający z odpowiednim poziomem ufności przyjąć ciężkości następstw na poziomie średnim (skutki marginalne) lub małym (skutki nieistotne), poziom ryzyka można oceniać posługując się tablicami 3.11

Tablica 3.10

Zasady oceny ryzyka przy spodziewanej dużej ciężkości następstw
(skutkach katastrofalnych lub krytycznych)

Częstość wykonywania prac lub przebywania w pobliżu sieci trakcyjnej (pc)		Prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia P{Z} (wartość umownego wskaźnika prawdopodobieństwa)				
		nie-prawdopodobne ($p_z = 0$)	nikłe ($0 < p_z \leq 0,25$)	okazjonalne ($0,25 < p_z \leq 0,50$)	możliwe ($0,50 < p_z \leq 0,75$)	częste ($0,75 < p_z \leq 1,00$)
Prognozowanie i okresowa ocena ryzyka	prace sporadyczne	BR	Rt	Rt	Rt	Ru
	prace wykonywane rzadko	BR	Rt	Rt	Ru	Ri
	prace wykonywane często	BR	Rt	Ru	Ri	Rnt
Doraźna ocena ryzyka		BR	Rt	Ru	Ri	Rnt

Tablica 3.11

Zasady oceny ryzyka przy spodziewanej średniej ciężkości następstw
(skutkach marginalnych)

Częstość wykonywania prac lub przebywania w pobliżu sieci trakcyjnej (pc)		Prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia P{Z} (wartość umownego wskaźnika prawdopodobieństwa)				
		nie-prawdopodobne ($p_z = 0$)	nikłe ($0 < p_z \leq 0,25$)	okazjonalne ($0,25 < p_z \leq 0,50$)	możliwe ($0,50 < p_z \leq 0,75$)	częste ($0,75 < p_z \leq 1,00$)
Prognozowanie i okresowa ocena ryzyka	prace sporadyczne	BR	Rt	Rt	Rt	Rt
	prace wykonywane rzadko	BR	Rt	Rt	Rt	Ru
	prace wykonywane często	BR	Rt	Rt	Ru	Rnt
Doraźna ocena ryzyka		BR	Rt	Rt	Ru	Rnt

lub 3.12. Jednym z warunków zebrania takiego materiału statystycznego jest utworzenie szczegółowej bazy danych o wypadkach towarzyszących użytkowaniu trakcji elektrycznej przewodowej. Propozycję zasad utworzenia takiej bazy danych dla wypadków porażenia prądem elektrycznym przedstawiono w załączniku.

Tablica 3.12

Zasady oceny ryzyka przy spodziewanej małej ciężkości następstw (skutkach nieistotnych)

Częstość wykonywania prac lub przebywania w pobliżu sieci trakcyjnej (p_c)		Prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia $P\{Z\}$ (wartość umownego wskaźnika prawdopodobieństwa)				
		nie-prawdopodobne ($p_z = 0$)	nikłe ($0 < p_z \leq 0,25$)	okazjonalne ($0,25 < p_z \leq 0,50$)	możliwe ($0,50 < p_z \leq 0,75$)	częste ($0,75 < p_z \leq 1,00$)
Prognozowanie i okresowa ocena ryzyka	prace sporadyczne	BR	Rt	Rt	Rt	Rt
	prace wykonywane rzadko	BR	Rt	Rt	Rt	Rt
	prace wykonywane często	BR	Rt	Rt	Rt	Ru
Doraźna ocena ryzyka		BR	BR	Rt	Rt	Ru

4. RYZYKO ZWIĄZANE Z WYSTĘPOWANIEM PRĄDÓW BŁĄDZĄCYCH

4.1. Zagrożenia stwarzane przez prądy błędzące

4.1.1. Przyczyny prądów błędzących występujących w zakładach górniczych

Występowanie prądów błędzących, czyli prądów elektrycznych płynących w ziemi (górotworze) oraz w konstrukcjach metalowych nie będących elementami celowo dla tych prądów zbudowanego obwodu elektrycznego, jest w wyrobiskach podziemnych, a także na powierzchni zakładów górniczych, zjawiskiem powszechnym. Przyczyny występowania prądów błędzących mogą być różnorodne. Najczęściej występowanie prądów błędzących związane jest ze stosowaniem niektórych środków technicznych w zakładach górniczych lub poza nimi.

Należy tutaj wymienić:

- trakcję elektryczną przewodową,
- sieci elektroenergetyczne prądu przemiennego i stałego,
- konstrukcje metalowe, które stykając się z ośrodkiem elektrolitycznym mogą tworzyć ogniwa galwaniczne,
- spawarki elektryczne,
- środki automatyki i łączności wykorzystujące obwody ziemnopowrotne,
- urządzenia emitujące fale elektromagnetyczne.

Niezależnie od środków technicznych, przyczynami prądów błędzących mogą być również zjawiska pozatechniczne, takie jak:

- wyładowania atmosferyczne,
- prądy telluryczne,
- prądy spontanicznej polaryzacji.

Spośród wymienionych, do najważniejszych zalicza się zwykle trakcję elektryczną przewodową, a w niektórych przypadkach również sieci elektroenergetyczne prądu przemiennego i ogniwa galwaniczne, a w odniesieniu do odkrywkowych zakładów górniczych również wyładowania atmosferyczne.

4.1.2. Rodzaje zagrożeń stwarzanych przez prądy błędzące w warunkach zakładów górniczych

Prądy błędzące powodowane różnymi przyczynami rozprzyskują się w ziemi (górotworze) ze zróżnicowaną gęstością, przyczyniając się do powstawania różnic potencjałów pomiędzy

różnymi, przypadkowo skojarzonymi punktami, czyli do powstawania źródeł prądu błędzającego³. Występowanie w wyrobiskach kopalnianych źródeł prądu błędzającego stwarza wiele zagrożeń, z których na pierwszy plan wysuwa się **zagrożenie przy robotach strzelniczych (ZRS)** prowadzonych z użyciem zapalników elektrycznych. Zagrożenie to polega na możliwości przedostania się prądu błędzającego do obwodu strzałowego i – przy odpowiedniej wartości tego prądu – spowodowaniu przedwczesnego, niekontrolowanego odpalenia zapalnika. Oprócz zagrożenia przy robotach strzelniczych, prądy błędzące mogą być powodem:

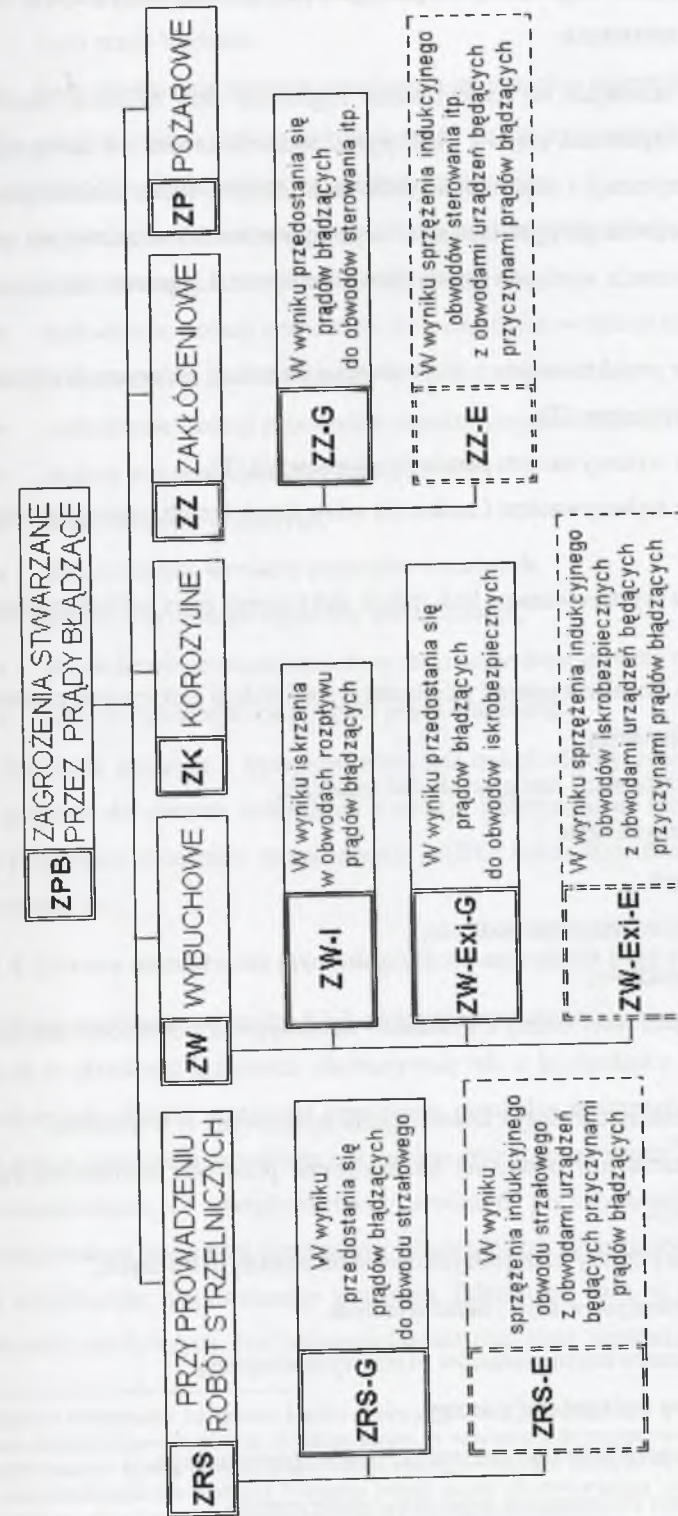
- wzrostu **zagrożenia pożarowego (ZP)** wskutek wydzielania się ciepła w obwodach ich rozplywu,
- wzrostu **zagrożenia wybuchowego (ZW)** w wyniku możliwości przedostania się ich do obwodów iskrobezpiecznych lub powstania iskry przy przypadkowym zwarciu lub rozwarciu źródła prądu błędzającego,
- **zakłóceń (ZZ)** w obwodach automatyki i sterowania maszyn górniczych,
- **korozji elektrolitycznej (ZK)** konstrukcji metalowych pośredniczących w ich rozplywie.

Rodzaje zagrożeń zestawiono na rys.4.1, zaznaczając linią przerywaną zagrożenia, do których dochodzić może w wyniku sprzężenia indukcyjnego. Sprzężenie takie występuje zwykle wówczas, gdy przyczyną prądów błędzących są urządzenia prądu przemiennego lub emitujące fale elektromagnetyczne [14, 15, 64, 81]; w mniejszym stopniu dotyczą więc urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej⁴.

Najistotniejsze znaczenie praktyczne w zakładach górniczych ma zagrożenie przy prowadzeniu robót strzelniczych, a także – w zakładach odkrywkowych oraz na powierzchni zakładów podziemnych – zagrożenie korozyjne. Nie można jednak wykluczyć możliwości wystąpienia innych zagrożeń, w związku z czym niezbędna jest analiza ryzyka związanego z prądami błędzącymi i kształtowanie świadomości, że każde działanie zmierzające do ograniczania powstawania i rozprzestrzeniania się prądów błędzących prowadzi również do ograniczenia ryzyka odnoszącego się do pozostałych zagrożeń.

³ Specyfika zagrożeń stwarzanych przez prądy błędzące w kopalniach sprawia, że celowe jest rozróżnienie **źródeł prądu błędzającego i przyczyn prądów błędzących**. Jako **źródło prądu błędzającego** traktowane są dwa dowolne punkty w wyrobisku kopalnianym, które mogą znaleźć się pod napięciem spowodowanym rozplywem prądów błędzących. **Przyczynami prądów błędzących** są natomiast środki techniczne i zjawiska pozatechniczne przyczyniające się do powstawania prądów błędzących.

⁴ Zjawiska elektromagnetyczne zachodzące np. podczas przerywanego kontaktu odbieraka prądu z przewodem jezdynym lub w podobnych sytuacjach, stanowią osobną grupę zagadnień podejmowanych w rozważaniach dotyczących kompatybilności elektromagnetycznej; wykraczają zatem poza zakres niniejszej pracy.



Rys. 4.1. Rodzaje zagrożeń stwarzanych przez prądy błędzące w zakładach górnictwa
Fig. 4.1. Types of hazards posed by stray currents in coal mines

4.1.3. Zdarzenia prowadzące do zagrożenia związanego z prądami błędzającymi przy wykonywaniu robót strzelniczych

Niekorzystne zdarzenia składające się na zaistnienie zagrożenia przy robotach strzelniczych, wynikającego z występowania prądów błędzających, podzielić można na następujące grupy, w zależności od kompetencji i odpowiedzialności osób (działów ruchu zakładu górniczego) uczestniczących w procesie przygotowywania i wykonywania robót strzelniczych oraz w procesie analizy i ograniczania występowania prądów błędzających i zagrożeń związanych z tymi prądami:

- a) zdarzenia związane z projektowaniem i eksploatacją sieci trakcji elektrycznej przewodowej w zakładzie górnicy (T),
- b) zdarzenia związane z wykonywaniem pomiarów okresowych (P),
- c) zdarzenia związane z wykonywaniem i nadzorem robót strzelniczych (obwodów strzałowych) (N),
- d) zdarzenia związane z występowaniem linii trakcji elektrycznej poza zakładem górnicy (TP).

Do zdarzeń związanych z projektowaniem i eksploatacją sieci trakcji elektrycznej przewodowej w zakładzie górnicy należą:

- niewłaściwe usytuowanie stacji zasilających sieć trakcyjną,
- zły stan złączy podłużnych szyn,
- nadmierne zużycie szyn,
- nieodwodnione lub/i nieczyszczone podtorze,
- błędne obliczenia projektowe,
- przypadkowe połączenie sieci dolnej z systemem uziemiających przewodów ochronnych (SUPO),
- przypadkowe połączenie sieci dolnej z konstrukcjami metalowymi w wyrobisku,
- niewłaściwe prowadzenie liny powrotnej (dodatkowego przewodu zmniejszającego rezystancję sieci dolnej),
- zły stan złączy izolujących tory niezelektryfikowane od zelektryfikowanych,
- sprzyjający rozkład potencjałów szyn i układ wyrobisk.

Zdarzenia związane z wykonywaniem pomiarów okresowych obejmują:

- brak kwalifikacji osoby wykonującej pomiary,
- użycie niewłaściwego przyrządu (lub zakresu przyrządu) pomiarowego,
- brak informacji o typach stosowanych zapalników elektrycznych,

- brak ponownego wykonania pomiarów po zastosowaniu przedsięwzięć ograniczających prądy błędzające,
- brak przekazania służbom strzałowym informacji o zagrożeniu.

Ze zdarzeń związanych z wykonywaniem robót strzelniczych (obwodów strzałowych) i w ramach ich nadzoru należy uwzględnić następujące:

- użycie w linii strzałowej przewodów o uszkodzonej izolacji,
- brak okresowej kontroli linii strzałowej,
- uszkodzenie izolacji przewodów linii strzałowej w trakcie robót,
- brak zwieracza linii strzałowej,
- uszkodzenie izolacji przewodów zapalnikowych w trakcie robót,
- błędnie wykonane pomiary doraźne,
- brak pomiarów doraźnych,
- zlekceważenie wyników pomiarów doraźnych,
- użycie zbyt czułego zapalnika elektrycznego,
- niewłaściwie prowadzone roboty strzelnicze dopuszczalne warunkowo,
- brak ekwipotencjalizacji źródeł prądu błędzającego.

Zdarzenia związane z występowaniem linii trakcji elektrycznej poza zakładem górnicy są podobne do zdarzeń związanych z trakcją elektryczną na terenie zakładów górnicy, z wyłączeniem elementów specyficznych (SUPO, konstrukcje metalowe w wyrobiskach, lina powrotna itp.).

4.1.4. Drzewo niezdatności prowadzących do zagrożenia przy robotach strzelniczych

Wyszczególnione w rozdz. 4.1.3 zdarzenia przyczynić się mogą do zagrożenia, jeżeli wystąpią w określonej kolejności, alternatywnie lub w koniunkcji z innymi. Jedną z metod pozwalających określić wzajemne powiązanie pomiędzy poszczególnymi zdarzeniami i ocenić ich rolę w zaistnieniu zagrożenia jest *analiza drzewa niezdatności*⁵ [74, 94, 96]. Polega ona na uporządkowaniu (z uwzględnieniem powiązań przyczynowo-skutkowych) i graficznym przedstawieniu warunków i czynników powodujących lub przyczyniających się do pojawienia się określonego, niepożądanego zdarzenia. Zdarzeniem tym, w przypadku zagrożenia przy robotach strzelniczych, jest niekontrolowane odpalenie zapalnika elektrycznego. Na rysun-

⁵ Drzewo niezdatności lub drzewo błędów (nazwy zgodne z [94 i 96]) bywa w literaturze (np. [47, 71, 72]) nazywane również drzewem zdarzeń. Zdaniem autora, w odniesieniu do rozpatrywanej w pracy problematyki nazwa drzewo zdarzeń byłaby bardziej odpowiednia, choćby ze względu na to, że nie wszystkie analizowane zdarzenia są niezdatnościami (lub błędami). Ponieważ jednak nazwa „drzewo zdarzeń” dotyczy w normie [96] innej metody analizy, zdecydowano się na przyjęcie nazwy „drzewo niezdatności”.

kach 4.2 do 4.4 przedstawiono opracowane drzewo niezdatności (zdarzeń cząstkowych) prowadzących do zaistnienia takiego zdarzenia.

Na podstawie drzewa niezdatności napisać można zależności logiczne, które po przekształceniu ułatwiają wskazanie zdarzeń najistotniejszych dla wystąpienia zagrożenia. Przykładowo, gałąź, której szczytowym zdarzeniem jest Z2 („Prąd błądzący w obwodzie ZE” – rys. 4.2), można opisać równaniami logicznymi:

$$Z2 = N1 \cdot N2; \quad N2 = N3 + N4; \quad N4 = N5 + N6; \quad N5 = N7 + N8 \quad (4.1)$$

Po przekształceniu otrzymamy wyrażenie wskazujące na występowanie czterech minimalnych przekrojów zagrożenia (przekrojów niezdatności [94]):

$$Z2 = N1 \cdot N3 + N1 \cdot N6 + N1 \cdot N7 + N1 \cdot N8, \quad (4.2)$$

czyli zbiorów zdarzeń, które muszą wystąpić jednocześnie, by zaistniało zdarzenie Z2. Są to zdarzenia: (N1 i N3), (N1 i N6), (N1 i N7) oraz (N1 i N8). Z minimalnych przekrojów zagrożenia wynika bardzo istotna rola zwieracza linii strzałowej, który powinien być zamknięty do chwili przyłączenia przewodów linii do zapalarki. Stanowi on element nadmiarowy (redundancyjny), zapewniający bezpieczeństwo w przypadkach uszkodzenia lub braku kontroli izolacji przewodów linii strzałowej albo przewodów zapalnikowych.

Z kolei zdarzenie Z3 (por. rys. 4.2), polegające na wystąpieniu źródła prądu błądzącego o prądzie zewnętrznym większym od prądu bezpiecznego zapalnika elektrycznego (lub energii przekraczającej minimalny impuls zapłonowy), opisane jest między innymi równaniem:

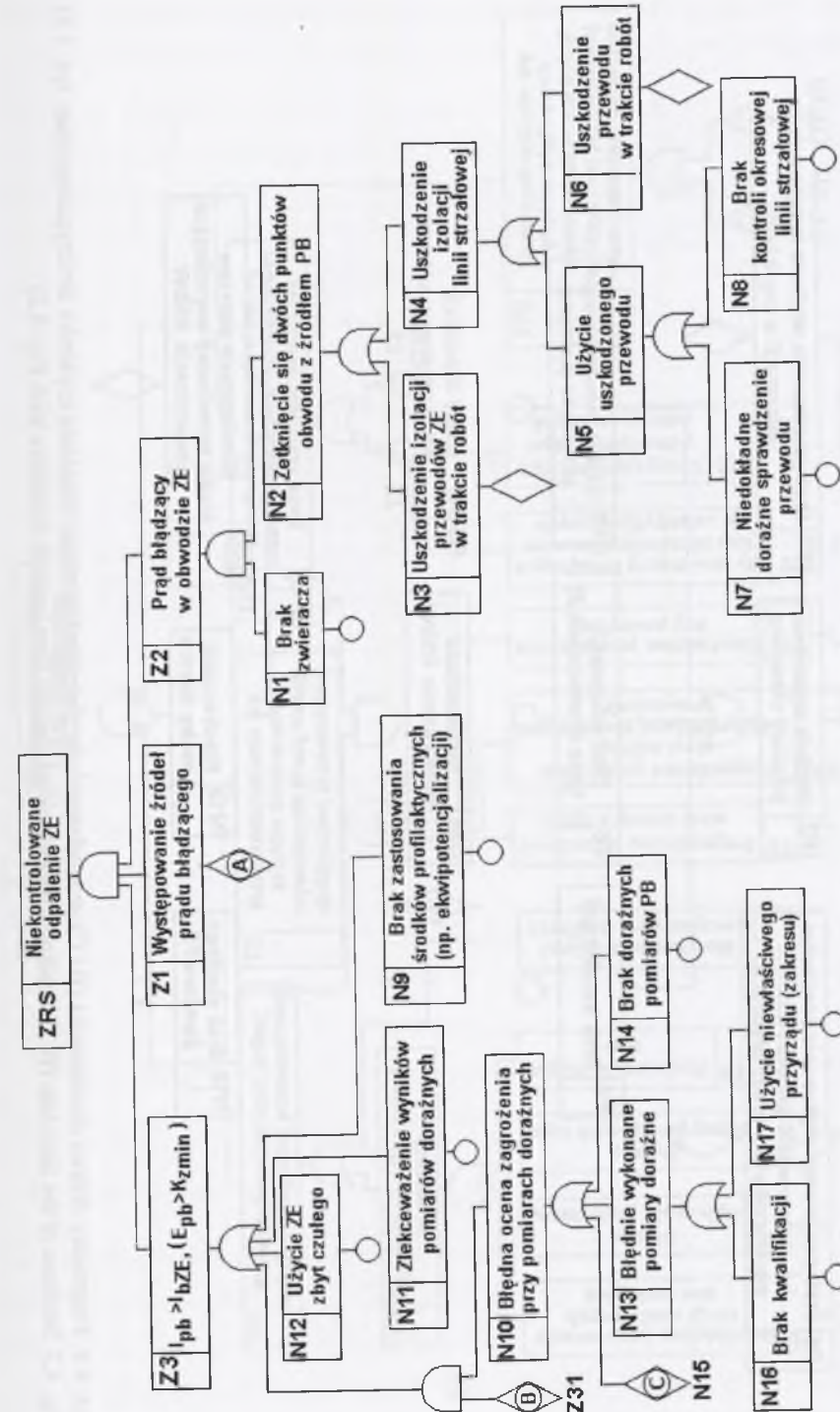
$$Z3 = Z31 \cdot N10 + N9 + N11 + N12 \quad (4.3)$$

Z przekształconej postaci (por. rys. 4.3b):

$$Z3 = P1 \cdot S10 + P2 \cdot S10 + P3 \cdot N10 + N9 + N11 + N12 \quad (4.4)$$

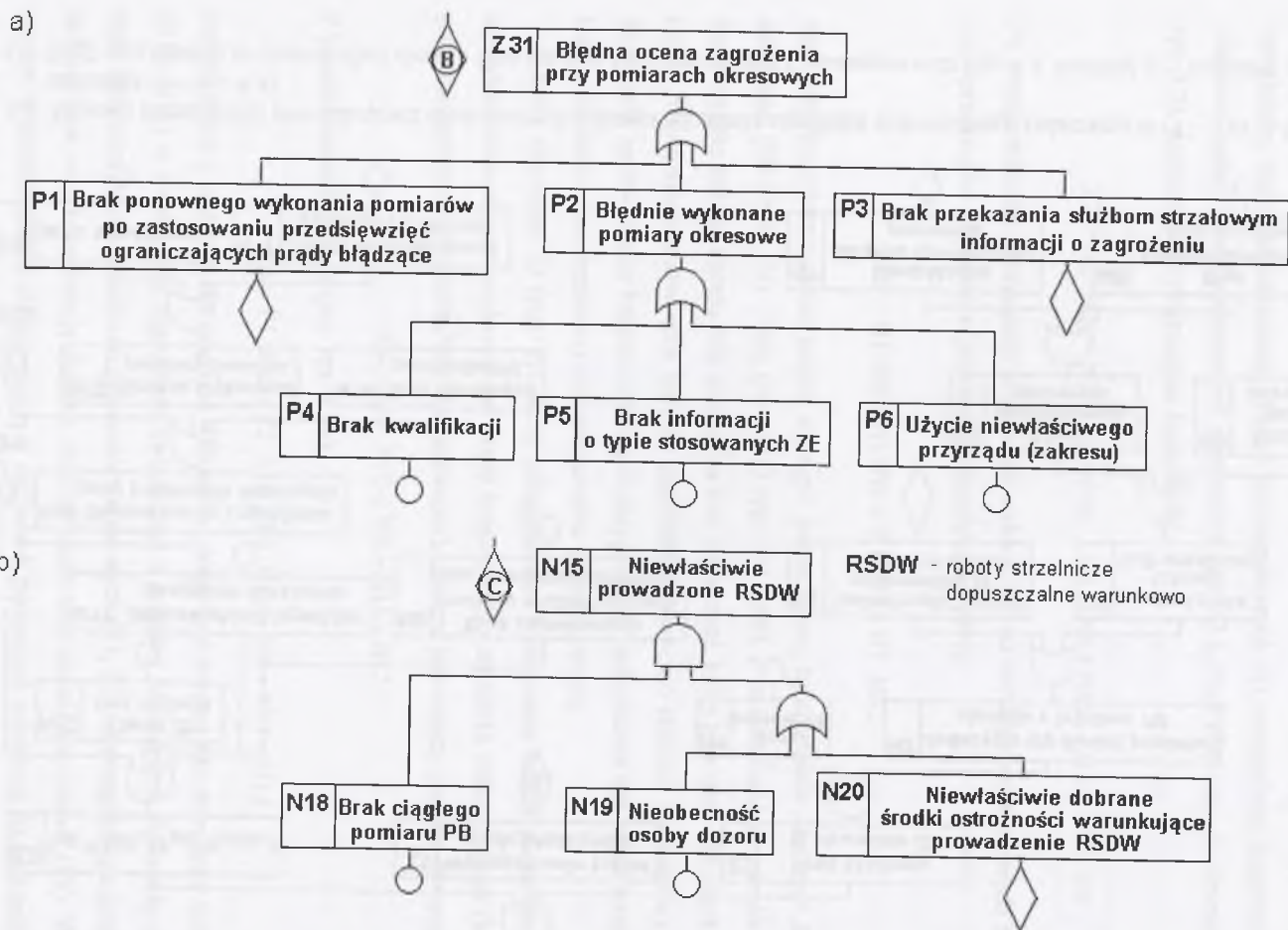
wynika jeden z ważnych dla praktyki wniosków, dotyczący istotnej roli pomiarów doraźnych (N10, N11) w zwalczaniu zagrożenia związanego z prądami błądzącymi. Stanowią one element nadmiarowy w stosunku do pomiarów okresowych (P1, P2) i wymagań organizacyjnych mających na celu koordynację działań różnych służb przy ocenie zagrożenia (P3). Wniosek ten stoi w sprzeczności z obserwowaną w zakładach górniczych tendencją do unikania wykonywania tych pomiarów.

W podobny sposób analizować można pozostałe gałęzie i całe drzewo.



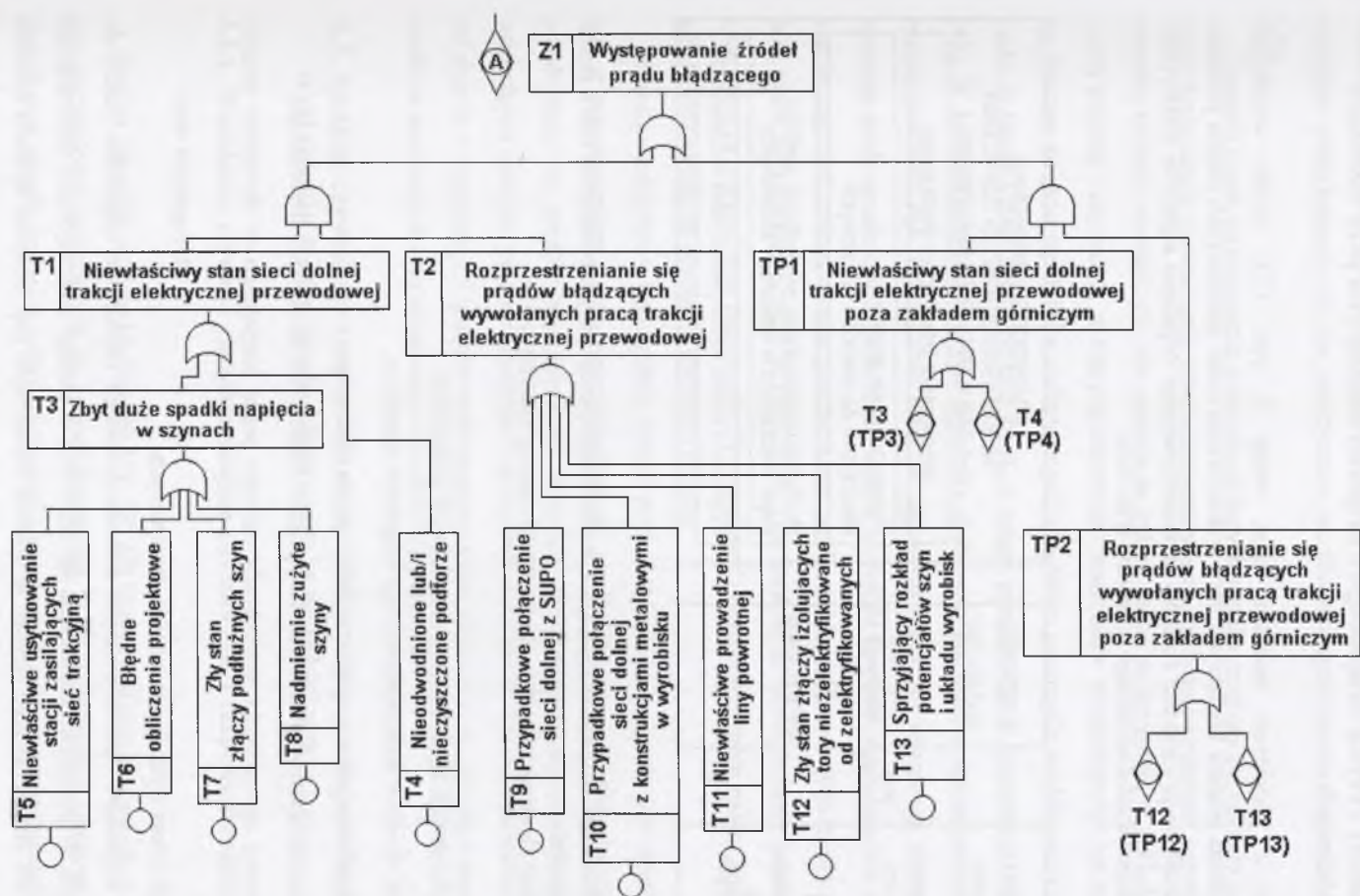
Rys. 4.2. Drzewo niezdatności prowadzących do niekontrolowanego odpalenia zapalnika elektrycznego (zdarzenia B i C – rys. 4.3, zdarzenie A – rys. 4.4)

Fig. 4.2. Fault tree leading to uncontrolled electric fuse ignition (incidents B and C – compare with Fig. 4.3, incident A – compare with Fig. 4.4)



44

Rys. 4.3. Fragmenty drzewa niezdatności (B i C) prowadzących do niekontrolowanego odpalenia zapalnika elektrycznego (por. rys. 4.2)
 Fig. 4.3. Sections of the fault tree (B, C) leading to uncontrolled electric fuse ignition (compare with Fig. 4.2)

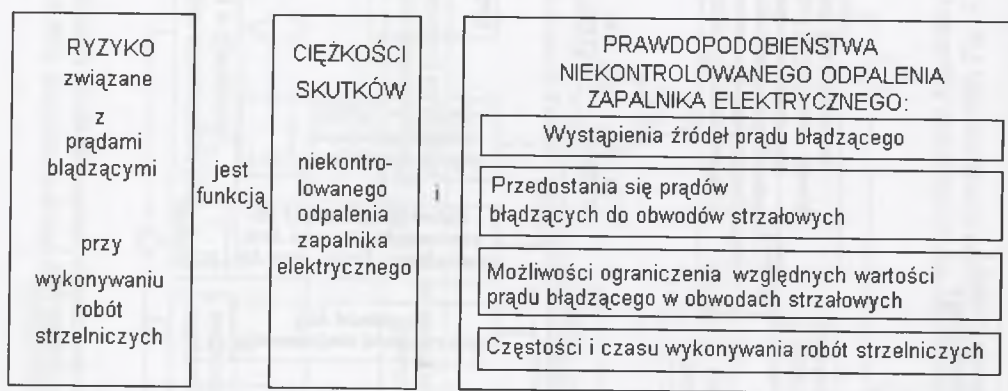


45

Rys. 4.4. Fragment drzewa niezdatności (A) prowadzących do niekontrolowanego odpalenia zapalnika elektrycznego (por. rys. 4.2)
 Fig. 4.4. Sections of the fault tree (A) leading to uncontrolled electric fuse ignition (compare with Fig. 4.2)

4.2. Elementy ryzyka związanego z prądami błędzającymi przy robotach strzelniczych

Zgodnie z przyjętymi zasadami (por. rozdz. 3, rys. 3.2), ryzyko wynikające z występowania prądów błędzających przy wykonywaniu robót strzelniczych można przedstawić jako kombinację ciężkości skutków niekontrolowanego odpalenia zapalnika elektrycznego i prawdopodobieństwa takiego odpalenia (rys. 4.5).



Rys. 4.5. Elementy ryzyka związanego z prądami błędzającymi przy prowadzeniu robót strzelniczych

Fig. 4.5. Risk elements related to stray currents during blasting works

Na ryzyko składa się zatem pięć niezależnych elementów:

- ciężkość skutków niekontrolowanego odpalenia zapalnika,
- prawdopodobieństwo wystąpienia źródeł prądu błędzającego,
- prawdopodobieństwo przedostania się prądów błędzających do obwodu strzałowego,
- możliwości ograniczenia względnych wartości prądu błędzającego w obwodach strzałowych,
- częstość i czas wykonywania robót strzelniczych.

Skutki wypadków spowodowanych niekontrolowanym odpaleniem zapalnika należą do najcięższych. W przypadku znalezienia się człowieka w zasięgu oddziaływania detonującego zapalnika nie umieszczonego jeszcze w otworze strzałowym (np. podczas łączenia obwodu strzałowego) lub w pobliżu detonującego materiału wybuchowego wprowadzonego już do otworu strzałowego nie można wykluczyć poważnych uszkodzeń ciała i skutków śmiertelnych. Należy się również liczyć z możliwością zaistnienia wypadków zbiorowych. W ramach

aktualnie istniejącej techniki wykonywania robót strzelniczych z użyciem tradycyjnych zapalników elektrycznych nie ma, praktycznie, możliwości ograniczenia ciężkości tych skutków.

Częstość i czas wykonywania robót strzelniczych wynika ze specyfiki zakładu górniczego. Nowe technologie prowadzenia robót eksploatacyjnych i przygotowawczych ograniczają stosowanie techniki strzelniczej. Nie zmienia to jednak faktu, że pozostają w zakładach górniczych miejsca i czynności, w których stosowanie materiałów wybuchowych jest nieuniknione. Roczne zużycie zapalników elektrycznych w polskim przemyśle wydobywczym przekraczało w latach (2000-2001) 10 mln sztuk, z czego ponad 90% w kopalniach głębinowych [48]. W każdym przypadku użycia zapalnika elektrycznego, choćby sporadycznym, poziom ryzyka powinien być odpowiednio mały. W dłuższym przedziale czasowym częstość wykonywania robót strzelniczych może mieć wpływ na wybór środków zmierzających do ograniczenia zagrożeń, natomiast sam proces oceny ryzyka w niewielkim stopniu zależy od częstości i czasu wykonywania robót strzelniczych, tym bardziej że występowanie prądów błędzających stwarza również inne zagrożenia. W zarządzaniu bezpieczeństwem należy więc zwracać szczególną uwagę na pozostałe elementy ryzyka.

Prawdopodobieństwo wystąpienia źródeł prądu błędzającego związane jest przede wszystkim z powstawaniem i rozprzestrzenianiem się prądów błędzających. Prawdopodobieństwo przedostania się prądów błędzających do obwodów strzałowych i możliwości ograniczenia względnych wartości prądu błędzającego w obwodzie strzałowym wynikają natomiast w głównej mierze z organizacji i sposobu wykonywania robót strzelniczych, jakości i stanu użytych środków strzałowych oraz stosowanych środków ochronnych.

4.3. Analiza czynników ryzyka charakteryzujących prawdopodobieństwo wystąpienia źródeł prądu błędzającego w wyrobiskach

4.3.1. Ważniejsze czynniki charakteryzujące powstawanie i rozprzestrzenianie się prądów błędzających

Analiza zjawiska prądów błędzających [77, 78, 34] towarzyszącego pracy trakcji elektrycznej przewodowej wskazuje na to, że zasadniczą rolę w ich powstawaniu odgrywa stan sieci dolnej oraz sposób zasilania i obciążenia sieci trakcyjnej. Z kolei rozprzestrzenianie się prądów błędzających uwarunkowane jest przede wszystkim [34] występowaniem rozległych konstrukcji metalowych niedostatecznie odizolowanych od sieci dolnej i od górotworu, a także usytuowaniem przestrzennym linii trakcji elektrycznej w stosunku do miejsc, w których roz-

patrywać należy zagrożenia spowodowane prądami błędzającymi. Dlatego też w normie [89], jako czynniki, które należy uwzględnić przy ocenie ryzyka związanego z prądami błędzającymi, zostały wymienione:

- stan sieci dolnej,
- stan złączy izolujących szyny torów zelektryfikowanych od niezelektryfikowanych,
- stopień odizolowania sieci dolnej od konstrukcji metalowych znajdujących się w wyrobiskach,
- sposób zasilania sieci trakcyjnej,
- możliwość występowania (powstawania) warunków sprzyjających rozprzestrzenianiu się prądów błędzających,
- obciążenie sieci trakcyjnej (wartości prądów obciążenia i rozkład jazdy pociągów),
- usytuowanie linii trakcji elektrycznej przewodowej na powierzchni w stosunku do miejsc wykonywania robót strzelniczych (w zakładach górniczych odkrywkowych) lub w stosunku do szybów (w zakładach górniczych podziemnych).

Większość z nich ma charakter czynników niemierzalnych. Niezbędne jest zatem przeprowadzenie takiej analizy poszczególnych czynników, która umożliwiłaby zakwalifikowanie stanu każdego z nich do umownego przedziału, ułatwiającego ilościową ocenę wpływu tego czynnika na ryzyko (por. rozdz. 3.31).

4.3.2. Stan sieci dolnej

Stan sieci dolnej opisać można ilościowo za pomocą równomiernie rozłożonych:

- rezystancji wzdłużnej szyn r_s , wyrażonej w Ω/km ,
- rezystancji przejścia r_p , wyrażonej w $\Omega \cdot \text{km}$,

lub współczynnika upływu określonego z wzoru:

$$\alpha = \sqrt{\frac{r_s}{r_p}}, \text{ km}^{-1} \quad (4.5)$$

O stanie sieci dolnej decydują:

- rodzaj (jednostkowa masa) i stopień zużycia szyn jezdnych,
- sposób wykonania i aktualny stan złączy podłużnych szyn,
- rodzaj podkładów i podsypki,
- stopień zawiłocenia (zawodnienia) i/lub zanieczyszczenia torowiska,

- sposób wykonania przewodu dodatkowego zmniejszającego rezystancję wzdłużną sieci dolnej (najczęściej w postaci tzw. liny powrotnej).

Większość wymienionych czynników ma charakter wielkości niemierzalnych. W uzasadnionych przypadkach można wykorzystać istniejące metody pomiarowo-analityczne [32, 25] ilościowego oszacowania wartości współczynnika upływu. Zróżnicowanie warunków środowiskowych w poszczególnych zakładach górniczych, a także w różnych miejscach jednego zakładu uniemożliwia podanie jednoznacznych, uniwersalnych przedziałów wartości współczynnika upływu. Niezbędne jest określenie, np. na podstawie pomiarów w linii nowej lub poddanej rekonstrukcji, wartości współczynnika upływu stanowiącej punkt odniesienia do pomiarów kolejnych. Kolejne pomiary, wykonywane przykładowo w odstępach rocznych, wskazywały będą wówczas zmienność współczynnika upływu, która będzie podstawą zakwalifikowania do jednego z umownych przedziałów stanu. W praktyce, w większości przypadków oceny dokonywać można jedynie przez oględziny, przy czym sposób oceny nie jest zwykle wolny od elementów subiektywizmu.

Tablica 4.1

Zasady oceny stanu sieci dolnej

Opis czynnika ryzyka i jego stanu		Ocena stanu czynnika ryzyka:			
		najlepszy możliwy	zalecany	najgorszy dopuszczalny	niedopuszczalnie zły
1		2	3	4	5
Rodzaj szyn jezdnych i stopień ich zużycia					
S24	nowe		X		
	zużycie kontrolowane			X	
	zużycie niekontrolowane				X
S30 lub cięższe	nowe	X			
	zużycie kontrolowane		X		
	zużycie niekontrolowane			X	
Sposób wykonania i aktualny stan złączy podłużnych szyn					
Szyny spawane	kontrolowane pomiarowo	X			
	kontrolowane przez oględziny	X			
	uszkodzone				X
Łączniki podatne	kontrolowane pomiarowo	X			
	kontrolowane przez oględziny		X		
	uszkodzone lub brakujące				X
Łączniki sztywne	kontrolowane pomiarowo	X			
	kontrolowane przez oględziny			X	
	uszkodzone lub brakujące				X

cd. tablicy 4.1

1		2	3	4	5
Rodzaj podkładów i podsypki					
Drewniane impregnowane	z podsypką		X		
	brak podsypki			X	
Betonowe lub stalowe	z podsypką			X	
	brak podsypki				X
Stopień zawilgocenia (zawodnienia) i/lub zanieczyszczenia torowiska					
Torowisko czyste (widoczna konstrukcja podtorza)	torowisko suche		X		
	torowisko wilgotne			X	
	obecność wody				X
Torowisko zanieczyszczone	torowisko suche			X	
	torowisko wilgotne				X
	obecność wody				X
Sposób wykonania przewodu dodatkowego zmniejszającego rezystancję wzdłużną sieci dolnej					
Stalowa lina	przewodzona pomiędzy szynami lub obok		X		
	przewodzona w styczności z łukami obudowy				X
Przewód miedziany izolowany		X			
Przewód miedziany goły zawieszony na izolatorach		X			

W tablicy 4.1, przedstawiono propozycje wskazówek ułatwiających ocenę stanu sieci dolnej, które można wykorzystać w procesie analizy ryzyka.

4.3.3. Stan złączy izolujących szyny torów zelektryfikowanych od niezelektryfikowanych

Złącza izolujące, zgodnie z zasadami wykonywania sieci dolnej i z wymaganiami norm [93, 91], powinny skutecznie izolować elektrycznie tory zelektryfikowane od odgałęzionych od nich (bądź stanowiących przedłużenie) torów niezelektryfikowanych w celu ograniczenia powstawania i rozprzestrzeniania się prądów błędnych.

W każdym toku szyny powinny być wykonane dwa złącza izolujące, oddalone od siebie tak, by nie zostały jednocześnie zwarte przez przejeżdżający pociąg. Pierwsze złącze powinno być umieszczone bezpośrednio za odgałęzieniem (bądź końcem przewodu jezdny). Złącza izolujące realizowane są w postaci:

- odcinka szyny wykonanego z drewna lub z tworzywa sztucznego,
- przekładek z tworzyw sztucznych wstawianych odpowiednio w miejscu połączenia mechanicznego szyn za pomocą łubków.

Stan złączy izolujących powinien być kontrolowany okresowo metodą pomiarową [91]. W czasie pomiędzy kolejnymi pomiarami celowe jest kontrolowanie stanu złączy przez oględziny. W tablicy 4.2 przedstawiono propozycje wskazówek ułatwiających ocenę stanu złączy izolujących. Tablica nie dotyczy złączy izolujących wykonywanych w szynach prowadzących do składów materiałów wybuchowych.

Tablica 4.2

Zasady oceny stanu złączy izolujących w sieci dolnej

Opis czynnika ryzyka i jego stanu	Ocena stanu czynnika ryzyka:			
	najlepszy możliwy	zalecany	najgorszy dopuszczalny	niedopuszczalny
Liczba i miejsce wykonania złączy izolujących				
Dwa złącza umieszczone w odległości: $L > L_{poc}^{1)}$		X		
Dwa złącza umieszczone w odległości: $L < L_{poc}$			X	
Jedno złącze lub brak złączy				X
Sposób wykonania i kontroli złącza				
Złącze wykonane z tworzywa sztucznego	kontrole okresowe (pomiaru) i doraźne (ogłędziny)	X		
	kontrole okresowe (pomiaru)		X	
	brak kontroli			X
Złącze drewniane	kontrole okresowe (pomiaru) i doraźne (ogłędziny)		X	
	kontrole okresowe (pomiaru)			X
	brak kontroli			X

¹⁾ L_{poc} – długość pociągu

4.3.4. Stopień odizolowania sieci dolnej od konstrukcji metalowych znajdujących się w wyrobiskach

Cechą charakterystyczną wyrobisk podziemnych jest obecność konstrukcji metalowych zarówno lokalnych (np. łuki obudowy), jak i rozległych (np. rurociągi, elementy systemu uziemiających przewodów ochronnych, elementy konstrukcyjne prętośników itp.), w tym również prowadzonych wzdłuż linii torów trakcji elektrycznej. Sposób posadowienia (mocowania) tych konstrukcji sprzyja często możliwości występowania elektrycznego ich połączenia z siecią dolną. W stosunku do niektórych konstrukcji, np. elementów SUPO, obowiązuje wyraźny zakaz łączenia z szynami [92]. Pozostałe powinny być wykonane tak, by nie dochodziło do celowego lub przypadkowego elektrycznego połączenia z siecią dolną. Stopień odizolowa-

nia konstrukcji metalowych występujących w wyrobisku od sieci dolnej powinien być okresowo kontrolowany metodą pomiarową [91]. W czasie pomiędzy kolejnymi pomiarami celowe jest kontrolowanie braku połączenia przez oględziny. W tablicy 4.3 przedstawiono propozycje wskazówek ułatwiających ocenę odizolowania konstrukcji metalowych od sieci dolnej w ramach oceny ryzyka wynikającego z występowania prądów błędnych.

Tablica 4.3

Zasady oceny odizolowania sieci dolnej od konstrukcji metalowych znajdujących się w wyrobiskach

Opis czynnika ryzyka i jego stanu	Ocena stanu czynnika ryzyka:			
	najlepszy możliwy	zalecany	najgorszy dopuszczalny	niedopuszczalny
Rozległe konstrukcje metalowe prowadzone w wyrobiskach z trakcją elektryczną i doprowadzone do miejsc wykonywania robót strzelniczych oraz warunki lokalne				
Brak konstrukcji lub konstrukcje izolowane	wytrobisko suche	X		
Gołe konstrukcje nie należące do SUPO			X	
Gołe zewnętrzne przewody ochronne				X
Brak konstrukcji lub konstrukcje izolowane	wytrobisko wilgotne i/lub mokre, zwłaszcza w miejscach mocowania konstrukcji metalowych	X		
Gołe konstrukcje nie należące do SUPO			X	
Gołe zewnętrzne przewody ochronne				X
Lokalne konstrukcje metalowe w miejscu wykonywania robót strzelniczych oraz warunki lokalne				
Wytrobisko suche		X		
Wytrobisko wilgotne i/lub mokre, zwłaszcza w miejscach mocowania konstrukcji metalowych			X	

4.3.5. Sposób zasilania sieci trakcyjnej

Sieci trakcji elektrycznej przewodowej w podziemiach kopalń są zasilane jednostronnie, przy czym biegun ujemny każdej stacji zasilającej przyłączony jest do szyn jezdnych w jednym tylko punkcie zasilającym dolnym (punkcie powrotnym). Sieć dolna, niezależnie od

liczby stacji zasilających, stanowi pod względem elektrycznym galwanicznie połączoną całość. Możliwy jest jeden z następujących sposobów usytuowania stacji zasilających (w praktyce również usytuowania punktów zasilających dolnych):

- pojedyncza stacja (lub kilku stacji zgrupowanych w jednym miejscu) usytuowana na początku lub końcu linii,
- pojedyncza stacja (lub kilku stacji zgrupowanych w jednym miejscu) usytuowana w dowolnym punkcie na trasie linii,
- kilka stacji rozłożonych równomiernie wzdłuż linii.

Wielkością pozwalającą porównać poszczególne sposoby zasilania może być względna sumaryczna wartość prądów błędnych ($\Sigma I_b / I_L$) powstających podczas przejazdu pojedynczej lokomotywy wzdłuż całej linii. Sumaryczną wartość prądów błędnych w sieci zasilanej jednostronnie (rys.4.6) obliczyć można wyprowadzając odpowiednio wzory [34] do postaci:

- a) w przypadku lokomotywy znajdującej się ($q_i = l_{(i-1)+}$) na lewej granicy rejonu zasilanego z i -tej stacji zasilającej (SZI) usytuowanej w punkcie s_i

$$\left(\frac{\Sigma I_b}{I_L} \right)_{q=l_{(i-1)+}} = 1 - \frac{1}{\text{sh}\alpha l} \sqrt{2\text{ch}\alpha(l-s_i) \cdot \text{ch}\alpha l_{(i-1)} \cdot \text{ch}\alpha l - \text{ch}^2\alpha(l-s_i) - \text{ch}^2\alpha l_{(i-1)}} \quad (4.6)$$

- b) w przypadku, gdy lokomotywa znajduje się ($q_i = l_i$) na prawej granicy rejonu zasilanego ze stacji SZI

$$\left(\frac{\Sigma I_b}{I_L} \right)_{q=l_i} = 1 - \frac{1}{\text{sh}\alpha l} \sqrt{2\text{ch}\alpha s_i \cdot \text{ch}\alpha(l-l_i) \cdot \text{ch}\alpha l - \text{ch}^2\alpha s_i - \text{ch}^2\alpha(l-l_i)} \quad (4.7)$$

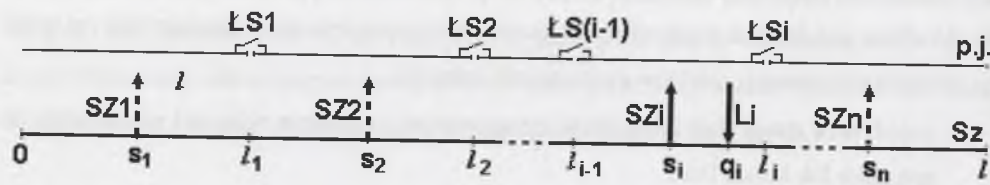
w których

I_L – prąd obciążenia lokomotywy,

α – współczynnik upływu,

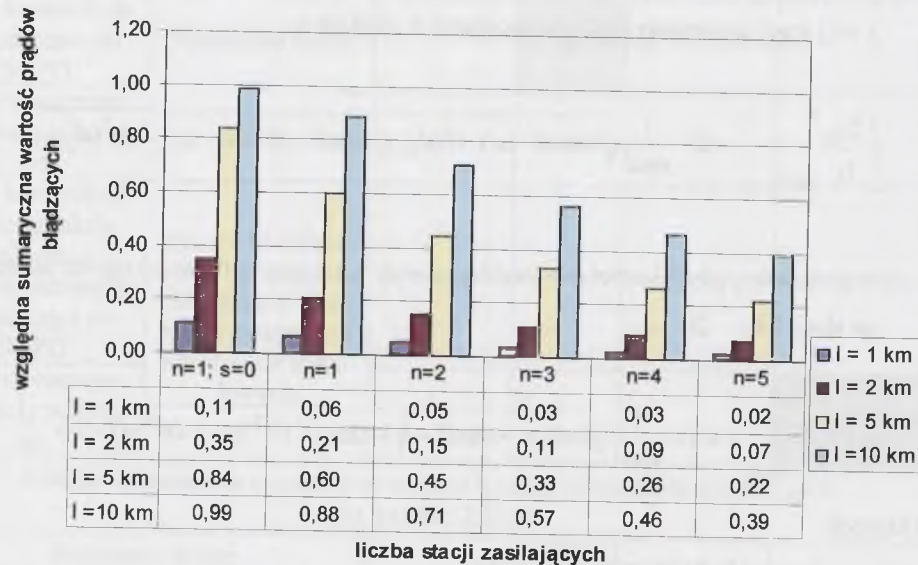
a pozostałe oznaczenia wynikają z rysunku 4.6.

Na rys. 4.7 przedstawiono zależność względnej sumarycznej wartości prądów błędnych od liczby stacji zasilających rozłożonych równomiernie wzdłuż linii (stacje zasilające położone w połowie długości rejonu zasilania), dla różnych długości tych linii, przy przykładowej wartości współczynnika upływu $\alpha = 1\text{km}^{-1}$. Przypadek zasilania z pojedynczej stacji zasilającej ($n = 1$) rozpatrzono podwójnie: dla $s = 0$ i dla $s = 0,5l_1$.



Rys. 4.6. Schemat linii trakcji elektrycznej przewodowej zasilanej z n stacji zasilających (SZ), obciążonej pojedynczą lokomotywą (L_i) przemieszczającą się wzdłuż linii:
 $s_1, \dots, s_i, \dots, s_n$ – punkty zasilające dolne (punkty powrotne), $l_1, \dots, l_i, \dots, l_{n-1}$ – granice rejonów zasilania, LS – przerwy izolacyjne i łączniki sekcyjne rozdzielające rejonów zasilania

Fig. 4.6. Diagram of wired electric traction line supplied from n supply stations (SZ), loaded by a single engine (L_i) moving along the line:
 $s_1, \dots, s_i, \dots, s_n$ – lower supply points (return points), $l_1, \dots, l_i, \dots, l_{n-1}$ – supply zone boundaries, LS – insulation clearances and section connectors separating the supply zones



Rys. 4.7. Zależność względnej sumarycznej wartości prądów błędnych od liczby stacji zasilających n , przy różnych długościach linii l

Fig. 4.7. Relation between total relative values of stray currents and number of supply stations n , for different length of line l

Z rys. 4.7 wynika, że najbardziej niekorzystnym sposobem zasilania jest usytuowanie dolnego punktu zasilającego (punktu powrotnego) na początku linii ($n=1$; $s=0$). Bardzo istotny wpływ na powstawanie prądów błędnych ma długość rejonu zasilanego z jednej stacji.

Propozycje wskazówek oceny sposobu zasilania przy analizie ryzyka związanego z prądami błędzającymi przedstawiono w tabelicy 4.4.

Tablica 4.4

Zasady oceny sposobu zasilania sieci trakcyjnej

Opis czynnika ryzyka i jego stanu	Ocena stanu czynnika ryzyka:			
	najlepszy możliwy	zalecany	najgorszy dopuszczalny	niedopuszczalnie zły
Długość rejonu zasilanego z jednej stacji zasilającej				
$l/n < 1 \text{ km}^{1)}$	X			
$1 \text{ km} \leq l/n \leq 1,5 \text{ km}$		X		
$1,5 \text{ km} < l/n \leq 2 \text{ km}$			X	
$l/n > 2 \text{ km}$				X

¹⁾ l – długość linii, n – liczba stacji zasilających

4.3.6. Możliwość występowania warunków sprzyjających rozprzestrzenianiu się prądów błędzających

W wyniku upływu prądu z szyn w górotworze powstaje przepływowe pole prądu elektrycznego (pole prądów błędzających), obejmujące swym zasięgiem obszar teoretycznie nieskończenie rozległy w kierunkach prostopadłych do osi toru. Skomplikowana pod względem elektrycznym budowa górotworu, zwłaszcza z uwzględnieniem wyposażenia wyrobisk w konstrukcje metalowe, uniemożliwia praktycznie ilościową analizę rozprzestrzenienia prądów błędzających. Dlatego też bardziej celowe wydaje się poprzestanie na przeprowadzeniu w każdym konkretnym przypadku jakościowej analizy potencjalnych dróg rozprzestrzenienia prądów błędzających.

Wyróżnić można dwa niezależnie od siebie występujące rodzaje dróg, którymi rozprzestrzeniają się prądy błędzające:

- górotwór (skały),
- konstrukcje metalowe niedostatecznie odizolowane od górotworu lub szyn.

Rozpatrując pośrednictwo górotworu w rozprzestrzenianiu się prądów błędzających, należy brać pod uwagę przede wszystkim jego warstwową strukturę, a także sposób zalegania poszczególnych warstw oraz występujące deformacje tektoniczne. W ogólnym przypadku nie są dostępne szczegółowe dane dotyczące właściwości elektrycznych górotworu jako całości bądź poszczególnych jego fragmentów. Analizując sposób zalegania skał i uwzględniając przestrzenne usytuowanie linii trakcji elektrycznej, można stwierdzić, że poza przypadkami, w których daje się zauważyć warunki geologiczne wyraźnie sprzyjające powstawaniu „natu-

ralnych” dróg rozptywu prądów błędnych, pośrednictwo górotworu w ich rozprzestrzenianiu się można uznać za nie mające praktycznego znaczenia.

Istotniejszą rolę należy przypisać konstrukcjom metalowym znajdującym się w wyrobiskach lub otworach wiertniczych i niedostatecznie odizolowanych od skał, a w przypadku niektórych konstrukcji również od szyn. Do konstrukcji tych należą:

- rurociągi (podsadzkowe, wodne, sprężonego powietrza, odmetanowania, przeciwpożarowe),
- elementy systemu uziemiających przewodów ochronnych (uziomy, gołe przewody ochronne zewnętrzne),
- elementy konstrukcyjne urządzeń transportu poziomego (szyny trakcji niezelektryfikowanej, przenośniki zgrzebłowe, konstrukcje wsporcze przenośników taśmowych),
- elementy konstrukcyjne szybów, otworów wiertniczych i urządzeń transportu pionowego.

Już samo przeznaczenie wymienionych urządzeń, a następnie ich wykonanie oraz sposób instalowania, stwarzają warunki sprzyjające pośredniczeniu w rozptywie prądów błędnych. Znane z teorii obwodów ziemnopowrotnych [54, 69] wyrażenia analityczne umożliwiające obliczanie wartości prądów wpływających bądź wypływających z konstrukcji metalowej stykającej się z ziemią, nie znajdują zastosowania w warunkach podziemi kopalń, przede wszystkim ze względu na brak możliwości przyjęcia niezbędnych założeń idealizujących zjawisko (np. jednorodności właściwości geoelektrycznych górotworu). Skłania to do obrania odmiennego sposobu podejścia do oceny rozprzestrzeniania się prądów błędnych w kopalniach. Proponuje się mianowicie [21, 34] określenie, a następnie analizę warunków, które sprzyjają rozprzestrzenianiu się prądów błędnych za pośrednictwem rozległych konstrukcji metalowych. Warunki te powinny być tak określone, by nawet nieskomplikowana analiza mogła być pomocna w przyjęciu bądź odrzuceniu hipotezy o zwiększeniu prawdopodobieństwa występowania źródeł prądu błędnych w danym miejscu. Wyniki takiej analizy powinny być uwzględniane w ocenie ryzyka związanego z prądami błędymi.

Przy określaniu warunków sprzyjających rozprzestrzenianiu się prądów błędnych za pośrednictwem rozległych konstrukcji metalowych należy brać pod uwagę:

- rozkład strefy anodowej i katodowej szyn trakcji elektrycznej przewodowej,
- wzajemne usytuowanie szyn, konstrukcji metalowych oraz miejsc, w których analizuje się zagrożenia związane z prądami błędymi (np. miejsc wykonywania robót strzelniczych),

- możliwość elektrycznego połączenia szyn trakcji elektrycznej przewodowej i rozległych konstrukcji metalowych prowadzonych obok nich (por. 4.3.4).

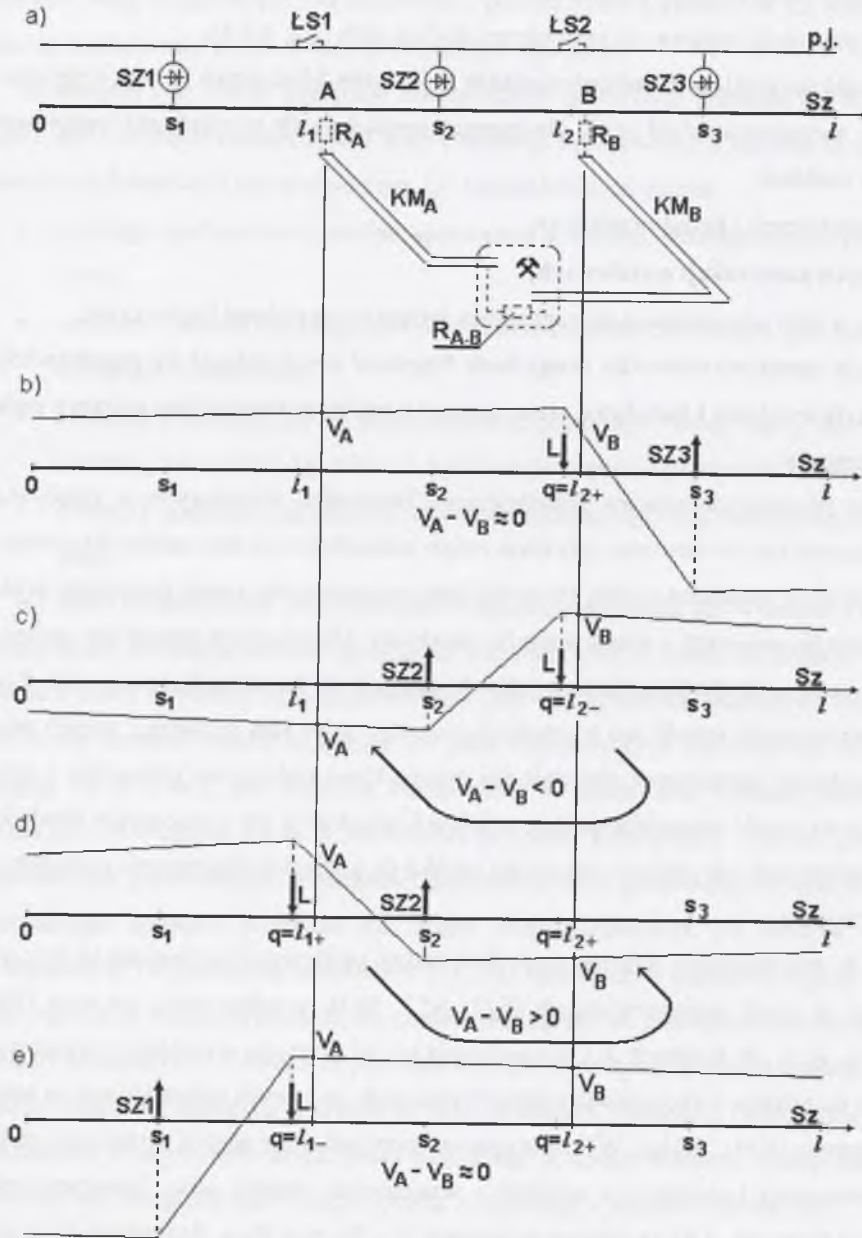
Jako **warunki sprzyjające rozprzestrzenianiu się prądów błędnych** (a więc i prawdopodobieństwu wystąpienia źródeł prądu błędnych) **proponuje się przyjąć taki wzajemny przestrzenny rozkład:**

- **stref anodowych i katodowych szyn,**
- **rozległych konstrukcji metalowych,**
- **miejsc, w których analizuje się zagrożenia związane z prądami błędymi,**

by konstrukcje metalowe stanowiły drogę bądź fragment drogi dającej się poprowadzić pomiędzy strefą anodową i katodową szyn, zgodnie z ogólnym kierunkiem wektora pola prądów błędnych.

Największe prawdopodobieństwo pośredniczenia konstrukcji metalowych w rozptywie prądów błędnych będzie wówczas, gdy dwie różne, odchodzące od linii zelektryfikowanej, rozległe konstrukcje metalowe znajdują się w strefach o przeciwnym znaku potencjału szyn, tzn. jedna w strefie anodowej, a druga w strefie katodowej. Dodatkowym warunkiem pośredniczenia jest możliwość przedostania się prądów błędnych do konstrukcji metalowych. Ten warunek w podziemiach kopalń jest najczęściej spełniony, gdyż stan podtorza i sposób prowadzenia konstrukcji metalowych ułatwiają ich przypadkowe elektryczne połączenie z szynami. Dotyczy to przede wszystkim miejsc, w których odgałęziają się z przekopów chodniki bez trakcji elektrycznej lub punktów załadunku urobku do pociągów ciągnionych przez lokomotywy elektryczne.

Na rys. 4.8a przedstawiono schematycznie linię trakcji elektrycznej podzieloną na trzy rejonu zasilane ze stacji prostownikowych (SZ1, SZ2, SZ3), przyłączonych do szyn (Sz) w punktach s_1 , s_2 , s_3 . W punktach A i B odgałęziają się od przekopu wyrobiska prowadzące przykładowo do miejsca wykonywania robót strzelniczych, w których zainstalowane są konstrukcje metalowe (KM_A , KM_B). W niekorzystnym przypadku nie można wykluczyć elektrycznego połączenia konstrukcji z szynami i wzajemnego między sobą. Schematycznie przedstawiono to na rys. 4.8a za pomocą rezystancji R_A , R_B oraz R_{A-B} . Rezystancji tych nie należy traktować jako określonych elementów lub wielkości, które można ilościowo analizować. Symbolizują one jedynie możliwości zamykania się drogi dla prądów błędnych. Możliwości te wzdłuż linii trakcji elektrycznej powinny być kontrolowane (por. rozdz. 4.3.3 i 4.3.4). Trudności w ilościowej ocenie rezystancji R_A , R_B i R_{A-B} nie stanowią przeszkody w analizie warunków sprzyjających rozprzestrzenianiu się prądów błędnych.



Rys. 4.8. Ilustracja powstawania warunków sprzyjających rozprzestrzenianiu się prądów błądzących. a) schemat wzajemnego usytuowania linii trakcyjnej elektrycznej, konstrukcji metalowych (KM) i miejsca wykonywania robót strzelniczych, b), c), d), e) – rozkłady potencjałów szyn przy różnych chwilowych położeniach lokomotywy L

Fig. 4.8. Illustration of the conditions leading to the propagation of stray currents. a) diagram of the location of electric traction line in relation to metal structures (KM) and site of blasting works B, c), d), e) – distributions of rails potentials for different temporary positions of engine L

Przy ocenie ryzyka związanego z prądami błądzącymi należy uwzględnić również warunki najgorsze, a więc istnienie wspomnianych rezystancji; istnienie traktowane jako możliwość zamknięcia się drogi dla prądów błądzących. Rozptyw prądów błądzących za pośrednictwem rozległych konstrukcji metalowych analizować należy uwzględniając specyfikę zakładu górniczego [81].

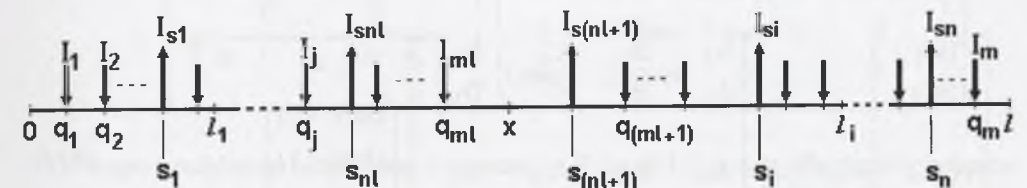
Podstawą analizy warunków sprzyjających jest znajomość rozkładu potencjałów szyn. W sieci zasilanej jednostronnie potencjał szyn w dowolnym punkcie o współrzędnej x wyrazić można za pomocą wzoru uzyskanego drogą superpozycji z przypadków pojedynczych prądów obciążenia i zasilania [34]:

$$V(x) = \frac{r_s}{\alpha \cdot \text{sh}\alpha l} \left\{ \left[\sum_{j=1}^{m_1} I_j \cdot \text{ch}\alpha q_j - \sum_{i=1}^{n_1} I_{s_i} \cdot \text{ch}\alpha s_i \right] \cdot \text{ch}\alpha(l-x) + \left[\sum_{j=m_1+1}^m I_j \cdot \text{ch}\alpha(l-q_j) - \sum_{i=n_1+1}^n I_{s_i} \cdot \text{ch}\alpha(l-s_i) \right] \cdot \text{ch}\alpha x \right\} \quad (4.8)$$

w którym

- α – współczynnik upływu,
- n_1 – liczba stacji zasilających znajdujących się po lewej stronie punktu x,
- m_1 – liczba lokomotyw znajdujących się po lewej stronie punktu x,
- I_j – prąd obciążenia j-tej lokomotywy,
- I_{s_i} – prąd obciążenia i-tej stacji zasilającej,
- $q_1, \dots, q_j, \dots, q_m$ – współrzędne chwilowego położenia lokomotyw,
- $s_1, \dots, s_i, \dots, s_n$ – współrzędne stacji zasilających (punktów przyłączenia przewodów zasilających dolnych),

a pozostałe oznaczenia wynikają z rys.4.9.



Rys. 4.9. Uogólniony schemat sieci trakcyjnej zasilanej w punktach $s_1, \dots, s_i, \dots, s_n$, obciążonej lokomotywami znajdującymi się chwilowo w punktach $q_1, \dots, q_j, \dots, q_m$
 Fig. 4.9. Generalized diagram of the traction system supplied at points $s_1, \dots, s_i, \dots, s_n$ and loaded by engines in temporary positions at points $q_1, \dots, q_j, \dots, q_m$

Przy następujących oznaczeniach:

$$A_x = \sum_{j=1}^{m_1} I_j \cdot \operatorname{ch} \alpha q_j \quad (4.9)$$

$$B_x = -\sum_{i=1}^{n_1} I_{si} \cdot \operatorname{ch} \alpha s_i \quad (4.10)$$

$$C_x = \sum_{j=m_1+1}^m I_j \cdot \operatorname{ch} \alpha (l - q_j) \quad (4.11)$$

$$D_x = -\sum_{i=n_1+1}^n I_{si} \cdot \operatorname{ch} \alpha (l - s_i) \quad (4.12)$$

wzór (4.8) przyjmie postać:

$$V(x) = \frac{r_s}{\alpha \cdot \operatorname{sh} \alpha l} [(A_x + B_x) \cdot \operatorname{ch} \alpha (l - x) + (C_x + D_x) \cdot \operatorname{ch} \alpha x] \quad (4.13)$$

Wartości współczynników A_x , B_x , C_x , i D_x zależne są od współrzędnej x punktu, którego potencjał jest rozpatrywany. Charakterystyczne punkty linii, tj.:

- początek, koniec i punkty rozgraniczające rejonu zasilane z poszczególnych stacji (punkty o współrzędnych $0, l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l$),
- punkty zasilające dolne (punkty o współrzędnych $s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n$),
- punkty, w których znajdują się chwilowo lokomotywy (punkty o współrzędnych $q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_m$),

dzielą linię na odcinki, na których współczynniki A, B, C, D są stałe. Liczba tych odcinków wynosi:

$$y = 2n + m. \quad (4.14)$$

Rozkład potencjałów wzdłuż linii można zatem zapisać w postaci macierzowej:

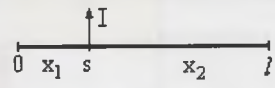
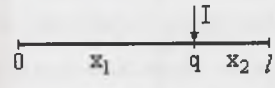

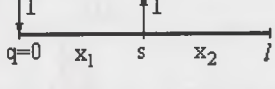
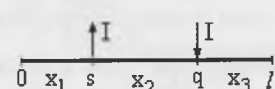
$$\begin{bmatrix} V(x)_1 \\ V(x)_2 \\ \dots \\ V(x)_w \\ \dots \\ V(x)_{y-1} \\ V(x)_y \end{bmatrix} = \frac{r_s}{\alpha \cdot \operatorname{sh} \alpha l} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & D_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 & D_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_w & B_w & C_w & D_w \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{y-1} & B_{y-1} & C_{y-1} & D_{y-1} \\ A_y & B_y & C_y & D_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \operatorname{ch} \alpha (l - x) \\ \operatorname{ch} \alpha (l - x) \\ \operatorname{ch} \alpha x \\ \operatorname{ch} \alpha x \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

przy czym wartości współczynników A_w, B_w, C_w, D_w w dowolnym w -tym wierszu macierzy otrzyma się wstawiając do wzorów od (4.9) do (4.12) odpowiednie liczby lokomotyw m_{1w} i stacji zasilających n_{1w} ustalone dla każdego z y odcinków indywidualnie.

Szczególnymi przypadkami są linie zasilane tylko z pojedynczych stacji lub obciążone pojedynczą lokomotywą. Są to przypadki najprostsze, z których, metodą superpozycji, uzyskać można dowolny przypadek spotykany w rzeczywistości. Z uwagi na przydatność tych przypadków lub ich kombinacji przy rozpatrywaniu linii o bardziej skomplikowanych sposobach obciążenia lub konfiguracjach, w tabelicy 4.5 zestawiono macierze współczynników pozwalające napisać równanie rozkładu potencjałów szyn dla najczęściej spotykanych sytuacji praktycznych.

Tabela 4.5

Macierze współczynników $[A \ B \ C \ D]$ odpowiadające wybranym przypadkom zasilania i obciążenia linii trakcji elektrycznej przewodowej

Lp.	Schemat zasilania i obciążenia linii	Postać macierzy współczynników we wzorze (4.10)
1		$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -I \operatorname{ch} \alpha (l - s) \\ 0 & -I \operatorname{ch} \alpha s & 0 & 0 \end{bmatrix}$
2		$\begin{bmatrix} 0 & 0 & I \operatorname{ch} \alpha (l - q) & 0 \\ I \operatorname{ch} \alpha q & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
3		$\begin{bmatrix} 0 & -I & I & 0 \end{bmatrix}$
4		$\begin{bmatrix} I & 0 & 0 & -I \operatorname{ch} \alpha (l - s) \\ I & -I \operatorname{ch} \alpha s & 0 & 0 \end{bmatrix}$
5		$\begin{bmatrix} 0 & 0 & I \operatorname{ch} \alpha (l - q) & -I \operatorname{ch} \alpha (l - s) \\ 0 & -I \operatorname{ch} \alpha s & I \operatorname{ch} \alpha (l - q) & 0 \\ I \operatorname{ch} \alpha q & -I \operatorname{ch} \alpha s & 0 & 0 \end{bmatrix}$

Obliczanie rozkładów potencjałów z wyrażeń (4.8) do (4.15) przy wykorzystaniu wspomaganie komputerowego nie stwarza większych problemów i w przypadkach trudnych, wymagających analizy nietypowej i pomiarów specjalnych [89], z powodzeniem może być stosowane. W praktyce jednak, w ramach okresowej lub bieżącej oceny ryzyka, niezbędne są me-

tody prostsze, pozwalające dokonać analizy stosownych charakterystyk. Korzystając z analizy czasu utrzymywania się warunków sprzyjających podczas przejazdu lokomotywy przez całą linię [34], w tablicy 4.6 przedstawiono propozycje wskazówek ułatwiających ocenę.

Tablica 4.6

Zasady oceny możliwości powstawania warunków sprzyjających rozprzestrzenianiu się prądów błędnych

Opis czynnika ryzyka i jego stanu	Ocena stanu czynnika ryzyka:			
	najlepszy możliwy	zalecany ^{a)} (oczekiwany)	najgorszy dopuszczalny	niedopuszczalnie zły
Wyrobiska łączące linię trakcji w miejscu wykonywania robót strzelniczych (miejscem występowania zagrożeń)				
Nie występują	X			
Dwa lub więcej wyrobisk znajdujących się w tej samej strefie zasilania		X		
Dwa lub więcej wyrobisk znajdujących się w różnych strefach lub rejonach zasilania			X	
Dwa lub więcej wyrobisk znajdujących się w różnych strefach lub rejonach zasilania przy równoczesnej negatywnej ocenie stanu odizolowania znajdujących się w tych wyrobiskach konstrukcji metalowych (por. tablica 4.3) lub/i złączy izolujących (por. tablica 4.2)				X
^{a)} określenia „zalecany” nie należy w tym przypadku traktować jako zalecenia; zachowano je ze względu na symetrię w stosunku do oceny stanu w pozostałych czynnikach ryzyka				

4.3.7. Obciążenie sieci trakcyjnej

Ze wzorów (4.6) do (4.13) wynika, że w przypadku obciążenia sieci trakcyjnej pojedynczą lokomotywą, sumaryczna wartość prądów błędnych oraz wartości potencjałów szyn są proporcjonalne do wartości prądu pobieranego przez tę lokomotywę. Oznacza to, że wzrost prądu obciążenia powiększa w tym przypadku ryzyko zagrożeń związanych z prądami błędzycymi. Dodatkowym argumentem potwierdzającym taki wniosek jest fakt bardzo istotnego wpływu położenia pojedynczej lokomotywy na rozkład potencjałów szyn. To z kolei prowadzi do znacznej zmienności czasowej tak prądów błędnych, jak i warunków sprzyjających ich rozprzestrzenianiu się.

Wzrost liczby lokomotyw wiąże się ze wzrostem prądu obciążenia sieci dolnej, co wskazuje na możliwość wzrostu prądów błędnych. Równocześnie jednak zwiększanie liczby poruszających się pociągów prowadzi do przestrzennego ustalania się rozkładu potencjałów szyn przyczyniając się m.in. do stabilizacji warunków sprzyjających rozprzestrzenianiu się prądów błędnych.

Sumaryczną wartość prądów błędnych w przypadku ogólnym, przy wystąpieniu kilku stref anodowych, obliczyć można całkując krzywą rozkładu potencjałów szyn wzdłuż wszystkich stref anodowych, z uwzględnieniem rezystancji przejścia r_p . Wykorzystując do tego wzory (4.13) i (4.5) otrzyma się wyrażenie:

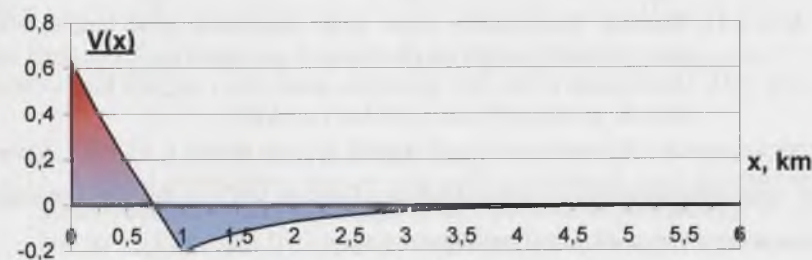
$$\sum I_b = \sum_{a=1}^k \int_{x_a}^{x_{a+1}} \frac{V(x)}{r_p} dx = \frac{\alpha}{\text{sh}\alpha l} \sum_{a=1}^k \int_{x_a}^{x_{a+1}} [(A_x + B_x) \cdot \text{ch}\alpha(l-x) + (C_x + D_x) \cdot \text{ch}\alpha x] dx \quad (4.16)$$

w którym

x_a, x_{a+1} – współrzędne początku i końca każdej z k stref anodowych szyn,

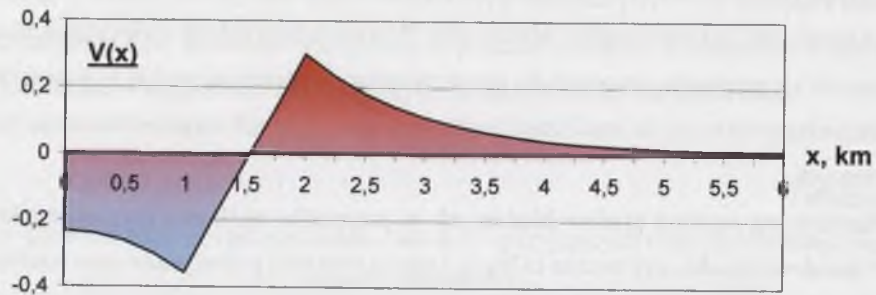
A_x, B_x, C_x, D_x – współczynniki określone wzorami (4.9) do (4.12) dla odcinków sieci dolnej znajdujących się w kolejnych strefach anodowych.

Przykładową analizę wpływu liczby lokomotyw na rozkłady potencjałów i sumaryczną wartość prądów błędnych przeprowadzono dla sieci trakcyjnej o długości 6 km, zasilanej z trzech stacji prostownikowych, umieszczonych odpowiednio w punktach o współrzędnych $s_1=1$ km, $s_2=3$ km, $s_3=5$ km i obciążonej kolejno: jedną, trzema, sześcioma i dwunastoma lokomotywami pobierającymi z sieci jednakowe wartości prądu (por. rys. 4.9).

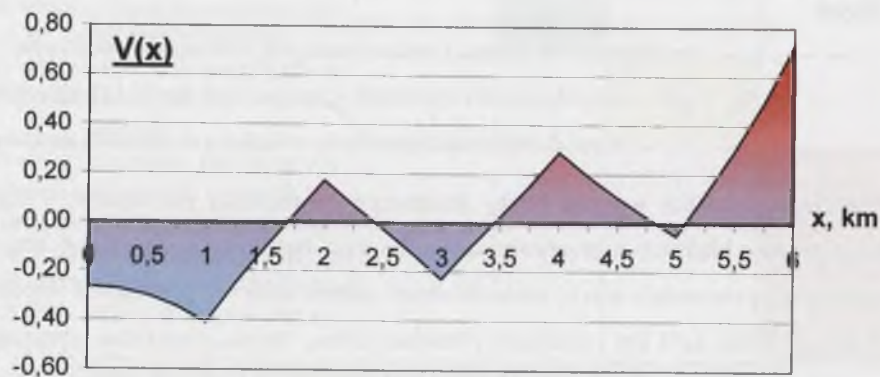


Rys. 4.10a. Rozkład potencjałów szyn przy obciążeniu sieci pojedynczą lokomotywą ($m=1$) znajdującą się chwilowo w punkcie $q=0$

Fig. 4.10a. Distribution of the rails potentials under a single engine load ($m=1$) in temporary position at $q=0$



Rys. 4.10b. Rozkład potencjałów szyn przy obciążeniu sieci pojedynczą lokomotywą ($m = 1$) znajdującą się chwilowo w punkcie $q = l_{1+} = 2$ km
Fig. 4.10b. Distribution of the rails potentials under a single engine load in temporary position $q = l_{1+} = 2$ km (b)



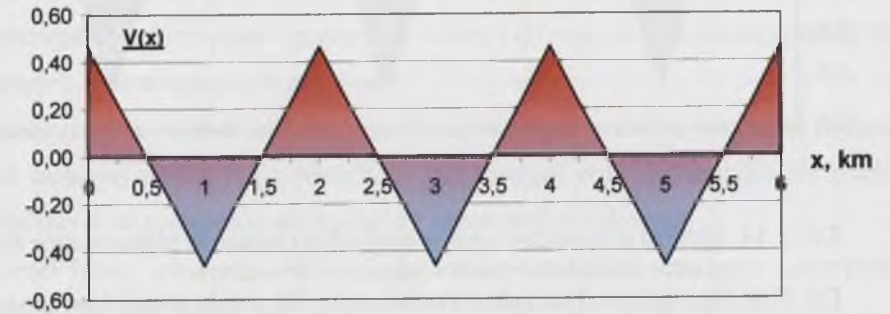
Rys. 4.11. Rozkład potencjałów szyn przy obciążeniu sieci trzema lokomotywami ($m = 3$) znajdującymi się chwilowo w punktach $q_1=2$ km, $q_2=4$ km i $q_3=6$ km
Fig. 4.11. Distribution of the rails potentials under three engines load in temporary positions at points $q_1=2$ km, $q_2=4$ km i $q_3=6$ km

Przyjęto ponadto obliczeniowy współczynnik upływu równy $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, a wartości potencjałów szyn przedstawiono w jednostkach względnych $\underline{V}(x)$, w stosunku do wartości spadku napięcia w szynach (sieci dolnej) o długości 1 km:

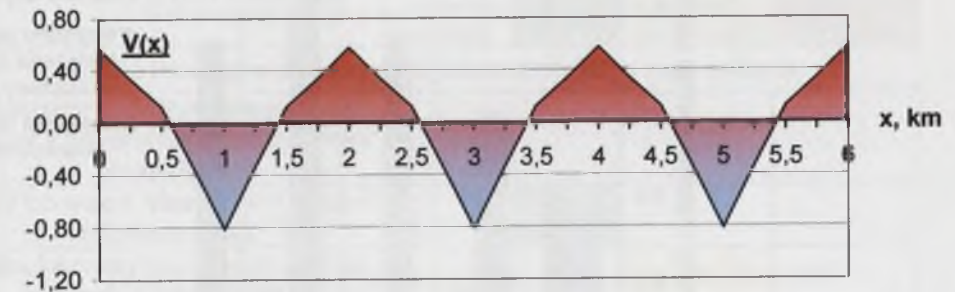
$$\underline{V}(x) = \frac{V(x)}{I \cdot R_{lsz}}$$

Na rysunkach 4.10 do 4.12 przedstawiono obliczeniowe rozkłady potencjałów szyn w przypadku najbardziej niekorzystnego usytuowania lokomotyw w tzn. w punktach rozdzielających rejony zasilania sieci.

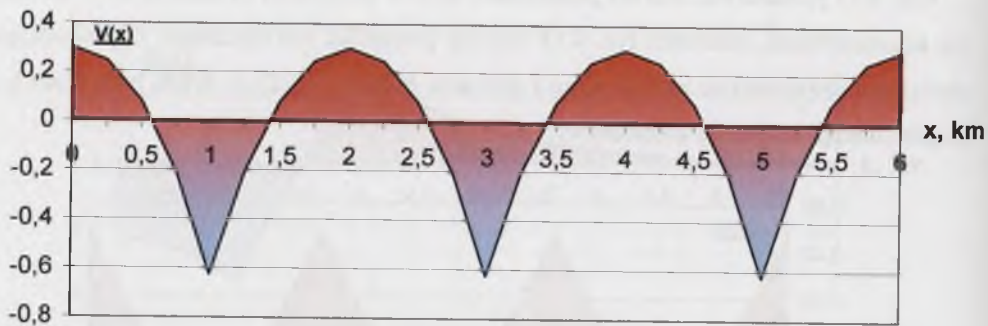
Rys. 4.13 przedstawia rozkład potencjałów szyn w przypadku obciążenia sieci dwunastoma lokomotywami, natomiast rys. 4.14 dotyczy przypadku teoretycznego, odpowiadającego obciążeniu równomiernie rozłożonemu z gęstością liniową $j = 12I_1/l$, A/km, przy czym I_1 jest prądem obciążenia jednej lokomotywy.



Rys. 4.12. Rozkład potencjałów szyn przy obciążeniu sieci sześcioma lokomotywami ($m = 6$) znajdującymi się chwilowo w punktach $q_1=0$, $q_2= l_{1-}=2$ km, $q_3= l_{1+}=2$ km, $q_4= l_{2-}=4$ km, $q_5=4$ km, $q_6= l=6$ km
Fig. 4.12. Distribution of the rails potentials under six engines load in temporary positions at points $q_1=0$, $q_2= l_{1-}=2$ km, $q_3= l_{1+}=2$ km, $q_4= l_{2-}=4$ km, $q_5=4$ km, $q_6= l=6$ km

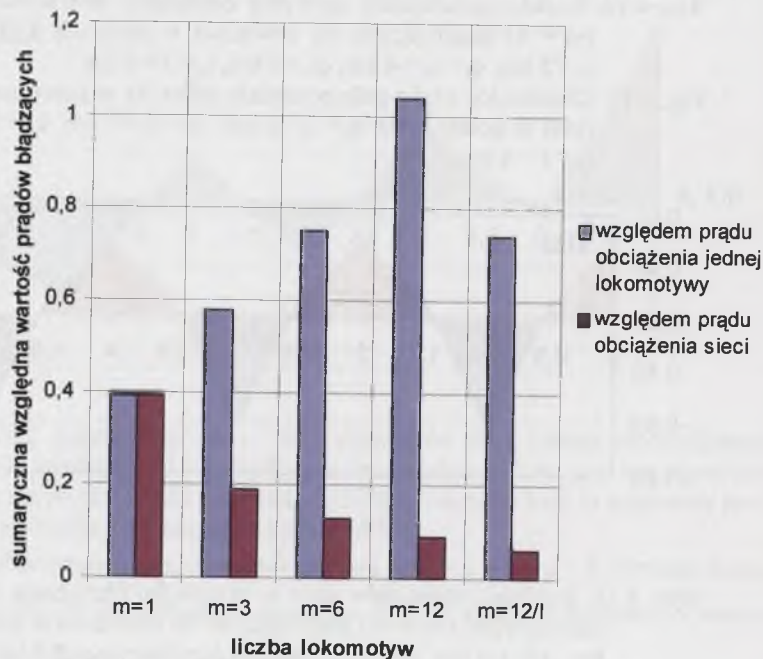


Rys. 4.13. Rozkład potencjałów szyn w przypadku obciążenia sieci dwunastoma lokomotywami ($m = 12$) znajdującymi się chwilowo w punktach $q_1=0$, $q_2=0,5$ km, $q_3=1,5$ km, $q_4= l_{1-}=2$ km, $q_5= l_{1+}=2$ km, $q_6=2,5$ km, $q_7=3,5$ km, $q_8= l_{2-}=4$ km, $q_9=4$ km, $q_{10}=4,5$ km, $q_{11}=5,5$ km, $q_{12}= l=6$ km
Fig. 4.13. Distribution of the rails potentials under twelve engines load in temporary positions at points $q_1=0$, $q_2=0,5$ km, $q_3=1,5$ km, $q_4= l_{1-}=2$ km, $q_5= l_{1+}=2$ km, $q_6=2,5$ km, $q_7=3,5$ km, $q_8= l_{2-}=4$ km, $q_9=4$ km, $q_{10}=4,5$ km, $q_{11}=5,5$ km, $q_{12}= l=6$ km



Rys. 4.14. Rozkład potencjałów szyn w przypadku obciążenia równomiernie rozłożonego odpowiadającego prądowi dwunastu lokomotyw

Fig. 4.14. Distribution of the rails potentials under the evenly spread load corresponding to the current of twelve engines



Rys. 4.15. Zależność sumarycznej względnej wartości prądów błądzących od liczby lokomotyw obciążających sieć

Fig. 4.15. Relation between the total relative values of stray currents and the number of engines loading the system

Obliczone wg wzoru (4.16) względne sumaryczne wartości prądów błądzących dla poszczególnych przypadków obciążenia przedstawiono na rys. 4.15, odnosząc je do wartości prądu obciążenia pojedynczej lokomotywy ($\Sigma I_b/I_1$) oraz do prądu obciążenia sieci ($\Sigma I_b/mI_1$).

Z rysunków 4.10 do 4.15 wynikają następujące ważniejsze wnioski:

- wzrost liczby lokomotyw obciążających sieć przyczynia się do stabilizacji rozkładu potencjałów szyn w czasie i przestrzeni, a więc i do mniejszej zmienności prądów błądzących obserwowanych w przodkach,
- ustabilizowany rozkład stref anodowych i katodowych ogranicza możliwość zmienności czasowej powstawania warunków sprzyjających rozprzestrzenianiu się prądów błądzących za pośrednictwem rozległych konstrukcji metalowych,
- wzrost liczby lokomotyw obciążających sieć powoduje obniżenie się sumarycznej wartości prądów błądzących odniesionych do całkowitego prądu obciążenia sieci.

Wnioski te upoważniają do sformułowania wskazówek ułatwiających praktyczną ocenę ryzyka związanego z prądami błądzącymi (tablica 4.7).

Tablica 4.7

Zasady oceny sposobu obciążenia sieci trakcyjnej

Opis czynnika ryzyka i jego stanu	Ocena stanu czynnika ryzyka:			
	najlepszy możliwy	zalecany	najgorszy dopuszczalny	niedopuszczalnie zły
Liczba lokomotyw obciążających jednocześnie jeden rejon zasilania				
Obciążenie rozłożone równomiernie (ponad 4 lokomotywy w każdym rejonie zasilania)	X			
Dwie lub więcej lokomotyw w każdym rejonie zasilania		X		
Jedna lokomotywa przejeżdżająca do kolejnych rejonów zasilania			X	

4.3.8. Usytuowanie linii trakcji elektrycznej przewodowej na powierzchni

Pole przepływowe prądów błądzących w górotworze obejmuje teoretycznie obszar nieskończenie rozległy. Rozważając możliwe drogi rozprzestrzeniania się prądów błądzących, a zwłaszcza uwzględniając możliwość pośredniczenia rozległych konstrukcji metalowych, należy, jako przyczynę prądów błądzących w zakładach górniczych, uwzględnić również linie trakcji elektrycznej na powierzchni. W przypadku odkrywkowych zakładów górniczych jest to oczywiste i wszystkie czynniki omówione w rozdziałach 4.3.2 do 4.3.7 należy poddać ana-

lizie z uwzględnieniem specyfiki kopalń odkrywkowych. W przypadku podziemnych zakładów górniczych decydującą rolę odgrywają rozległe konstrukcje metalowe prowadzone z powierzchni w szybach, otworach wiertniczych itp. Pośrednictwo rozległych konstrukcji metalowych i występowanie w wyrobiskach podziemnych prądów błędzących wywołanych pracą trakcji elektrycznej powierzchniowej zostało jednoznacznie udowodnione pomiarowo [17, 21]. Możliwość występowania źródeł prądu błędzącego spowodowanych trakcją elektryczną na powierzchni uwarunkowana jest przede wszystkim wzajemnym usytuowaniem linii trakcji elektrycznej, szybów i/lub otworów wiertniczych oraz miejsc, w których rozpatrywane jest zagrożenie (np. miejsc wykonywania robót strzelniczych). Można ją zatem analizować podobnie jak warunki sprzyjające rozprzestrzenianiu się prądów błędzących (por. rozdz. 4.3.6), traktując szyby i otwory wiertnicze jako miejsca rzeczywistego lub potencjalnego instalowania rozległych konstrukcji metalowych (por. rys. 4.8). Wskazówki praktyczne do takiej analizy przy ocenie ryzyka przedstawiono w tablicy 4.8.

Tablica 4.8

Zasady oceny usytuowania powierzchniowych linii trakcji elektrycznej

Opis czynnika ryzyka i jego stanu	Ocena stanu czynnika ryzyka:			
	najlepszy możliwy	zalecany (oczekiwany)*	najgorszy dopuszczalny	niedopuszczalnie zły
Obecność linii trakcji elektrycznej w pobliżu szybów i/lub otworów wiertniczych				
Brak linii	X			
Linia w pobliżu jednego lub więcej szybów (otworów) znajdujących się w zasięgu tej samej strefy potencjału szyn (anodowej lub katodowej)		X		
Linia w pobliżu dwóch lub więcej szybów (otworów) znajdujących się w zasięgu różnych stref potencjału szyn			X	
Linia w pobliżu dwóch lub więcej szybów (otworów) znajdujących się w zasięgu różnych stref potencjału szyn przy równoczesnej negatywnej ocenie stanu złączy izolujących (por. tablica 5.3)				X
* określenia „zalecany” nie należy w tym przypadku traktować jako zalecenia; zachowano je ze względu na symetrię w stosunku do oceny stanu w pozostałych czynnikach ryzyka				

4.4. Ocena prawdopodobieństwa wystąpienia źródeł prądu błędzącego

Podstawą oceny prawdopodobieństwa wystąpienia źródeł prądu błędzącego jest analiza czynników ryzyka z wykorzystaniem tablic 4.1 do 4.5, 4.7 i 4.8. Uwzględniono w nich łącz-

nie 13 czynników. Miarą prawdopodobieństwa zdarzenia Z1 (por. rys. 4.2 i 4.4), polegającego na możliwości wystąpienia w miejscach wykonywania robót strzelniczych źródeł prądu błędzącego, będzie wskaźnik obliczony wg wzoru (3.2):

$$p_{Z1} = \frac{\sum_{i=1}^{13} C_{Zi}}{52} \Rightarrow P\{Z1\} \quad (4.17)$$

Na podstawie wartości tak obliczonego wskaźnika p_{Z1} , z tablicy 3.6 można określić przewidywane prawdopodobieństwo wystąpienia źródeł prądu błędzącego.

4.5. Ocena prawdopodobieństwa przedostania się prądów błędzących do obwodu strzałowego

Podczas wykonywania robót strzelniczych z wykorzystaniem tradycyjnych zapalników elektrycznych nie można uniknąć stykania się elementów obwodu strzałowego z dowolnymi punktami w wyrobisku, które potencjalnie mogą być zaciskami źródła prądu błędzącego. W takiej sytuacji możliwość przedostania się prądów błędzących do obwodu strzałowego uwarunkowana jest przede wszystkim uszkodzeniem (lub brakiem) izolacji przewodów zapalnikowych lub stanowiących linią strzałową (por. zdarzenie Z2, rys. 4.2). Obwód strzałowy różni się zasadniczo od każdej typowej instalacji elektrycznej, w związku z czym nie jest możliwe zastosowanie w nim znanych w energo- lub teleelektryce technicznych metod bieżącego kontrolowania izolacji. Stan izolacji linii strzałowej powinien być, oczywiście, kontrolowany przez strzałowych, ale efektywność takiej kontroli uzależniona jest przede wszystkim od tzw. czynnika ludzkiego, jako jednego z czynników wpływających na ryzyko. Przykładowo, wg normy określającej zasady oceny ryzyka w kontakcie człowieka z maszynami [84], czynnik ludzki dotyczy m.in. „zdolności osób do uświadomienia sobie ryzyka w danej sytuacji, zależnie od ich wykszolenia, doświadczenia i umiejętności”, przy czym „w szacowaniu tej zdolności należy uwzględnić (...):

- naturalne lub nabyte umiejętności wykonywania przewidzianych zadań,
- świadomość ryzyka,
- poziom przeświadczenia, że przewidziane zadanie realizuje się bez zamierzonych lub niezamierzonych odstępstw,
- skłonności do odstępstw od przyjętych i koniecznych procedur pracy zapewniających bezpieczeństwo”.

Należy zwrócić zatem uwagę na wpływ szkolenia, doświadczenia i umiejętności osób wykonujących roboty strzelnicze na ryzyko, choć jest to wpływ trudny do ilościowego określenia. Ważne jest jednak stwierdzenie zawarte w wymienionej normie, że „żaden z tych czynników nie może być traktowany jako substytut do eliminacji zagrożeń czy zmniejszenia ryzyka metodą rozwiązań konstrukcyjnych lub stosowania urządzeń ochronnych, jeśli te środki bezpieczeństwa mogą być stosowane”.

W tym kontekście prawdopodobieństwo przedostania się prądów błędzących do obwodu strzałowego można szacować odnosząc je do zastosowanych środków ostrożności w sposób przedstawiony w tablicy 4.9.

Tablica 4.9

Zasady szacowania prawdopodobieństwa przedostania się prądów błędzących do obwodu strzałowego

Zastosowane środki ostrożności	Prawdopodobieństwo przedostania się prądów błędzących do obwodu strzałowego $P\{Z2\}$	
	określenie przewidywanego prawdopodobieństwa	wartość wskaźnika liczbowego prawdopodobieństwa $Pz2$
Rezygnacja z użycia zapalników elektrycznych lub Wykonywanie robót strzelniczych dopuszczalnych warunkowo (wg [91]), lub/i Właściwa kontrola izolacji (stanu) linii strzałowej	nieprawdopodobne	0
Wykonywanie robót strzelniczych przy użyciu zapalników elektrycznych bez zastosowania dodatkowych środków ostrożności	częste	1

4.6. Ocena możliwości ograniczenia względnych wartości prądu błędzącego w obwodach strzałowych

O możliwości pojawienia się w obwodzie strzałowym prądu błędzącego przekraczającego wartość prądu bezpiecznego zapalnika elektrycznego (lub w przypadku prądów błędzących krótkotrwałych, energii przekraczającej minimalny impuls zapłonowy) decyduje szereg czynników zależnych od:

- czułości użytego zapalnika elektrycznego,
- sposobu wykonywania pomiarów okresowych i doraźnych oraz oceny ich wyników,
- sposobu prowadzenia robót strzelniczych dopuszczalnych warunkowo,
- zastosowanych dodatkowych środków profilaktycznych.

Logiczne powiązanie poszczególnych czynników wynika z drzewa niezdatności przedstawionego na rysunkach 4.2 i 4.3 (zdarzenia: Z3, Z31, N10, N15). Tylko część zdarzeń wynika z zaniedbań technicznych (np. N6, N12) lub organizacyjnych (N14, P3). Większość pozostałych związana jest w większym lub mniejszym stopniu z trudnym do ilościowego określenia czynnikiem ludzkim (por. uwagi w rozdz. 4.5). Szczególną rolę w profilaktyce mającej na celu ograniczenie poziomu ryzyka związanego z prądami błędzącymi przy wykonywaniu robót strzelniczych odgrywają pomiary okresowe i doraźne. Wykonuje się je obowiązkowo, zgodnie z wymaganiami przepisów [101] i norm [91]. Od wyników pomiarów zależy m. in. wybór prądu bezpiecznego zapalników, decyzja o przystąpieniu do robót strzelniczych dopuszczalnych warunkowo, albo konieczność zastosowania określonych środków profilaktycznych.

Tablica 4.10

Zasady szacowania prawdopodobieństwa pojawienia się w obwodzie strzałowym prądu błędzącego o wartości przekraczającej prąd bezpieczny stosowanego zapalnika

Zastosowane środki profilaktyczne	$P\{Z3\}=P\{I_{pb}>I_{bZE} \text{ lub } E_{pb}>K_{zmin}\}$	
	określenie przewidywanego prawdopodobieństwa	wartość wskaźnika liczbowego prawdopodobieństwa $Pz3$
Ekwipotencjalizacja punktów stanowiących niebezpieczne źródła prądów błędzących, lub Eliminacja przyczyny prądów błędzących ^{*)} zidentyfikowanej wynikami pozytywnych, ponownie wykonanych pomiarów okresowych i doraźnych, lub Zastosowanie zapalników elektrycznych o wyższym prądzie bezpiecznym.	nieprawdopodobne	0
Brak możliwości zastosowania jednego z powyższych środków	zależne od pomiarów okresowych	wg wzoru (4.18)

^{*)} np. przez ograniczenie ruchu lokomotyw elektrycznych, wyłączenie zasilania określonego odcinka sieci trakcyjnej na czas wykonywania robót strzelniczych itp.

Dysponując poprawnie wykonanymi i odpowiednio udokumentowanymi wynikami pomiarów okresowych (lub/i doraźnych) z okresu poprzedzającego (np. 1 rok) analizę ryzyka, wartości liczbowe wskaźnika prawdopodobieństwa $Pz3$ przyjąć można jako równe względnej częstości występowania niedopuszczalnych wartości prądów błędzących i obliczyć posługując się wzorem:

$$P_{Z3} = \frac{n_{Z3}}{n_1 + 5 \cdot n_5} \quad (4.18)$$

w którym

n_1 – liczba pomiarów o czasie trwania ok. 1 minuty,

n_5 – liczba pomiarów w czasie trwania co najmniej 5 minut,

n_{Z3} – liczba wyników pomiarów prądów błędzących długotrwałych o wartościach przekraczających wartość prądu bezpiecznego stosowanych zapalników elektrycznych lub prądów krótkotrwałych o energii przekraczającej wartość minimalnego impulsu zapłonowego stosowanych zapalników.

W tabelicy 4.10 przedstawiono propozycje szacowania prawdopodobieństwa pojawienia się w obwodzie strzałowym prądu błędzącego o wartości przekraczającej prąd bezpieczny stosowanego zapalnika.

4.7. Zasady oceny ryzyka związanego z prądami błędzącymi przy robotach strzelniczych

Ryzyko związane z prądami błędzącymi przy wykonywaniu robót strzelniczych (ZRS), zgodnie z rozdz. 3.3.3, powinno być oceniane doraźnie i perspektywicznie. Ocena doraźna związana jest z ryzykiem odniesionym do każdej z realizowanych robót strzelniczych, niezależnie od liczby i częstości ich wykonywania. Element częstości i czasu (por. rys. 4.5) nie wpływa wówczas na ocenę prawdopodobieństwa niekontrolowanego odpalenia zapalnika elektrycznego; o poziomie ryzyka decydują wyłącznie prawdopodobieństwa zdarzeń Z1, Z2 i Z3 określane wg zasad przedstawionych w rozdz. 4.3 do 4.6. Podstawą doraźnej (bieżącej) oceny ryzyka jest prawdopodobieństwo $P\{ZRS\}$ równoczesnego wystąpienia trzech niezależnych zdarzeń Z1, Z2 i Z3, obliczane za pomocą wskaźników liczbowych z wyrażenia:

$$P_{ZRS} = P_{Z1} \cdot P_{Z2} \cdot P_{Z3} \Rightarrow P\{ZRS\} = P\{Z1\} \cdot P\{Z2\} \cdot P\{Z3\} \quad (4.19)$$

w którym wartości wskaźników p_{Z1} , p_{Z2} , p_{Z3} wynikają ze wzorów (4.17) i (4.18) oraz z tablic 4.9 i 4.10.

Ocena perspektywiczna, związana z długofalowym procesem zarządzania bezpieczeństwem, dotyczy okresowej oceny ryzyka oraz jego prognozowania. Nie można wówczas pominąć elementu czasu i częstości wykonywanych robót strzelniczych w zakładzie górniczym. Czas trwania narażenia osób wykonujących roboty strzelnicze na najcięższe skutki równoznaczny jest z czasem wykonywania tych robót, tzn. od rozłożenia sprzętu strzałowego do

odpalenia zapalników, a także ewentualnego usuwania niewypałów. Rozpatrując ten czas w dłuższej perspektywie można go zastąpić liczbą wykonywanych robót i jako podstawę oceny przyjąć częstość tych robót. Kierując się ustaleniami zaproponowanymi w rozdz. 3.3.3, prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia obliczyć można wg wzoru:

$$P_{ZRS} = P_C \cdot P_{Z1} \cdot P_{Z2} \cdot P_{Z3} \Rightarrow P\{ZRS\} \quad (4.20)$$

w którym wskaźnik p_C określa się zgodnie z tablicą 3.8.

Znając prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia, ryzyko niekontrolowanego odpalenia zapalnika elektrycznego pod wpływem prądów błędzących wywołanych pracą trakcyjnej przewodowej ocenić można w skali czterostopniowej według zasad przedstawionych w tabelicy 4.11.

Tablica 4.11

Zasady oceny ryzyka przy robotach strzelniczych związanego z prądami błędzącymi wywołanymi pracą trakcyjnej elektrycznej przewodowej

Częstość wykonywania robót strzelniczych	P{ZRS}				
	nieprawdopodobne ($p_{ZRS} = 0$)	nikłe ($0 < p_{ZRS} \leq 0,25$)	okazjonalne ($0,25 < p_{ZRS} \leq 0,50$)	możliwe ($0,50 < p_{ZRS} \leq 0,75$)	częste ($0,75 < p_{ZRS} \leq 1,00$)
Roboty sporadyczne ¹⁾	BR	Rt	Rt	Rt	Ru
Roboty wykonywane rzadko ¹⁾	BR	Rt	Rt	Ru	Ri
Roboty wykonywane często ¹⁾	BR	Rt	Ru	Ri	Rnt
Doraźna ocena ryzyka ²⁾	BR	Rt	Ru	Ri	Rnt

¹⁾ prognozowanie i ocena okresowa ryzyka (np. raz w roku)
²⁾ przed każdym rozpoczęciem robót strzelniczych

5. RYZYKO PORAŻENIA PRĄDEM ELEKTRYCZNYM OD URZĄDZEŃ TRAKCJI ELEKTRYCZNEJ PRZEWODOWEJ

5.1. Uwagi wstępne

W odróżnieniu do przedstawionych w rozdz.4 zagrożeń związanych z prądami błądzącymi przy robotach strzelniczych, przy których wypadki niekontrolowanego odpalenia zapalników elektrycznych występują bardzo rzadko, zagrożenie porażeniowe od urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej należy do znaczących, a liczba wypadków jest ciągle duża [6].

Porażenia od urządzeń trakcji elektrycznej w kopalniach mają swoją specyfikę, o której decydują następujące względy:

- dostępność części czynnych (stosunkowo nisko zawieszony przewód jezdny), w związku z czym do większości wypadków dochodzi wskutek dotyku bezpośredniego,
- łatwy dostęp do części przewodzących dostępnych urządzeń zasilanych z przewodu jezdnego lub stanowiących wyposażenie sieci górnej (np. łączniki sekcyjne, tablice informacyjne itp.),
- ograniczone wymiary wyrobisk i nagromadzenie w pobliżu torowiska dobrze uziemionych konstrukcji metalowych,
- stosunkowo niska wartość napięcia zasilania przewodu jezdnego, co może być groźnym subiektywnym czynnikiem osłabiającym świadomość realnego zagrożenia,
- częste prowadzenie prac przy urządzeniach nieelektrycznych (przez służby nieelektryczne) znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie przewodu jezdnego,
- możliwość występowania praktycznie dowolnych dróg przepływu prądu rażeniowego, zwłaszcza przy wypadkach związanych z ignorowaniem zakazów pracy i poruszania się w pobliżu nie wyłączzonego spod napięcia przewodu jezdnego,
- niesprzyjające warunki środowiskowe (np. występowanie wody znajdującej się na torowisku lub wydostającej się z uszkodzonych rurociągów, możliwość zasypania szyn jezdnych suchym pyłem kamiennym, dyskomfort cieplny w miejscu zainstalowania stacji zasilających sieć trakcyjną lub w niektórych fragmentach linii),
- możliwość uszkodzenia mechanicznego przewodów zasilających dolnych, łączników podłużnych szyn oraz przewodów uszyniających roboczych i ochronnych,
- możliwość jednoczesnego występowania w zasięgu ręki szyn jezdnych (lub urządzeń uszynionych) i urządzeń elektrycznych prądu przemiennego przyłączonych do SUPO.

Specyfika ta sprawia, że analiza ryzyka związanego z porażeniem prądem elektrycznym od urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej poprzedzona powinna być szczegółową analizą dotychczas zaistniałych wypadków, dostarczającą danych pozwalających opracować powtarzalne scenariusze sytuacji wypadkowych i ustalić czynniki wpływające na elementy składowe ryzyka.

5.2. Wypadki porażenia prądem elektrycznym od urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej zaistniałe w zakładach górniczych w okresie wybranych 10 lat

Wypadki elektryczne przy urządzeniach trakcji elektrycznej przewodowej dołowej analizowano na podstawie dokumentacji powypadkowych, uwzględniając informacje zawarte w:

- orzeczeniach powypadkowych sporządzanych przez komisje powypadkowe powoływane każdorazowo przez Okręgowe Urzędy Górnicze,
- zeznaniach i relacjach poszkodowanych oraz świadków wypadku wynikających z protokołów przesłuchań,
- orzeczeniach lekarskich,
- protokołach z sekcji zwłok (jeśli były przeprowadzane),
- treści poleceń wydanych w związku z czynnościami, przy których doszło do wypadków,
- protokołach badań wykonanych po wypadku na polecenie komisji powypadkowej,
- opisach miejsc i okoliczności wypadków.

Jako materiały źródłowe do zebrania danych charakteryzujących zaistniałe wypadki potraktowano przechowywane w Wyższym Urzędzie Górniczym dokumentacje powypadkowe z wybranych 10 lat (1980 i od 1988 do 1996) [12]. W rozpatrywanym okresie w kopalniach węgla kamiennego wydarzyły się 22 zgłoszone wypadki elektryczne związane z urządzeniami trakcji elektrycznej przewodowej (ok. 20% wszystkich wypadków elektrycznych w podziemiach kopalń). Dziewięć z nich było wypadkami śmiertelnymi (40,9%), dwanaście zakwalifikowano jako wypadki lekkie (54,5%), a pozostały jeden jako ciężki. Jeden wypadek (lekki) nie był związany z porażeniem prądem (oparzenie łukiem elektrycznym). W tabelicy 5.1 zestawiono wybrane cechy zaistniałych wypadków.

Jako dotyk bezpośredni jednobiegunowy (poz. 1 do 5 w tabelicy 5.1) potraktowano sytuację dotknięcia przewodu jezdnego pod napięciem, odbieraka prądu lokomotywy stykającego się z przewodem jezdny lub żyły górnego przewodu zasilającego, przy jednoczesnej styczności

ze spągami lub uziemionymi częściami przewodzącymi obcymi. W dwóch przypadkach dotknięcie przewodu jezdnego pod napięciem (poz. 6 i 7, tablica 5.1) nastąpiło przewodzącym przedmiotem (mokra łopata, element łącznika poprzecznego szyn).

Tablica 5.1

Wybrane cechy charakteryzujące wypadki porażen od urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej w kopalniach.

Lp.	Rodzaj dotyku	Miejsce wpływu prądu rażeniowego	Miejsce wpływu prądu rażeniowego	Skutek rażenia (ciężkość wypadku)	Schemat zastępczy obwodu rażeniowego ¹⁾
1	2	3	4	5	6
1	Dotyk bezpośredni jednobiegunowy	przedramię	stopy	śmiertelny	rys. 5.36
2	Dotyk bezpośredni jednobiegunowy	kark	ręka	śmiertelny	rys. 5.36
3	Dotyk bezpośredni jednobiegunowy	przedramię prawe	dłoń lewa	ciężki	rys. 5.36
4	Dotyk bezpośredni jednobiegunowy	ręka	stopy	lekki	rys. 5.36
5	Dotyk bezpośredni jednobiegunowy	ręka	stopy	lekki	rys. 5.36
6	Dotyk bezpośredni jednobiegunowy przewodu jezdnego przewodzącym przedmiotem	ręka	stopy	(ciężki) ²⁾ lekki	rys. 5.37
7	Dotyk bezpośredni jednobiegunowy przewodu jezdnego przewodzącym przedmiotem	ręce	stopy	lekki	rys. 5.37
8	Dotyk bezpośredni dwubiegunowy	ręka	stopy	lekki	rys. 5.38
9	Dotyk bezpośredni dwubiegunowy	ręka	stopy	lekki	rys. 5.38
10	Dotyk bezpośredni dwubiegunowy	ręka	ręka (stopy) ³⁾	lekki	rys. 5.38
11	Dotyk bezpośredni dwubiegunowy	lewy bark ⁴⁾	stopy	lekki	rys. 5.38
12	Dotyk bezpośredni dwubiegunowy	lewe ramię ⁴⁾	stopy	śmiertelny	rys. 5.38
13	Dotyk bezpośredni dwubiegunowy	bark ⁴⁾	stopy	śmiertelny	rys. 5.38
14	Dotyk bezpośredni dwubiegunowy	głowa	ręce (stopy) ³⁾	śmiertelny	rys. 5.38
15	Dotyk bezpośredni dwubiegunowy	bark	ręce (stopy) ³⁾	śmiertelny	rys. 5.38
16	Dotyk bezpośredni dwubiegunowy	plecy	ręce (stopy) ³⁾	śmiertelny	rys. 5.38
17	Dotyk bezpośredni dwubiegunowy	szyja	ręce (stopy) ³⁾	śmiertelny	rys. 5.38
18	Dotyk bezpośredni dwubiegunowy	plecy	ręce	śmiertelny	rys. 5.38
19	Dotyk bezpośredni dwubiegunowy	szyja	ręce	lekki	rys. 5.38
20	Dotyk bezpośredni jednobiegunowy przewodu roboczego tablicy ostrzegawczej	biodro	stopy	lekki	rys. 5.39

cd. tablicy 5.1

1	2	3	4	5	6
21	Dotyk pośredni (kabina lokomotywy)	stopa (ręka) ⁵⁾	stopa (stopa prawa) ⁵⁾	lekki	rys. 5.41
22	Bez dotyku – oparzenie łukiem	-	prawa dłoń	lekki	-

Uwagi: ¹⁾ Rysunki schematów zastępczych obwodów rażeniowych przedstawiono w rozdziale 5.6.1 i 5.6.2.
²⁾ Kwalifikacja wypadku z ciężkiego na lekki została zmieniona w trakcie leczenia.
³⁾ Wypadki powstałe podczas przechodzenia przez wozy na drugą stronę chodnika przewozowego; nie zdołano ustalić jednoznacznie, czy prąd rażeniowy wypływał jednopunktowo, czy też kilkoma punktami.
⁴⁾ Rażeni stali w wozach wykonując prace przy urządzeniach znajdujących się na wysokości przewodu jezdnego.
⁵⁾ Rażenie nastąpiło podczas wsiadania do kabiny lokomotywy stojącej na warstwie pyłu kamiennego. Nie ustalono jednoznacznie drogi przepływu prądu rażeniowego.

Dotyk bezpośredni dwubiegunowy (poz. 8 do 19, tablica 5.1) dotyczy wypadków jednoczesnego dotknięcia przewodu jezdnego pod napięciem i szyn jezdnych. Okoliczności wypadków dotyku bezpośredniego dwubiegunowego były podobne; dochodziło do nich podczas przechodzenia przez wozy na drugą stronę wyrobiska lub podczas prac przy urządzeniach nieelektrycznych znajdujących się w pobliżu nie wyłączonego przewodu jezdnego.

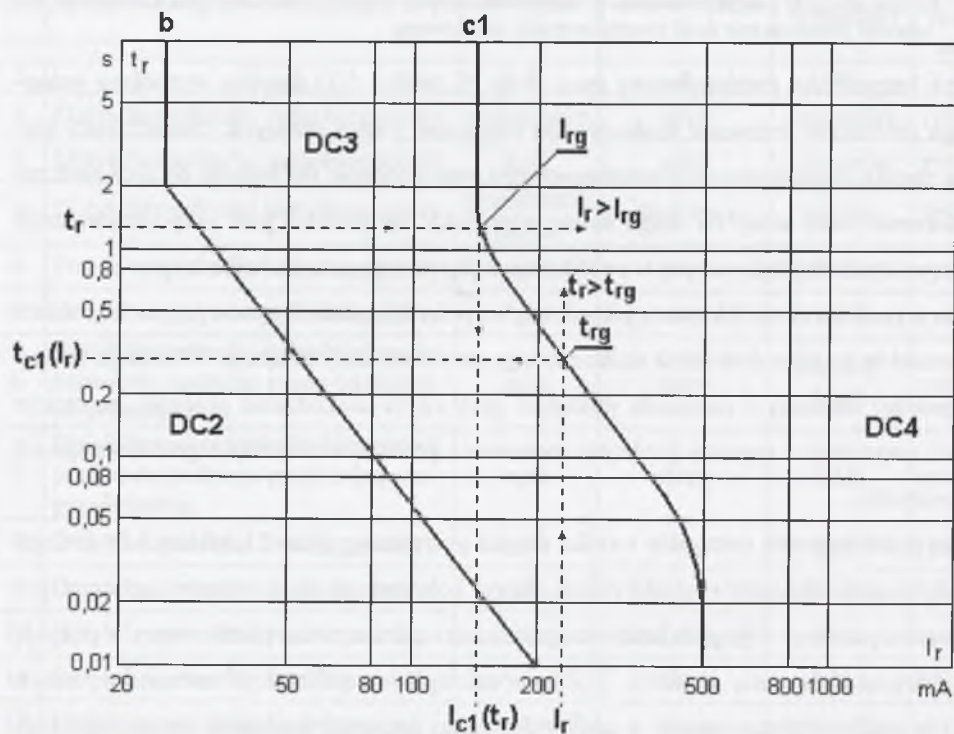
Jeden wypadek zakwalifikowany jako dotyk bezpośredni jednobiegunowy (poz. 20, tablica 5.1) powstał w wyniku dotknięcia uszkodzonego przewodu uszyniającego roboczego tablicy ostrzegawczej zasilanej z przewodu jezdnego, przy czym uszkodzenie polegało na utracie ciągłości połączenia z szynami jezdnyymi (oderwanie przewodu uszyniającego roboczego od szyn jezdnych).

Tylko jeden wypadek nastąpił w wyniku dotyku pośredniego (poz. 21, tablica 5.1). Polegał on na dotknięciu lokomotywy elektrycznej, której koła stykały się z szynami jezdnyymi poprzez warstwę rozsypanego pyłu kamiennego, a nastawnik nie został przestawiony w pozycję odpowiadającą wyłączeniu silników. Dostępne szczegółowe informacje⁶ zebrane w ramach analizy wypadków zestawionych w tablicy 5.1 mogą stanowić podstawę do sporządzenia drzew zdarzeń prowadzących do porażen (rozd. 5.3) oraz schematów zastępczych obwodów rażeniowych, jakie powstają podczas najczęściej występujących (typowych) wypadków w sieci trakcyjnej (rozd. 5.6.1 i 5.6.2).

⁶ Informacje zawarte w większości dokumentacji powypadkowej nie zawsze zawierają szczegółowe dane umożliwiające jednoznaczne odtworzenie obwodu rażeniowego, a więc i analizę retrospektywną oraz prognozowanie ciężkości skutków wypadku; za celowe należy uznać opracowanie zasad tworzenia bazy danych o wypadkach, przydatnej w procesie analizy ryzyka.

5.3. Drzewo niezdatności prowadzących do porażenia prądem elektrycznym od urządzeń trakcyjnej elektrycznej przewodowej

Rozpatrując możliwość zaistnienia wypadku porażenia prądem elektrycznym, jako finalne zdarzenie niepożądane przyjmuje się porażenie zagrażające życiu, w wyniku mogącej wystąpić fibrylacji komór serca. Znajduje to wyraz w określaniu dopuszczalnych czasów rażenia, prądów rażeniowych i napięć dotykowych (por. np. [98]) i jest zgodne z aktualnym stanem wiedzy, prezentowanym m.in. w raportach IEC [73] i w najnowszych opracowaniach dotyczących działania prądu elektrycznego na organizm człowieka [1, 3, 59].



Rys. 5.1. Zależność dopuszczalnego czasu rażenia od wartości prądu rażeniowego stałego wstępującego, płynącego na drodze stopy – lewa dłoń (wg [73])

Fig. 5.1. Relation between the allowable duration of electric shock and the value of direct shock current passing upward and along the path of: foot-left hand (according to [73])

Inne skutki porażenia (prowadzące do wypadków lekkich lub nawet ciężkich, ale nie zagrażające życiu), aczkolwiek dla poszkodowanych nieraz szokujące, mieszczą się w granicach ryzyka tolerowanego. Kierując się przy ustalaniu kryteriów działania środków ochrony warunkami najbardziej niekorzystnymi, uzyskuje się pewność, że przy występowaniu warunków korzystniejszych ryzyko będzie mniejsze. Należy zatem dążyć do uwzględniania możliwie

wszystkich zdarzeń elementarnych i czynników negatywnie wpływających na stopień porażenia bądź na prawdopodobieństwo wystąpienia wypadków.

Zgodnie z ustaleniami raportu IEC [73], zdarzenie zagrażające życiu następuje wówczas, gdy wartości prądu rażeniowego lub czasu rażenia przekraczają wartości graniczne wynikające z krzywej c_1 rozdzielającej strefy DC3 i DC4 (rys. 5.1), czyli wówczas, gdy spełniona jest jedna z nierówności:

$$I_r > I_{rg} = I_{c1}(t_r) \quad (5.1a)$$

$$t_r > t_{rg} = t_{c1}(I_r) \quad (5.1b)$$

w których graniczna dopuszczalna wartość prądu rażeniowego I_{rg} odpowiada wartości prądu wynikającego z krzywej c_1 przy określonym czasie rażenia t_r , a dopuszczalny czas rażenia t_{rg} wyznaczony jest w podobny sposób z krzywej c_1 przy określonym prądzie rażeniowym I_r . Zdarzenia prowadzące do takiej sytuacji przedstawiono na rysunkach 5.2 do 5.4.

Na podstawie drzew niezdatności (błędów) napisać można następujące równania logiczne:

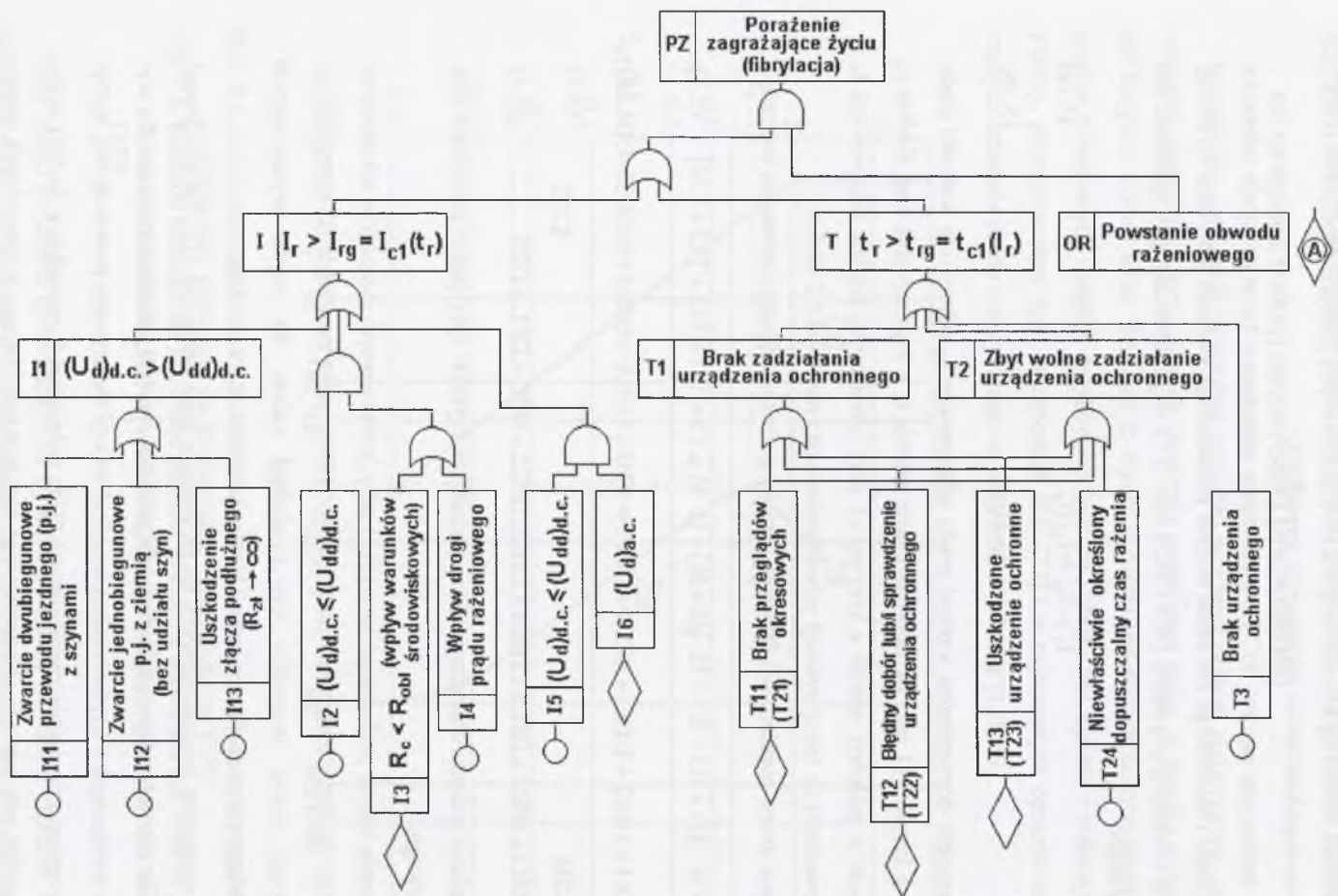
$$PZ = OR \cdot [I11 + I12 + I13 + I2 \cdot (I3 + I4) + I5 \cdot I6 + T3 + T11 + T12 + T13 + T24] \quad (5.2)$$

$$OR = D \cdot (UD11 + UD12 + UD13 + UD14 + UD15 + UD3 + UDU1 + UDL1 + UDL21 \cdot UDL22) \quad (5.3)$$

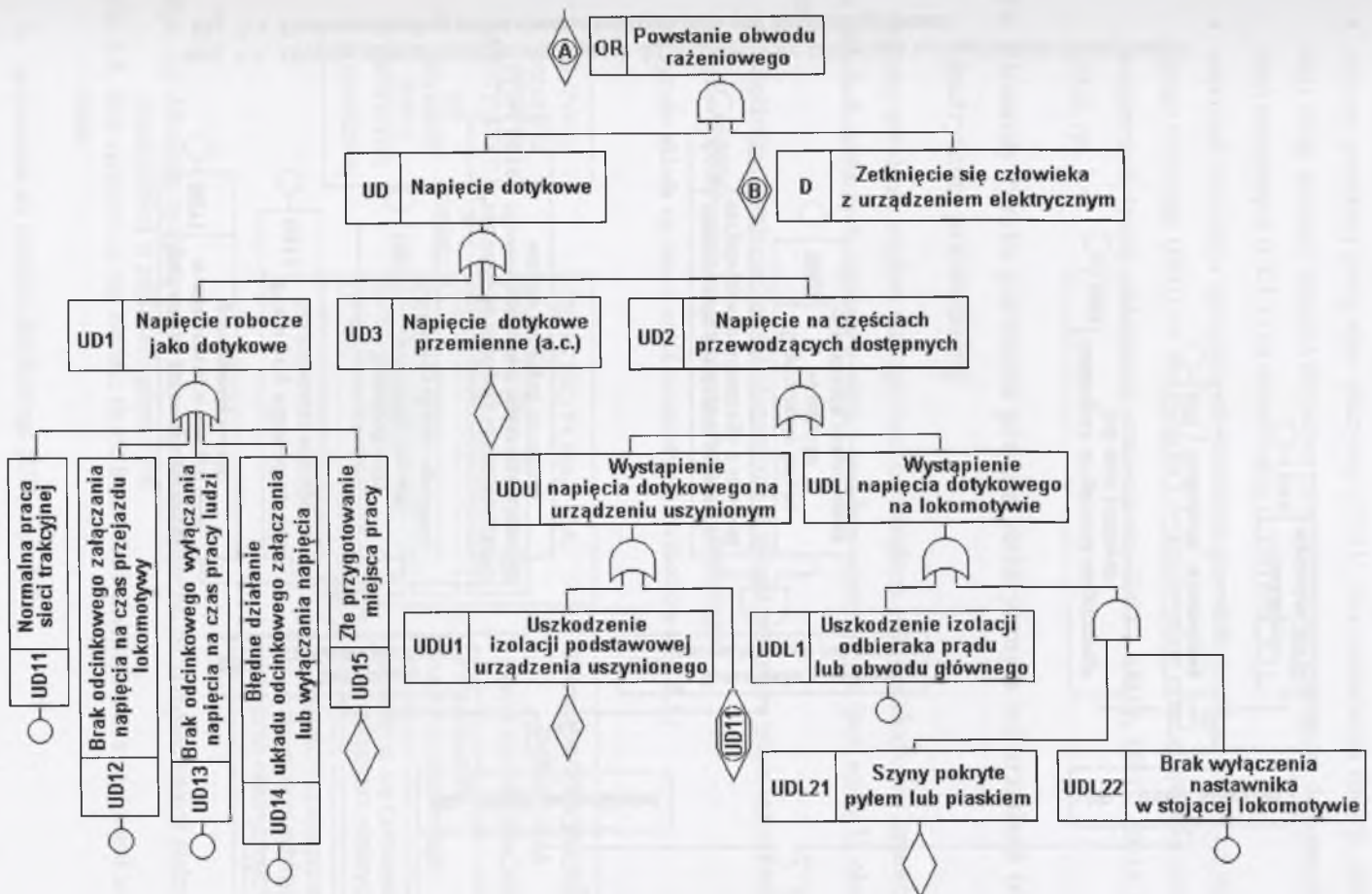
$$D = DB11 + DB12 + DB13 + DB14 + DB21 \cdot DB22 + DPU + DPL + DPS \quad (5.4)$$

z których wynikają wnioski charakteryzujące ważniejsze czynniki sprzyjające zaistnieniu zdarzenia szczytowego:

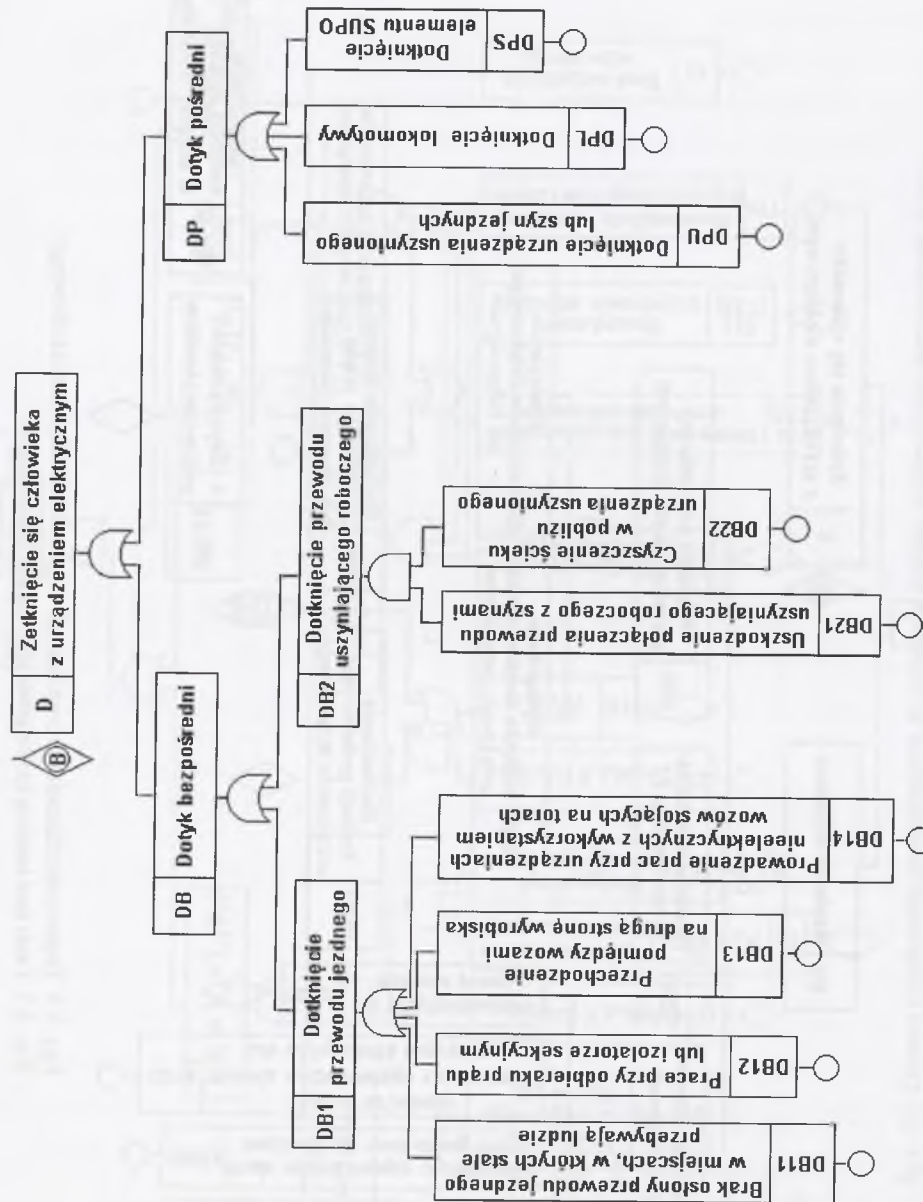
- uszkodzenie złącza podłużnego szyn (I13) przy jednoczesnym dotknięciu lokomotywy (DPL) lub obudowy urządzenia uszynionego (DPU) mogą prowadzić do porażenia zagrażającego życiu; wszystkie trzy zdarzenia należą do często występujących w warunkach normalnej pracy trakcyjnej elektrycznej (rys. 5.2 i rys. 5.4),
- wpływ warunków środowiskowych na rezystancję ciała człowieka (I3) lub możliwość powstania różnych dróg przepływu prądu rażeniowego (I4), charakterystyczne dla wypadków związanych z użytkowaniem urządzeń trakcyjnej elektrycznej przewodowej, sprzyjają wystąpieniu porażenia zagrażającego życiu (zdarzenie I prowadzące do PZ) nawet w przypadku, gdy wartość obliczeniowego napięcia dotykowego w normalnych warunkach nie przekracza wartości dopuszczalnej (I2), (rys. 5.2),



Rys. 5.2. Drzewo niezdatności prowadzących do porażenia prądem elektrycznym zagrażającego życiu
 Fig. 5.2. Fault tree leading to electric shock hazard of electrocution



Rys. 5.3. Drzewo niezdatności prowadzących do powstania obwodu rażeniowego
 Fig. 5.3. Fault tree leading to the generation of the shock circuit



Rys. 5.4. Drzewo niezdatności prowadzących do zetknięcia się człowieka z urządzeniem elektrycznym
Fig. 5.4. Fault tree leading to the contact between man and electric equipment

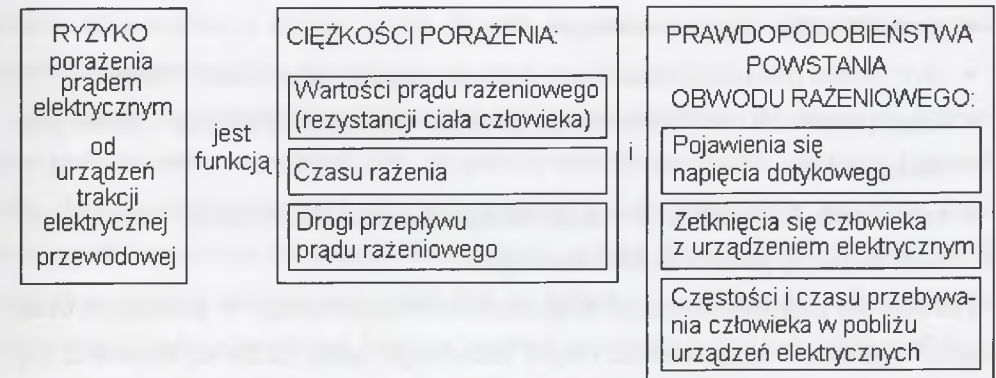
- podczas normalnej pracy sieci trakcyjnej (UD11) (bez uszkodzenia izolacji podstawowej) mogą wystąpić napięcia dotykowe na częściach przewodzących dostępnych urządzeń uszynionych (UDU) i na lokomotywie (UDL) (rys. 5.3),
- większość czynników sprzyjających dotknięciu przewodu jezdnego (DB1) lub uszyniającego roboczego (DB2) nie ma związku z wykonywaniem przez elektryków prac przy urządzeniach trakcji elektrycznej przewodowej (DB11, DB12, DB13, DB14, DB21, DB22, rys. 5.4).

5.4. Elementy ryzyka porażenia prądem elektrycznym od urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej

Ryzyko porażenia prądem elektrycznym od urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej w zakładach górniczych, zgodnie z teorią i zasadami oceny ryzyka (por. rozdz.3), określone jest:

- ciężkością porażenia (patofizjologicznymi skutkami przepływu prądu rażeniowego),
- prawdopodobieństwem powstania obwodu rażeniowego.

Na ryzyko składa się zatem sześć niezależnych elementów (rys. 5.5):



Rys. 5.5. Elementy ryzyka porażenia prądem elektrycznym od urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej w zakładach górniczych
Fig. 5.5. Risk elements of the electric shock from wired electric traction equipment in a coal mine

- pojawienie się napięcia dotykowego (UD – rys. 5.3),
- zetknięcie się człowieka z urządzeniem elektrycznym (D – rys. 5.4),
- częstości i czasu przebywania człowieka w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej (C),
- wartość prądu rażeniowego (I – rys. 5.2),

- czas rażenia (T – rys. 5.2),
- droga przepływu prądu rażeniowego (I4 – rys. 5.2).

5.5. Analiza czynników ryzyka charakteryzujących pojawienie się napięć dotykowych

5.5.1. Występowanie napięć dotykowych podczas normalnej pracy sieci trakcyjnej

Brak możliwości skutecznego ograniczenia dostępu do przewodu jezdnego w wyrobiskach podziemnych⁷ skłania do traktowania napięcia roboczego sieci trakcyjnej (pomiędzy przewodem jezdnym i szynami lub przewodem jezdnym i ziemią) jako napięcia dotykowego.

Nie jest to wprawdzie zgodne z definicją napięcia dotykowego stosowaną np. w instalacjach elektrycznych obiektów budowlanych⁸, ale dobrze charakteryzuje sytuacje prowadzące do wypadków elektrycznych związanych z użytkowaniem urządzeń trakcji elektrycznej w podziemiach kopalń.

Podczas normalnej pracy sieci trakcyjnej należy się liczyć z możliwością występowania napięć dotykowych pomiędzy następującymi punktami (częściami):

- przewód jezdny – szyny,
- przewód jezdny – ziemia (spąg i ociosy wyrobiska),
- przewód jezdny – części przewodzące obce,
- szyny jezdne (lub części przewodzące dostępne urządzeń uszynionych) – ziemia,
- szyny jezdne (lub części przewodzące dostępne urządzeń uszynionych) – części przewodzące obce,
- szyny jezdne (lub części przewodzące dostępne urządzeń uszynionych) – elementy systemu uziemiających przewodów ochronnych.

Pierwsze trzy przypadki prowadzić mogą do dotyku bezpośredniego. W pozostałych trzech sytuacje wypadkowe mają znamiona dotyku pośredniego (szyny jezdne są wprawdzie częściami czynnymi, ale napięcie względem ziemi szyn i połączonych z nimi w ramach uszynienia ochronnego części przewodzących dostępnych wynika ze specyficznego ich uziemienia związanego ze stanem sieci dolnej).

⁷ Przykładowo, minimalna wymagana wysokość zawieszenia przewodu jezdnego (2 do 2,2 m – [93]) jest mniejsza od wysokości obszaru traktowanego jako znormalizowana strefa zasięgu ręki (2,5 m – [98]).

⁸ W uwadze do definicji napięcia dotykowego wg [95] zawarte jest zastrzeżenie, że termin ten używany jest tylko w związku z ochroną przy dotyku pośrednim, a w propozycjach ujednoczenia określeń dotyczących zagrożenia porażeniowego [46] części czynnych nie traktuje się jako elementów, pomiędzy którymi może powstać napięcie dotykowe.

W warunkach normalnej pracy sieci trakcyjnej nie ma możliwości wyeliminowania napięcia przewodu jezdnego i zdarzenie UDI (rys. 5.3) jest wówczas zdarzeniem pewnym. Jednakże w miejscach, w których stale lub dorywczo przebywają ludzie, wymaga się (lub zaleca) stosowania dodatkowych środków ograniczających ryzyko wypadków bądź to przez ograniczenie dostępu do przewodu jezdnego, bądź też przez minimalizację czasu znajdowania się tego przewodu pod napięciem. I tak [93]:

- na stacjach osobowych i materiałowych, podszybiach oraz na przestrzeni od szybu do stacji osobowej przy szybie, minimalna wysokość zawieszenia przewodu jezdnego powinna być równa 2,2 m (na pozostałych drogach dopuszcza się 2,0 m),
- w miejscach, w których stale przebywają ludzie, np. na stacji załadowniczej, w miejscu sprzęgania lub rozprzęgania wozów oraz w miejscach wszystkich skrzyżowań dróg pieszych z drogami przewozowymi kolei podziemnej należy stosować dodatkowo osłonę przewodu jezdnego,
- w miejscach, w których stale pracują ludzie, zaleca się w uzasadnionych przypadkach stosowanie odcinkowego włączania przewodu jezdnego na czas przejazdu lokomotywy,
- w miejscach, w których dorywczo pracują ludzie, zaleca się stosowanie odcinkowego włączania przewodu jezdnego na czas przebywania ludzi.

Konieczność traktowania napięcia roboczego sieci trakcyjnej jako napięcia dotykowego można zatem oceniać w analizie ryzyka kierując się proponowanymi wskazówkami przedstawionymi w tablicy 5.2.

Niezależnie od możliwości występowania napięcia na dostępnym do dotknięcia przewodem jezdnym należy uwzględnić fakt, że jedną z charakterystycznych cech szyn jezdnych jako obwodu ziemnopowrotnego jest występowanie na nich potencjałów względem ziemi w przypadku obciążenia ich prądem na dowolnym odcinku. Potencjały te przenoszą się na wszystkie pozostałe odcinki sieci dolnej oraz na połączone z szynami (w celu uszynienia ochronnego) części przewodzące dostępne urządzeń zasilanych z sieci trakcyjnej, a także na niedostatecznie odizolowane szyny jezdne torów niezelektryfikowanych.

Wartości potencjałów szyn w dowolnym punkcie wyznaczyć można stosując ogólne zasady przedstawione w rozdz. 4.3.6 (por. wzory (4.8) do (4.15)). Miejscami, w których należy się spodziewać największych wartości napięć dotykowych w stanie normalnej pracy sieci trakcyjnej, są okolice stacji zasilających i łączników sekcyjnych. W tych miejscach potencjały szyn wywołane pracą lokomotyw, a więc i napięcia dotykowe na częściach przewodzących dostępnych urządzeń podlegających uszynieniu, przyjmują największe wartości [27, 37].

Tablica 5.2

Zasady oceny możliwości wystąpienia okoliczności sprzyjających traktowaniu napięcia roboczego przewodu jezdnego jako napięcia dotykowego podczas normalnej pracy sieci trakcyjnej

Opis czynnika ryzyka i jego stanu		Ocena stanu czynnika ryzyka:			
		najlepszy możliwy	zalecany	najgorszy dopuszczalny	niedopuszczalnie zły
Wysokość zawieszenia przewodu jezdnego					
Stacje osobowe, materiałowe i drogi dojazdu	≥2,5 m	X			
	2,2 m			X	
	<2,2 m				X
Pozostałe drogi	≥2,5 m	X			
	2,0 m			X	
	<2,0 m				X
Osłona przewodu jezdnego					
W miejscach, w których stale przebywają ludzie	jest w dobrym stanie na całej wymaganej długości		X		
	występują odcinki o złym stanie osłony lub bez osłony				X
	brak osłony				X
W innych miejscach	jest	X			
	brak			X	
Urządzenie do odcinkowego włączania przewodu jezdnego					
W miejscach, gdzie stale pracują ludzie	jest sprawne i okresowo kontrolowane		X		
	brak lub jest niesprawne				X
W innych miejscach	jest sprawne	X			
	brak			X	
Odcinkowe wyłączenie przewodu jezdnego					
W miejscach, gdzie dorywczo pracują ludzie	jest zorganizowane i przestrzegane		X		
	brak odpowiednich procedur				X
W innych miejscach	jest stosowane	X			
	brak			X	
Przygotowanie miejsca pracy w pobliżu sieci trakcyjnej					
W poleceniu wykonania pracy ustalono sposób wyłączenia i włączenia napięcia i zapewniono odpowiednią kontrolę			X		
Brak procedur wydawania poleceń wykonania pracy uwzględniających zasady wyłączenia i włączenia napięcia					X

Przy obliczaniu wartości tych potencjałów posłużyć się można prostszą formą wzorów wynikającą z odpowiedniego przekształcenia wyrażeń ogólnych. W sieci trakcyjnej, na którą składa się kilka rejonów zasilania, potencjał szyn $V(s_a)$ w punkcie zasilającym dolnym s_a dowolnej stacji zasilającej S_a będzie sumą chwilowych wartości potencjałów wywołanych pracą wszystkich lokomotyw i obciążeniem wszystkich stacji. Zapisać to można za pomocą wzoru:

$$V(s_a) = \sum_{i=1}^{m_1} V_i(s_a) + \sum_{j=1}^{m_2} V_j(s_a) + \sum_{k=1}^{n_1} V_k(s_a) + \sum_{l=1}^{n_2} V_l(s_a), \quad (5.5)$$

w którym

$V_i(s_a)$ - potencjał wywołany pracą i -tej lokomotywy znajdującej się po *lewej* stronie rozpatrywanego punktu s_a , obliczany z równania

$$V_i(s_a) = \frac{I_i \cdot r_s}{\alpha \cdot \text{sh}(\alpha l)} \cdot \text{ch}[\alpha(l - s_a)] \cdot \text{ch}(\alpha q_i), \quad (5.6)$$

$V_j(s_a)$ - potencjał wywołany pracą j -tej lokomotywy znajdującej się po *prawej* stronie rozpatrywanego punktu s_a , obliczany z równania

$$V_j(s_a) = \frac{I_j \cdot r_s}{\alpha \cdot \text{sh}(\alpha l)} \cdot \text{ch}(\alpha s_a) \cdot \text{ch}[\alpha(l - q_j)], \quad (5.7)$$

$V_k(s_a)$ - potencjał wywołany obciążeniem k -tej stacji zasilającej znajdującej się po *lewej* stronie rozpatrywanego punktu s_a , obliczany z równania

$$V_k(s_a) = -\frac{I_k \cdot r_s}{\alpha \cdot \text{sh}(\alpha l)} \cdot \text{ch}[\alpha(l - s_a)] \cdot \text{ch}(\alpha s_k), \quad (5.8)$$

$V_l(s_a)$ - potencjał wywołany obciążeniem l -tej stacji zasilającej znajdującej się po *prawej* stronie rozpatrywanego punktu s_a , obliczany z równania

$$V_l(s_a) = -\frac{I_l \cdot r_s}{\alpha \cdot \text{sh}(\alpha l)} \cdot \text{ch}(\alpha s_a) \cdot \text{ch}[\alpha(l - s_l)]. \quad (5.9)$$

We wzorach (5.5) do (5.9) przyjęto następujące oznaczenia (por. rys. 5.6):

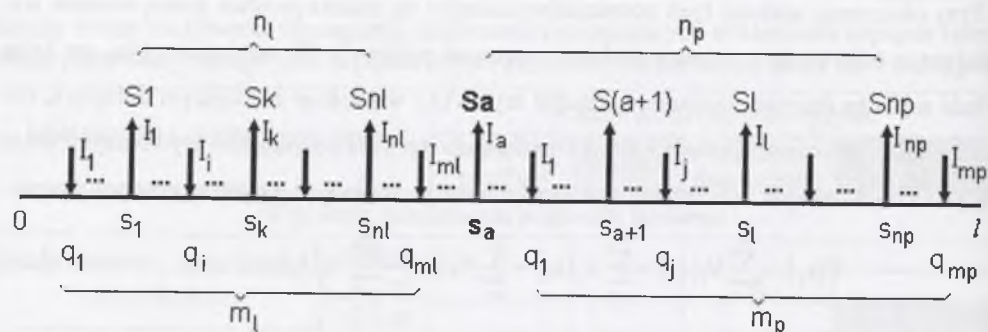
$I_{i,j,k,l}$ - prądy obciążenia lokomotyw i stacji zasilających, A,

r_s - rezystancja wzdłużna szyn, Ω/km ,

α - współczynnik upływu, km^{-1} ,

$q_{i,j}$ - współrzędne położenia lokomotyw, km,

$s_{k,l}$ - współrzędne stacji zasilających, km,



Rys. 5.6. Schemat linii trakcji elektrycznej do obliczania wartości potencjałów szyn w charakterystycznych punktach

Fig. 5.6. Diagrams of the electric traction line for the calculation of the values of rails potentials at specified points

m_l - liczba lokomotyw znajdujących się aktualnie po *lewej* stronie stacji zasilającej S_a ,

m_p - liczba lokomotyw znajdujących się aktualnie po *prawej* stronie stacji zasilającej S_a ,

n_l - liczba stacji zasilających sieć trakcyjną znajdujących się aktualnie po *lewej* stronie stacji zasilającej S_a ,

n_p - liczba stacji zasilających sieć trakcyjną znajdujących się aktualnie po *prawej* stronie stacji zasilającej S_a .

W podobny sposób obliczyć można potencjały szyn, a więc i napięcia dotykowe na częściach przewodzących dostępnych urządzeń uszynionych, znajdujących się w pobliżu łączników sekcyjnych na granicy rejonów zasilania przewodu jezdnego z poszczególnych stacji. W tym celu do wzorów (5.5) do (5.9) w miejsce współrzędnej stacji s_a należy wstawić współrzędną granicy strefy zasilania l_a .

Na rys. 5.7 przedstawiono uproszczone przebiegi zmian wartości potencjałów szyn w kilku charakterystycznych punktach podczas przejazdu pojedynczej lokomotywy wzdłuż przykładowej linii zasilanej z trzech stacji. Uproszczenie polega na przyjęciu prostoliniowego przebiegu zmienności potencjałów pomiędzy charakterystycznymi punktami (0, s_1 , l_1 , ..., l). W rzeczywistości są to krzywe wynikające z równań (5.5) do (5.9). Jest ono dopuszczalne ze względu na poglądowy charakter rysunku 5.7. Analiza ilościowa przeprowadzona została na podstawie wartości uwzględniających przebiegi funkcji hiperbolicznych.

Traktując przedstawione przebiegi obliczeniowe jako zbiór elementarnych wartości napięć dotykowych powstających na szynach i częściach przewodzących dostępnych urządzeń uszynionych, określić można rozkłady możliwych wartości tych napięć przy obciążeniu zmieniającą się liczbą lokomotyw. Napięcia dotykowe w punktach: 0, s_1 , l_1 , s_2 (i odpowiednio

w punktach: l , s_3 , l_2) będą największe. W pozostałych punktach linii napięcia te będą mniejsze. Na rys. 5.8 przedstawiono względne częstości występowania największych spodziewanych napięć dotykowych na szynach i urządzeniach uszynionych w linii zasilanej z trzech stacji (por. rys. 5.7a) przy zmieniającej się liczbie pracujących lokomotyw od jednej do sześciu.

W poszczególnych charakterystycznych punktach linii (0, s_1 , l_1 , s_2) względne częstości występowania napięć dotykowych przedstawiono na rys. 5.9 do 5.12.

Wykresy na rysunkach 5.8 do 5.12 przedstawiają rozkłady względnych wartości napięć dotykowych, odniesione do jednostkowego spadku napięcia w szynach ($I_0 \cdot R_{1sz}$, gdzie I_0 – prąd obciążenia sieci). W celu lepszego zobrazowania poziomu napięć obliczono przykładowe spodziewane wartości bezwzględne minimalne i maksymalne, przyjmując następujące założenia:

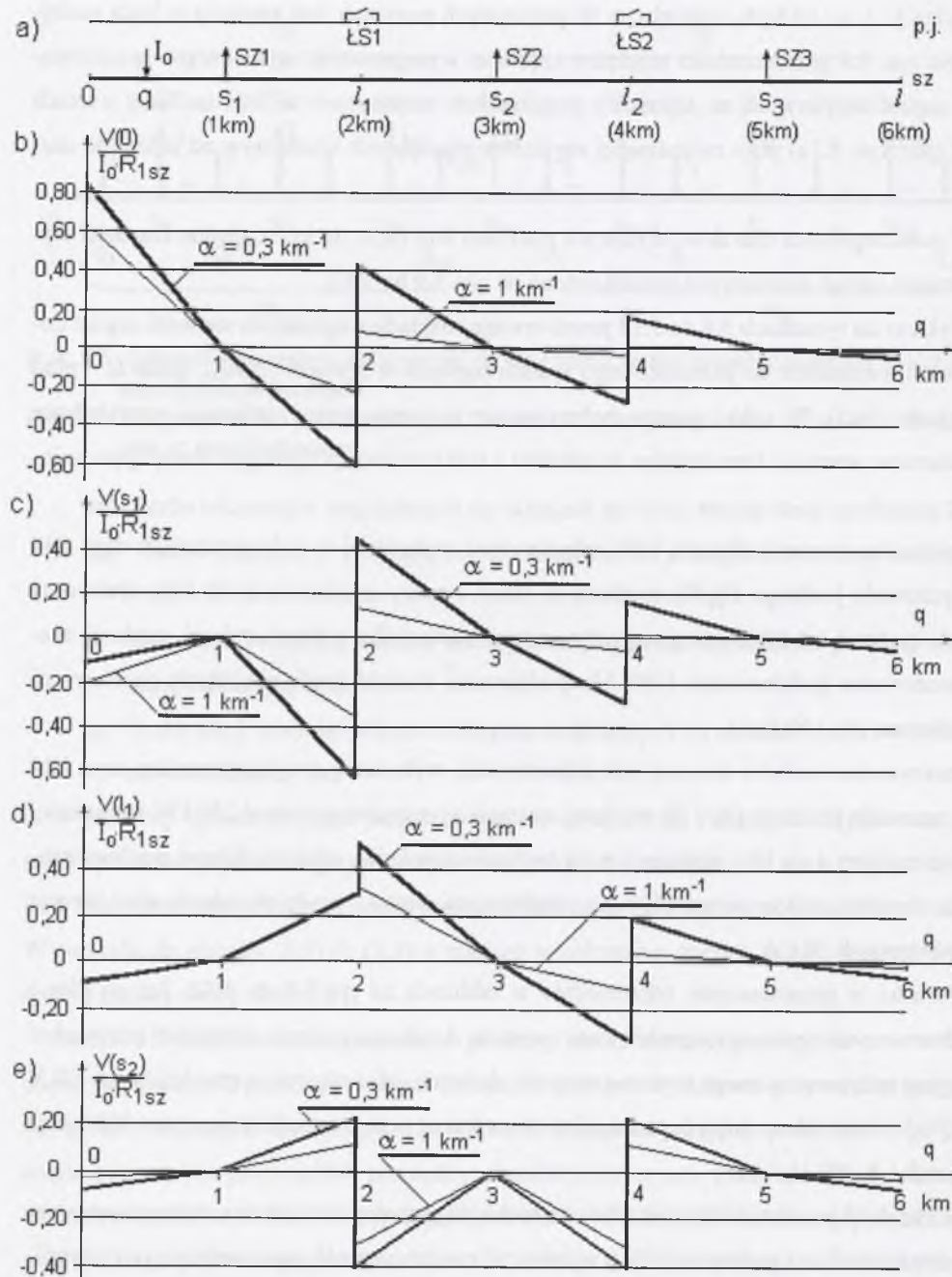
- minimalne wartości dotyczą linii jednotorowej, wykonanej z wykorzystaniem szyn S49 i przewodu jezdnego Djp80, zasilanej ze stacji o mocy znamionowej 100 kW, obciążonej lokomotywą Ld-10M pracującą przy pozycji nastawnika odpowiadającej prądowi znamionowemu godzinowemu (180 A); spodziewana wartość prądu obciążenia sieci wynosi wówczas ok. 150 A,
- maksymalne wartości dotyczą linii jednotorowej, wykonanej z wykorzystaniem szyn S24 i przewodu jezdnego Djp120, zasilanej ze stacji o mocy znamionowej 250 kW, obciążonej lokomotywą Lep-10/1 pracującą przy pozycji nastawnika odpowiadającej prądowi znamionowemu godzinowemu (430 A); spodziewana wartość prądu obciążenia sieci wynosi wówczas ok. 310 A.

Wartości te przedstawiono odpowiednio w tablicach na rys. 5.8 do 5.12. Jak wynika z przedstawionych wykresów, spodziewane napięcia dotykowe podczas normalnej pracy sieci trakcyjnej przyjmować mogą zarówno wartości dodatnie, jak i ujemne, z przedziału od -30 V do $+20$ V. Największe prawdopodobieństwo związane jest z przedziałem o przybliżonych granicach $(-5, +5)$ V.

Na rys. 5.13 przedstawiono dystrybuantę rozkładu prawdopodobieństwa występowania napięć dotykowych, na podstawie której wyznaczyć można częstość pojawiania się poszczególnych przedziałów wartości.

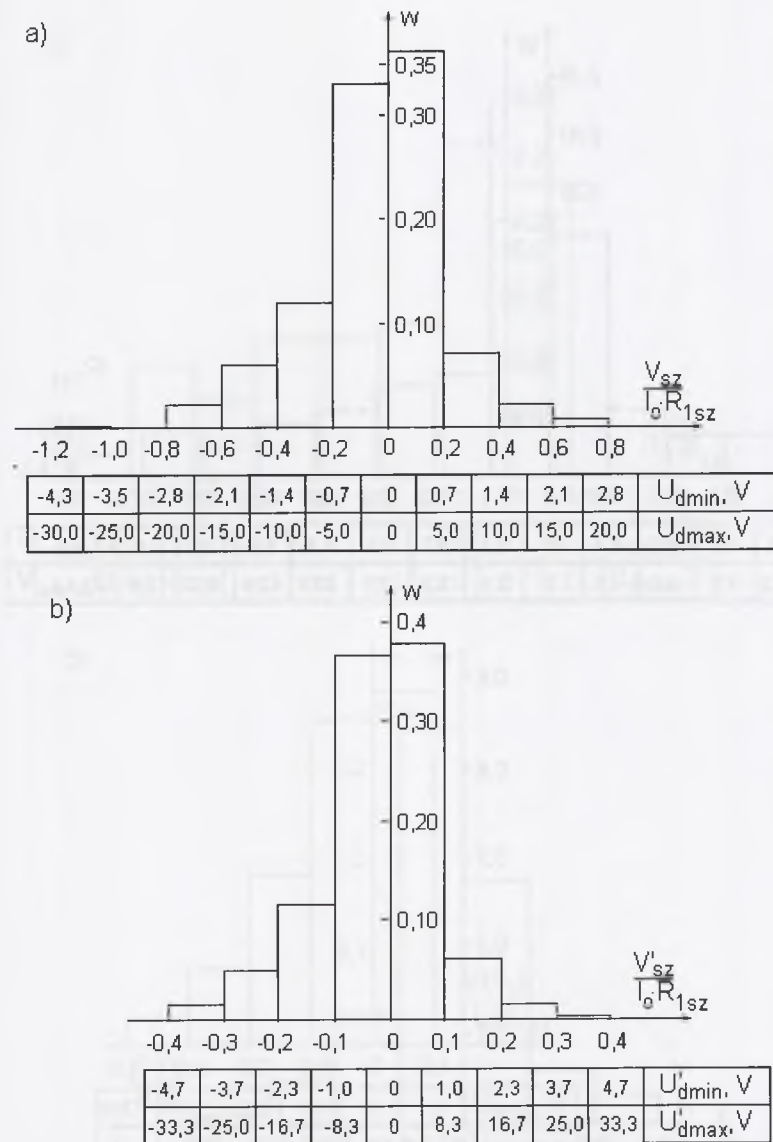
I tak, ograniczając się do sieci o współczynniku upływu $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$ i wartości maksymalnych napięć, można stwierdzić, co następuje:

- prawdopodobieństwo występowania ujemnych napięć (w stosunku do ziemi) jest nieznacznie większe od prawdopodobieństwa wystąpienia napięć dodatnich,



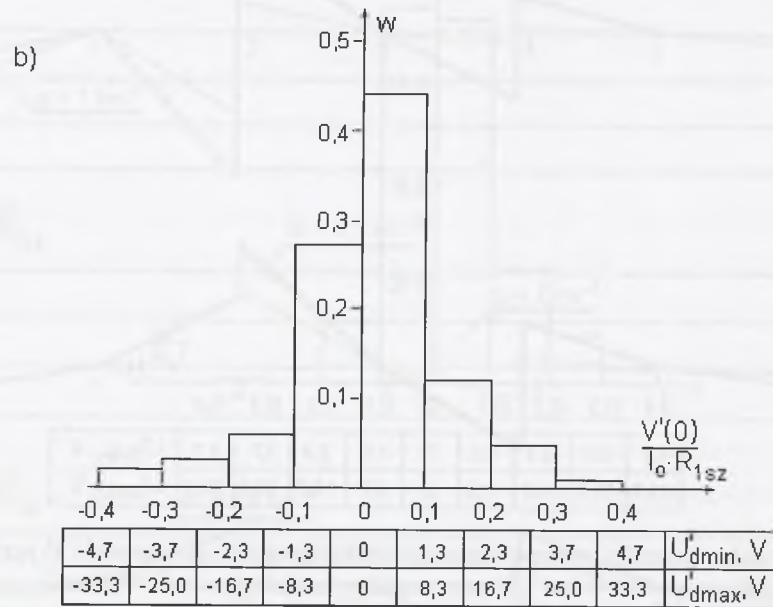
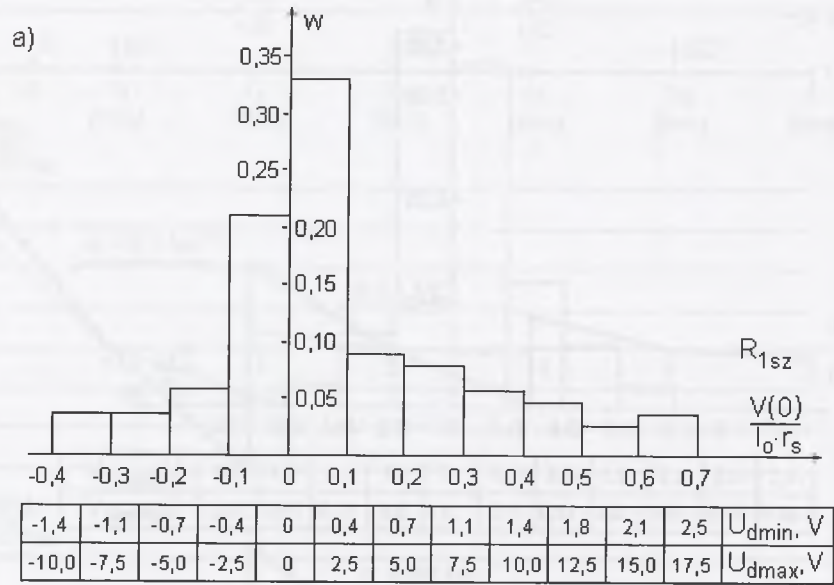
Rys. 5.7. Uproszczone przebiegi zmienności względnych wartości potencjałów szyn (napięć dotykowych) w wybranych punktach podczas przejazdu wzdłuż całej linii pojedynczej lokomotywy: a) – schemat linii, b) do d) – potencjały szyn w poszczególnych punktach

Fig. 5.7. Simplified graph of the variation of rails potentials relative values (touch voltages) at specified points during the course of one engine along the whole line: a) – the line, b) to d) – rails potentials at specified points



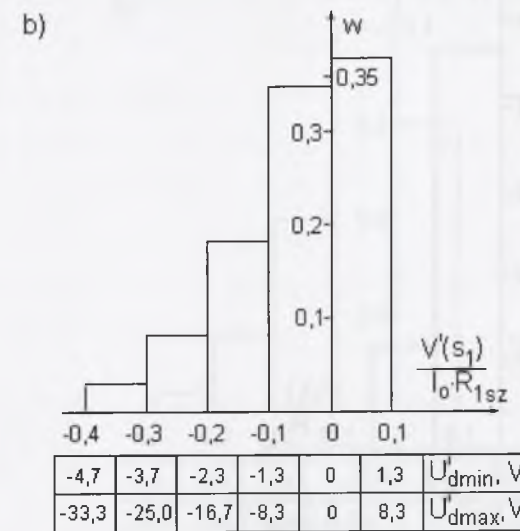
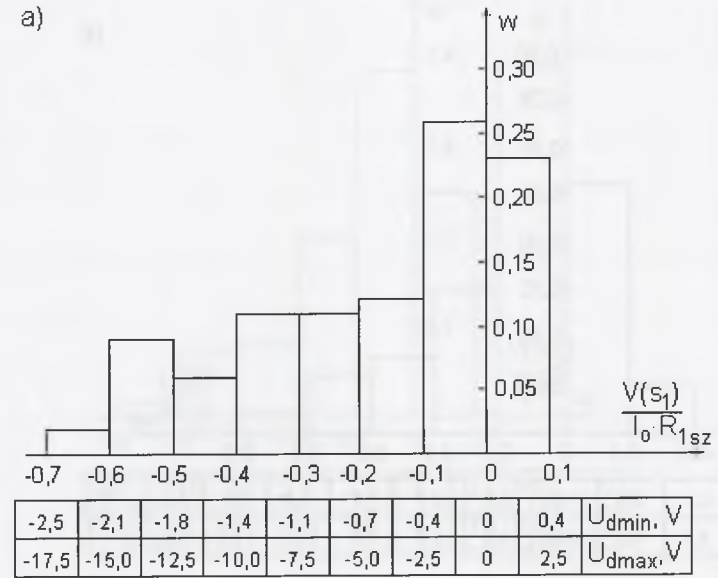
Rys. 5.8. Względne częstości występowania największych napięć dotykowych: a) przy współczynniku upływu $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) przy współczynniku upływu $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$

Fig. 5.8. Relative frequencies of the generation of highest touch voltages: a) for current leak coefficient $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) for $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$



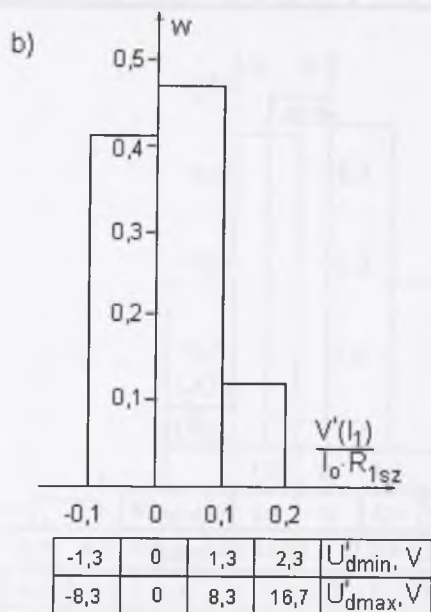
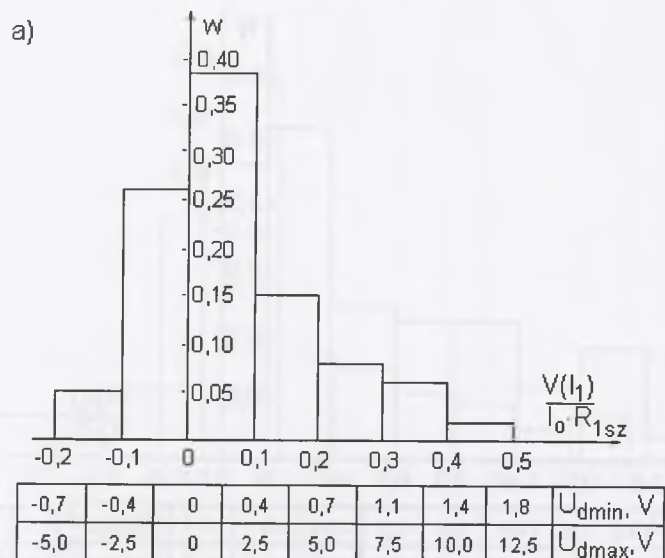
Rys. 5.9. Względne częstości występowania napięć dotykowych w punkcie 0 linii (na jej początku): a) przy współczynniku upływu $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) przy współczynniku upływu $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$

Fig. 5.9. Relative frequencies of the generation of touch voltages at point 0 on the line (the origin): a) for current leak coefficient $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) for $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$



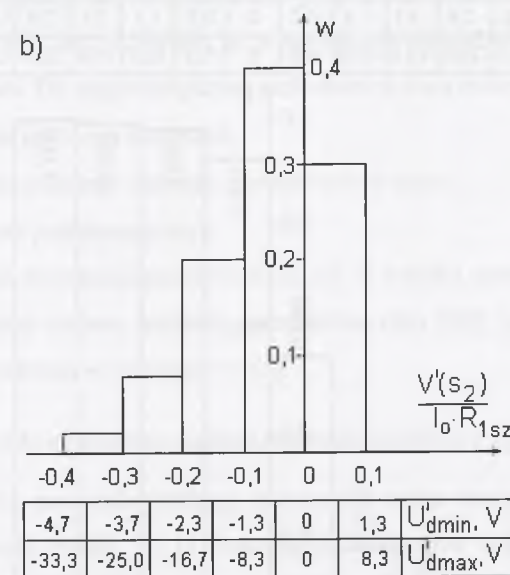
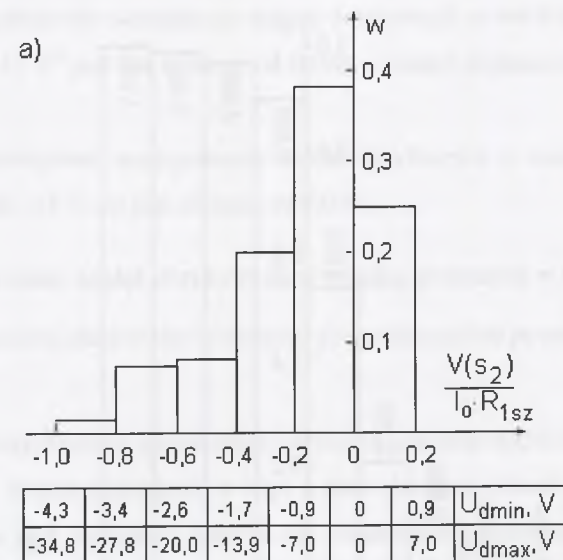
Rys. 5.10. Względne częstości występowania napięć dotykowych w punkcie s_1 linii (przy stacji zasilającej S1): a) przy współczynniku upływu $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) przy współczynniku upływu $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$

Fig. 5.10. Relative frequencies of the generation of touch voltages at point s_1 (supply station S1), a) for current leak coefficient $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) for current leak coefficient $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$



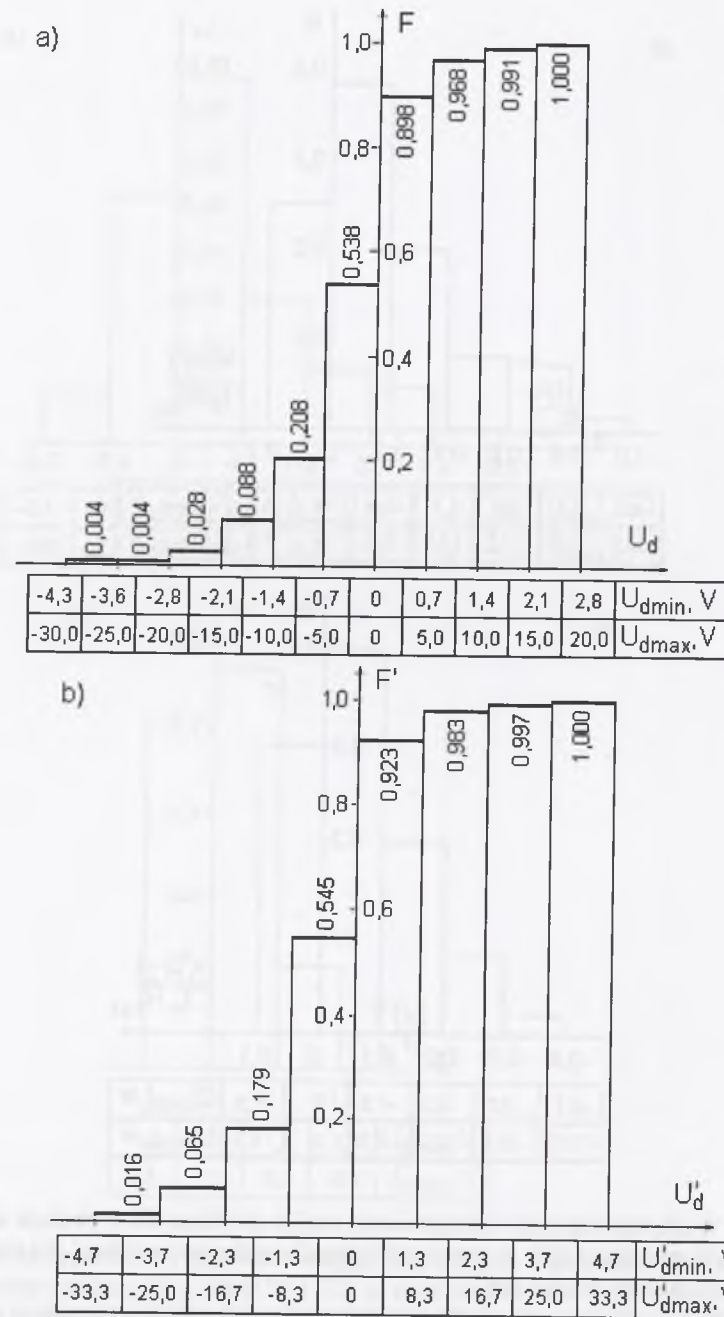
Rys. 5.11. Względne częstości występowania napięć dotykowych w punkcie l_1 linii (na granicy rejonów zasilanych ze stacji S1 i S2): a) przy współczynniku upływu $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) przy współczynniku upływu $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$

Fig. 5.11. Relative frequencies of the generation of touch voltages at point s_1 (supply station S1): a) for current leak coefficient $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) for current leak coefficient $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$



Rys. 5.12. Względne częstości występowania napięć dotykowych w punkcie s_2 linii (przy stacji zasilającej S2): a) przy współczynniku upływu $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) przy współczynniku upływu $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$

Fig. 5.12. Relative frequencies of the generation of touch voltages at point s_2 on the line (supply station S2): a) for current leak coefficient $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) for current leak coefficient $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$



Rys. 5.13. Dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa występowania napięć dotykowych podczas normalnej pracy w sieci trakcyjnej: a) o współczynniku upływu $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) o współczynniku upływu $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$,

Fig. 5.13. Cumulative distribution function of the generation of touch voltages under normal operating conditions in the traction system: a) for current leak coefficient $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) for $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$

- prawdopodobieństwo wystąpienia napięć dotykowych o wartościach ujemnych przekraczających -15 V^9 jest nie większe od 0,028, a napięć sięgających -30 V nie większe od 0,004,
- prawdopodobieństwo występowania napięć dotykowych o wartościach dodatnich przekraczających $+15 \text{ V}$ nie jest większe od 0,009.

5.5.2. Występowanie napięć dotykowych w wyniku uszkodzeń w sieci trakcyjnej

5.5.2.1. Rodzaje uszkodzeń w sieci trakcyjnej prowadzących do powstawania napięć dotykowych

Zgodnie z przyjmowaną powszechnie definicją napięcia dotykowego, związane jest ono z ochroną przy dotyku pośrednim, a więc z uszkodzeniem izolacji podstawowej. Specyfika budowy i pracy sieci trakcyjnej sprawia, że z napięciami dotykowymi na częściach przewodzących dostępnych należy się również liczyć przy braku uszkodzenia izolacji (por. rozdz. 5.5.1 i przypis 8, s. 85). Jest oczywiste, że w warunkach uszkodzeń napięcia te przyjmować będą większe wartości. Do najgroźniejszych uszkodzeń w sieci trakcyjnej należą:

- zwarcie przewodu jezdnego z szynami,
- zwarcie przewodu jezdnego z ziemią (z pominięciem szyn),
- uszkodzenie złącza podłużnego szyn.

Lokalne obniżenie rezystancji przejścia szyn, np. w wyniku zawodnienia odcinka torowiska, powoduje również zmianę rozkładu potencjałów szyn [20], jednakże w stopniu mniej znaczącym niż uszkodzenia wymienione wyżej.

5.5.2.2. Napięcia dotykowe podczas zwarcia przewodu jezdnego z szynami

Przypadek zwarcia przewodu jezdnego z szynami można analizować podobnie jak stan normalnego obciążenia (rozdz. 5.5.1), wstawiając do wzorów opisujących potencjały szyn prąd zwarciovowy. Wartość prądu zwarciovowego oblicza się z wyrażenia:

$$I_z = \frac{U_n}{R_{SZ} + R_{sg} + R_{sd}(z-s)} \quad (5.10)$$

⁹ Wartość 15 V prądu stałego jest wartością dopuszczalną, przy której nie wymaga się stosowania ochrony przed dotykiem bezpośrednim [98] w przypadku, gdy urządzenia użytkowane są poza pomieszczeniami suchymi oraz przewiduje się możliwość dotknięcia urządzenia dużą powierzchnią ciała; w pomieszczeniach suchych granicą tą jest wartość 30 V .

w którym

U_n – napięcie znamionowe sieci trakcyjnej,

R_{sz} – rezystancja zastępcza stacji prostownikowej wraz z zasilającą siecią średniego napięcia,

R_{sg} – rezystancja sieci górnej (suma rezystancji przewodu jezdnego $R_{p,j}$ i przewodów zasilających górnych $R_{p,z}$),

$R_{sd}(z-s)$ – rezystancja sieci dolnej.

Rezystancję sieci dolnej należy wyznaczyć z uwzględnieniem faktu, że sieć ta stanowi obwód ziemnopowrotny. Wykorzystując znajomość rozkładu potencjałów szyn obciążonych pojedynczym obciążeniem skupionym (por. rozdz. 4.3.6), można skorzystać ze wzorów:

a) w przypadku, gdy miejsce zwarcia znajduje się po prawej stronie stacji zasilającej ($z > s$)

$$R_{sd}(z-s) = \frac{V(z) - V(s)}{I_z} = \frac{r_s}{\alpha \cdot sh\alpha l} [ch\alpha z \cdot ch\alpha(l-z) + ch\alpha s \cdot ch\alpha(l-s) - 2ch\alpha s \cdot ch\alpha(l-z)] \quad (5.11a)$$

b) w przypadku, gdy miejsce zwarcia znajduje się po lewej stronie stacji zasilającej ($z < s$)

$$R_{sd}(z-s) = \frac{V(z) - V(s)}{I_z} = \frac{r_s}{\alpha \cdot sh\alpha l} [ch\alpha z \cdot ch\alpha(l-z) + ch\alpha s \cdot ch\alpha(l-s) - 2ch\alpha z \cdot ch\alpha(l-s)] \quad (5.11b)$$

gdzie

$V(z)$ i $V(s)$ – potencjały szyn w punktach z i s .

Rozkład przestrzenny względnych wartości (odniesionych do jednostkowego spadku napięcia w szynach) potencjałów szyn wzdłuż linii przy zwarciu w określonym miejscu sieci, a więc i napięć dotykowych na częściach przewodzących dostępnych urządzeń podlegających uszynieniu ochronnemu, nie będzie odbiegał od rozkładu potencjałów przy obciążeniu pojedynczą lokomotywą znajdującą się chwilowo w tym miejscu (por. np. rys. 4.10). Należy jednak zwrócić uwagę na istotną różnicę w częstości występowania różnych napięć dotykowych przy rozpatrywaniu zwarć występujących w różnych miejscach. Spowodowane to jest zmiennością wartości prądu zwarciovego i wartości rezystancji sieci górnej, a zwłaszcza rezystancji sieci dolnej, zależnej m.in. od współczynnika upływu. Zilustrowano to na rys. 5.14 przedstawiającym przykładowe wykresy wartości potencjałów szyn w miejscu zwarcia $V(z)$ i potencjału szyn w miejscu położenia lokomotywy $V(q)$, obciążającej sieć stałą wartością prądu,

przy zmieniających się miejscach zwarcia z (położeniach lokomotywy q). Rysunek sporządzono dla przypadku linii trakcyjnej o długości 6 km zasilanej z trzech stacji rozłożonych równomiernie wzdłuż linii, przyjmując następujące parametry sieci trakcyjnej: stacja zasilająca typu APSPa 250/6, o mocy 250 kW, moc zwarciovą sieci 6 kV zasilającej stację prostownikową (30-100) MVA, szyny S49, przewód jezdny Djpl20, współczynnik upływu $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$. Prąd zwarciovowy $I_{z1}(z-s)$ przyjmuje wówczas wartości zestawione w tabelicy 5.3.

Dodatkowo w tabelicy 5.3 przedstawiono obliczeniowe wartości prądów zwarciovych $I_{z2}(z-s)$ w sieci zasilanej ze stacji typu APSPb 100/6, o mocy 100 kW, wykonanej szynami S24 i przewodem jezdny Djp80. Do obliczenia potencjałów odpowiadających obciążeniu lokomotyw przyjęto stałą umowną wartość prądu obciążenia, równą $I_{obc} = 400 \text{ A}$.

Tabela 5.3

Obliczeniowe wartości prądu zwarciovego i prądu obciążenia w wybranych punktach sieci trakcyjnej przedstawionej na rys. 5.14a

z lub q		0	0,5km	s_1 1km	1,5km	l_1 2km	l_1+ 2km	2,5km	s_2 3km
$I_{z1}(z-s)$ A	$\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$	1381	2587	20833	2599	1414	1418	2605	20833
	$\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$	1356	2545	20833	2549	1364	1367	2554	20833
$I_{z2}(z-s)$ A	$\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$	797	1481	10870	1494	834	839	1501	10870
	$\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$	769	1436	10870	1440	778	782	1445	10870
$I_{obc}, \text{ A}$		400							

Z rys. 5.14 wynika, że w pobliżu miejsca zwarcia znacznie częściej należy się spodziewać większych wartości napięć dotykowych niż w pobliżu miejsca obciążenia. Charakterystyczne jest również to, że maksymalne wartości potencjałów szyn występują nie podczas zwarć na końcach strefy zasilania (jak w przypadku prądu obciążenia), lecz w przypadku zwarć w miejscach pośrednich, których współrzędne zależą m. in. od współczynnika upływu. W punktach zasilających dolnych potencjały szyn $V(s_i)$ podczas zwarć charakteryzują się przez dłuższy czas stosunkowo wysokimi wartościami ujemnymi, w niewielkim tylko stopniu zależnymi od miejsca zwarcia; jedynie w przypadku zwarć występujących w pobliżu stacji zasilających wartość potencjałów szyn spada do zera. Powoduje to wzrost częstości występowania większych wartości potencjałów szyn (a więc i napięć dotykowych) podczas zwarcia $V(s_i)_{zw}$ i $V(z)_{zw}$ niż podczas obciążenia stałą wartością prądu $V(s_i)_{obc}$ i $V(q)_{obc}$. To charakterystyczne przesunięcie częstości występowania większych wartości napięć ilustrują rysunki 5.15 i 5.16, sporządzone przy założeniu, że wartości prądu zwarciovego i prądu obciążenia są jednakowe.

w którym

U_n – napięcie znamionowe sieci trakcyjnej,

R_{SZ} – rezystancja zastępcza stacji prostownikowej wraz z zasilającą siecią średniego napięcia,

R_{sg} – rezystancja sieci górnej (suma rezystancji przewodu jezdnego $R_{p,j}$ i przewodów zasilających górnych $R_{p,z,s}$),

$R_{sd}(z-s)$ – rezystancja sieci dolnej.

Rezystancję sieci dolnej należy wyznaczyć z uwzględnieniem faktu, że sieć ta stanowi obwód ziemnopowrotny. Wykorzystując znajomość rozkładu potencjałów szyn obciążonych pojedynczym obciążeniem skupionym (por. rozdz. 4.3.6), można skorzystać ze wzorów:

a) w przypadku, gdy miejsce zwarcia znajduje się po prawej stronie stacji zasilającej ($z > s$)

$$R_{sd}(z-s) = \frac{V(z) - V(s)}{I_z} = \frac{r_s}{\alpha \cdot s \cdot \alpha l} [ch\alpha z \cdot ch\alpha(l-z) + ch\alpha s \cdot ch\alpha(l-s) - 2ch\alpha s \cdot ch\alpha(l-z)] \quad (5.11a)$$

b) w przypadku, gdy miejsce zwarcia znajduje się po lewej stronie stacji zasilającej ($z < s$)

$$R_{sd}(z-s) = \frac{V(z) - V(s)}{I_z} = \frac{r_s}{\alpha \cdot s \cdot \alpha l} [ch\alpha z \cdot ch\alpha(l-z) + ch\alpha s \cdot ch\alpha(l-s) - 2ch\alpha z \cdot ch\alpha(l-s)] \quad (5.11b)$$

gdzie

$V(z)$ i $V(s)$ – potencjały szyn w punktach z i s .

Rozkład przestrzenny względnych wartości (odniesionych do jednostkowego spadku napięcia w szynach) potencjałów szyn wzdłuż linii przy zwarcie w określonym miejscu sieci, a więc i napięć dotykowych na częściach przewodzących dostępnych urządzeń podlegających uszynieniu ochronnemu, nie będzie odbiegał od rozkładu potencjałów przy obciążeniu pojedynczą lokomotywą znajdującą się chwilowo w tym miejscu (por. np. rys. 4.10). Należy jednak zwrócić uwagę na istotną różnicę w częstości występowania różnych napięć dotykowych przy rozpatrywaniu zwarć występujących w różnych miejscach. Spowodowane to jest zmiennością wartości prądu zwarcioвого i wartości rezystancji sieci górnej, a zwłaszcza rezystancji sieci dolnej, zależnej m.in. od współczynnika upływu. Zilustrowano to na rys. 5.14 przedstawiającym przykładowe wykresy wartości potencjałów szyn w miejscu zwarcia $V(z)$ i potencjału szyn w miejscu położenia lokomotywy $V(q)$, obciążającej sieć stałą wartością prądu,

przy zmieniających się miejscach zwarcia z (położeniach lokomotywy q). Rysunek sporządzono dla przypadku linii trakcyjnej o długości 6 km zasilanej z trzech stacji rozłożonych równomiernie wzdłuż linii, przyjmując następujące parametry sieci trakcyjnej: stacja zasilająca typu APSPa 250/6, o mocy 250 kW, moc zwarciowa sieci 6 kV zasilającej stację prostownikową (30-100) MVA, szyny S49, przewód jezdny Djp120, współczynnik upływu $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$. Prąd zwarciowy $I_{z1}(z-s)$ przyjmuje wówczas wartości zestawione w tabelicy 5.3.

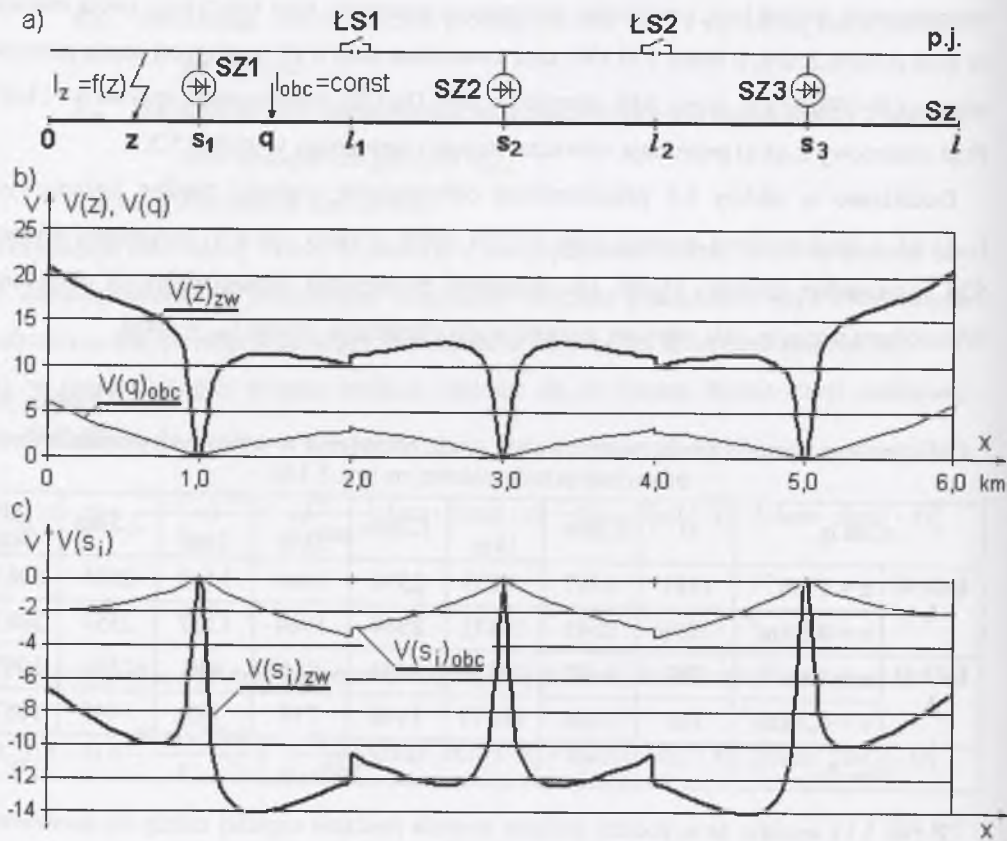
Dodatkowo w tabelicy 5.3 przedstawiono obliczeniowe wartości prądów zwarcioowych $I_{z2}(z-s)$ w sieci zasilanej ze stacji typu APSPb 100/6, o mocy 100 kW, wykonanej szynami S24 i przewodem jezdny Djp80. Do obliczenia potencjałów odpowiadających obciążeniu lokomotyw przyjęto stałą umowną wartość prądu obciążenia, równą $I_{obc} = 400 \text{ A}$.

Tabela 5.3

Obliczeniowe wartości prądu zwarciowego i prądu obciążenia w wybranych punktach sieci trakcyjnej przedstawionej na rys. 5.14a

z lub q		0	0,5km	s_1 1km	1,5km	l_1 - 2km	l_1 + 2km	2,5km	s_2 3km
$I_{z1}(z-s)$ A	$\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$	1381	2587	20833	2599	1414	1418	2605	20833
	$\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$	1356	2545	20833	2549	1364	1367	2554	20833
$I_{z2}(z-s)$ A	$\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$	797	1481	10870	1494	834	839	1501	10870
	$\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$	769	1436	10870	1440	778	782	1445	10870
$I_{obc}, \text{ A}$		400							

Z rys. 5.14 wynika, że w pobliżu miejsca zwarcia znacznie częściej należy się spodziewać większych wartości napięć dotykowych niż w pobliżu miejsca obciążenia. Charakterystyczne jest również to, że maksymalne wartości potencjałów szyn występują nie podczas zwarć na końcach strefy zasilania (jak w przypadku prądu obciążenia), lecz w przypadkach zwarć w miejscach pośrednich, których współrzędne zależą m. in. od współczynnika upływu. W punktach zasilających dolnych potencjały szyn $V(s_i)$ podczas zwarć charakteryzują się przez dłuższy czas stosunkowo wysokimi wartościami ujemnymi, w niewielkim tylko stopniu zależnymi od miejsca zwarcia; jedynie w przypadku zwarć występujących w pobliżu stacji zasilających wartość potencjałów szyn spada do zera. Powoduje to wzrost częstości występowania większych wartości potencjałów szyn (a więc i napięć dotykowych) podczas zwarć $V(s_i)_{zw}$ i $V(z)_{zw}$ niż podczas obciążenia stałą wartością prądu $V(s_i)_{obc}$ i $V(q)_{obc}$. To charakterystyczne przesunięcie częstości występowania większych wartości napięć ilustrują rysunki 5.15 i 5.16, sporządzone przy założeniu, że wartości prądu zwarciowego i prądu obciążenia są jednakowe.

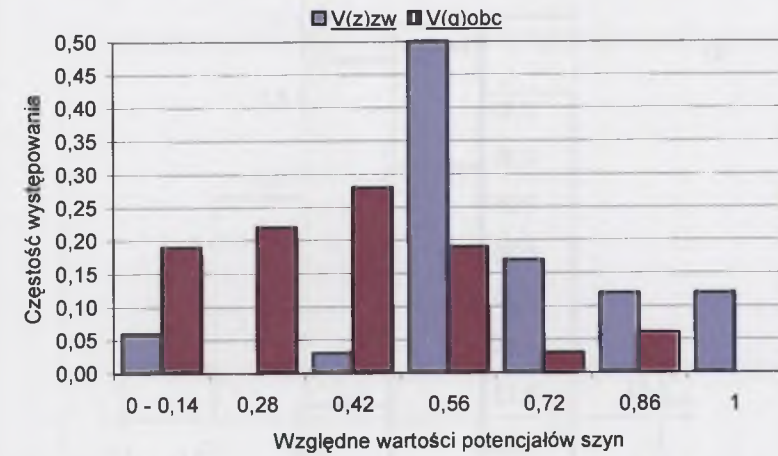


Rys. 5.14. Zmienność potencjałów szyn wywołanych prądami zwarciovymi I_z i prądami obciążenia I_{obc} : a) schemat linii trakcji elektrycznej, b) potencjały szyn w miejscu zwarcia $V(z)_{zw}$ i w miejscu obciążenia $V(q)_{obc}$, c) potencjały szyn odpowiedniego punktu zasilającego dolnego $V(s_i)$, wywołanych prądem zwarciovym (zw) i prądem obciążeniowym (obc), przy założeniu, że współrzędne miejsca zwarcia i miejsca obciążenia są równe ($z = q = x$)

Fig. 5.14. Variation of the rails potentials evoked by fault currents I_z and load currents I_{obc} : a) diagram of electric traction line, b) rails potentials at fault spot $V(z)_{zw}$ and at load spot $V(q)_{obc}$, c) rails potentials of the relevant lower supply point $V(s_i)$, generated by fault current (zw) and load current (obc), assuming that the fault spot and the load spot coordinates are equivalent ($z = q = x$)

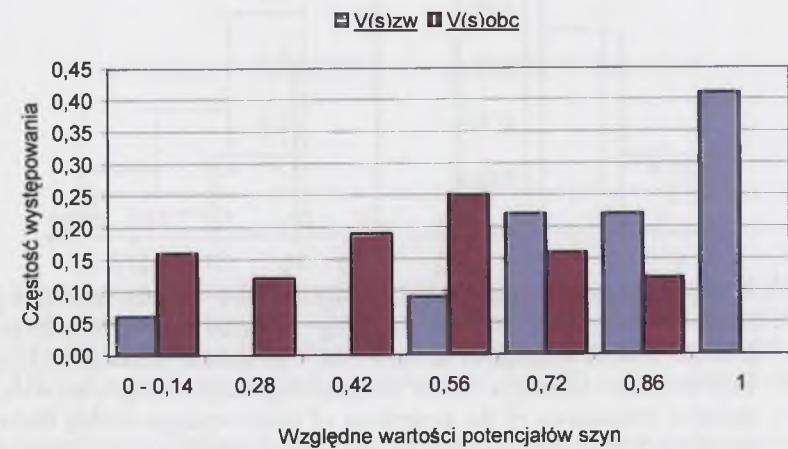
Wartości spodziewanych napięć dotykowych w sieciach trakcyjnych podczas zwarć przewodu jezdnego z szynami ocenić można obliczając rozkłady potencjałów wzdłuż szyn przy zwarciach przyjmowanych w poszczególnych punktach linii. Traktując te potencjały jako

jako zbiór możliwych napięć dotykowych, sporządzono wykresy względnych częstości występowania i dystrybuanty odpowiadające tym obliczeniowym rozkładom.



Rys. 5.15. Porównanie częstości występowania względnych wartości potencjałów szyn w pobliżu miejsca zwarcia (obciążenia) wywołanych prądami zwarciovymi i prądami obciążeniowymi w przykładowej sieci trakcyjnej

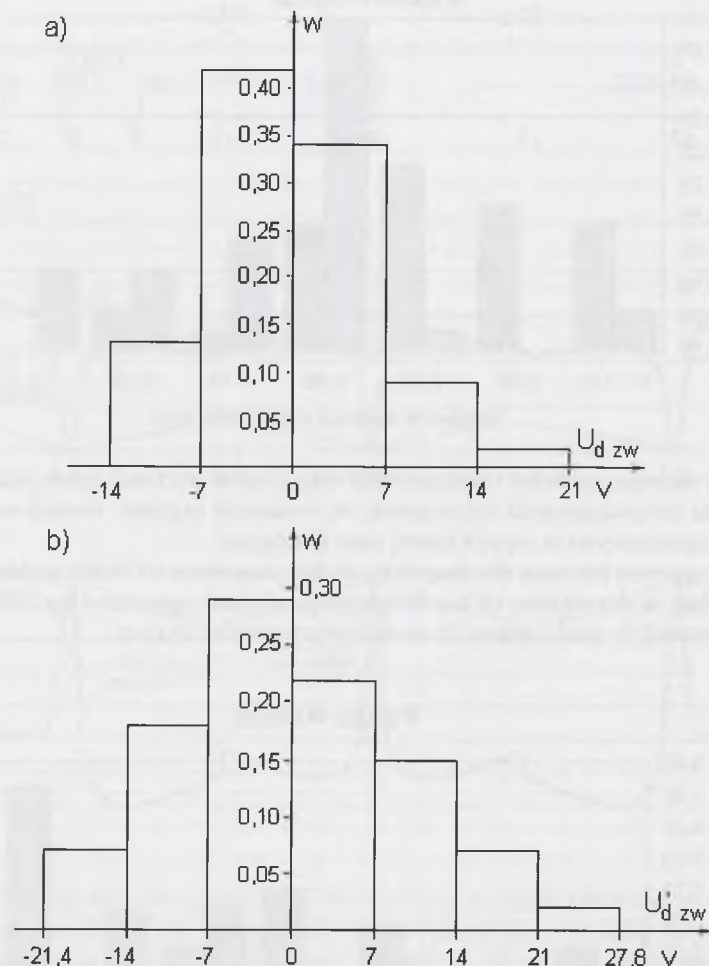
Fig. 5.15. Comparison between the frequency of the occurrence of relative values of rails potentials in the vicinity of the fault spot (load spot), generated by fault currents and generated by load currents in an exemplary traction system



Rys. 5.16. Porównanie częstości występowania względnych wartości potencjałów szyn w pobliżu stacji zasilających wywołanych prądami zwarciovymi i prądami obciążeniowymi w przykładowej sieci trakcyjnej

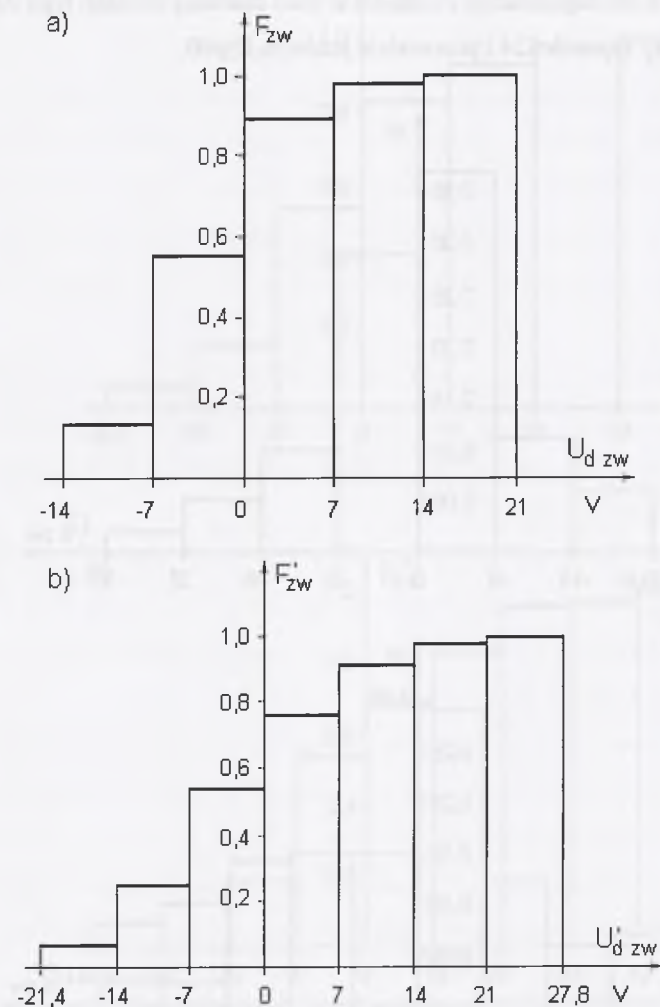
Fig. 5.16. Comparison between the frequency of the occurrence of relative values of rails potentials in the vicinity of the supply stations, generated by fault currents and by load currents in an exemplary traction system

Rysunki 5.17 i 5.18 odpowiadają zwarciom w sieci zasilanej ze stacji typu APSPa 250/6, o mocy 250 kW oraz sieci wykonanej z szyn S49 i przewodu jezdniego Djp120.



Rys. 5.17. Względne częstości występowania napięć dotykowych podczas zwarć przewodu jezdniego z szynami w sieci zasilanej ze stacji typu APSPa 250/6, o mocy 250 kW, i sieci wykonanej z szyn S49 i przewodu jezdniego Djp120: a) przy współczynniku upływu $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) przy współczynniku upływu $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$

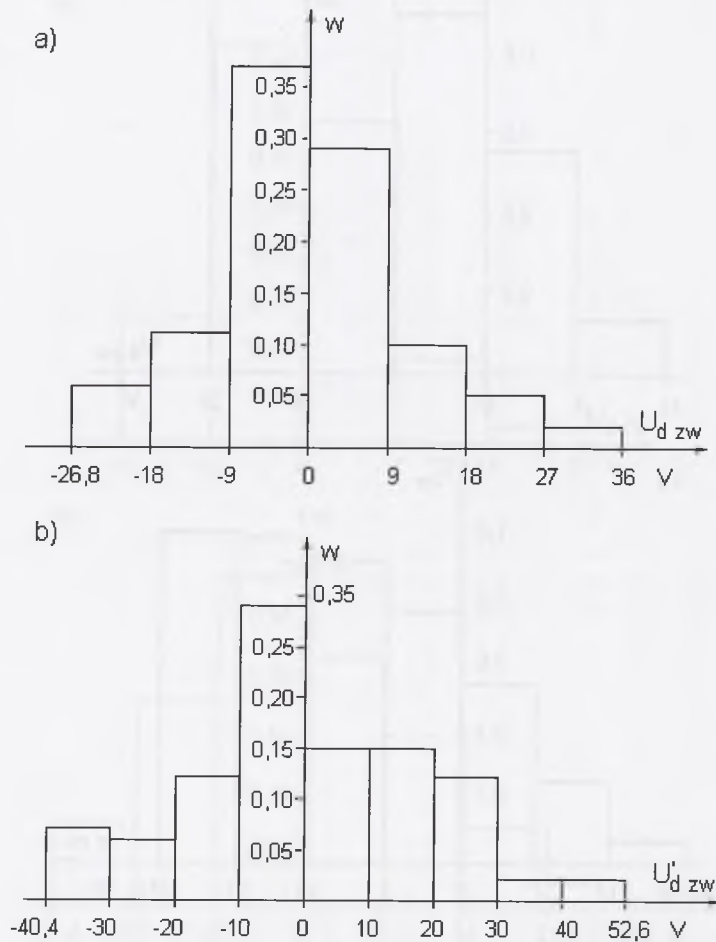
Fig. 5.17. Relative frequencies of the generation of touch voltages during faults between the contact wire and the rails in the system supplied by APSPa 250/6 station with 250 kW capacity, including S49 rails and Djp contact wire: a) for current leak coefficient $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) for current leak coefficient $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$



Rys. 5.18. Dystrybuanty rozkładów prawdopodobieństwa występowania napięć dotykowych podczas zwarć przewodu jezdniego z szynami w sieci zasilanej ze stacji typu APSPa 250/6, o mocy 250 kW, i sieci wykonanej z szyn S49 i przewodu jezdniego Djp120: a) przy współczynniku upływu $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) przy współczynniku upływu $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$

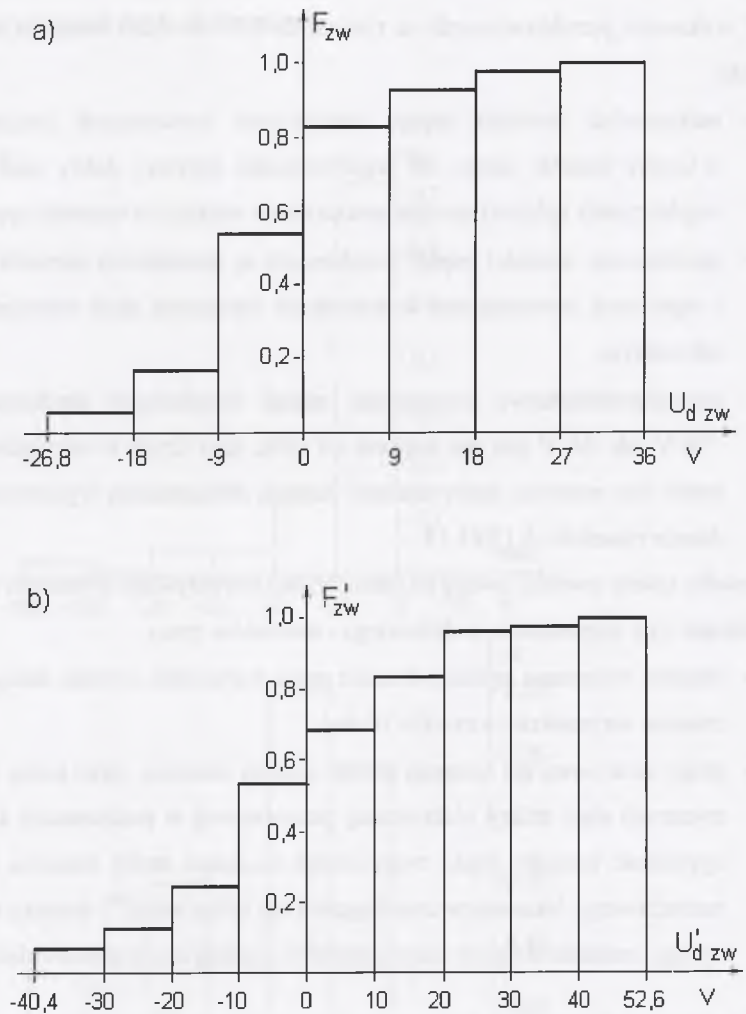
Fig. 5.18. Cumulative distribution function of the generation of touch voltages during faults between the contact wire and the rails in the system supplied by PSPa 250/6 station with 250 kW capacity, including S49 rails and Djp contact wire: a) for current leak coefficient $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) for current leak coefficient $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$

Rysunki 5.19 i 5.20, odpowiadają zwarciom w sieci zasilanej ze stacji typu APSPb 100/6, o mocy 100 kW, przy szynach S24 i przewodzie jezdnym Djp80.



Rys. 5.19. Względne częstości występowania napięć dotykowych podczas zwarć przewodu jezdniego z szynami w sieci zasilanej ze stacji typu APSPb 100/6, o mocy 100 kW, przy szynach S24 i przewodzie jezdnym Djp80: a) przy współczynniku upływu $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) przy współczynniku upływu $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$

Fig. 5.19. Relative frequencies of the generation of touch voltages during faults between the contact wire and the rails in the system supplied by APSPb 100/6 station, with 100 kW capacity, including S24 rails and contact wire Djp80: a) for current leak coefficient $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) for current leak coefficient $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$



Rys. 5.20. Dystrybuanty rozkładów prawdopodobieństwa występowania napięć dotykowych podczas zwarć przewodu jezdniego z szynami w sieci zasilanej ze stacji typu APSPb 100/6, o mocy 100 kW, przy szynach S24 i przewodzie jezdnym Djp80: a) przy współczynniku upływu $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) przy współczynniku upływu $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$

Fig. 5.20. Relative frequencies of the generation of touch voltages during faults between the contact wire and the rails in the system supplied by APSPb 100/6 station, with 100 kW capacity, including S24 rails and contact wire Djp80: a) for current leak coefficient $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) for current leak coefficient $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$

Z wykresów przedstawionych na rysunkach 5.17 do 5.20 wynikają m. in. następujące wnioski:

- maksymalne wartości napięć dotykowych wywołanych prądami zwarciovymi w istotny sposób zależą od współczynnika upływu; dobry stan torowiska (mały współczynnik upływu) sprzyja powstawaniu większych wartości napięć dotykowych,
- spodziewane wartości napięć dotykowych są stosunkowo niewielkie, porównywalne z napięciami powstającymi w warunkach obciążenia sieci trakcyjnej większą liczbą lokomotyw,
- prawdopodobieństwo wystąpienia napięć dotykowych przekraczających wartość $+30$ V lub -30 V jest nie większe od 10%, przy czym w szczególnych przypadkach może być oceniane indywidualnie metodą obliczeniową wykorzystaną przy sporządzaniu rysunków 5.17 i 5.19.

Ponadto należy zwrócić uwagę na okoliczności towarzyszące zwarciom w sieci trakcyjnej, wynikające z jej wyposażenia technicznego i warunków pracy:

- zwarcia wyłączane są bezzwłocznie przez wyłączniki szybkie zasilaczy (czas trwania zwarcia nie przekracza zwykle 10 ms),
- prądy zwarciove nie osiągają bardzo dużych wartości, gdyż jedną z cech charakterystycznych sieci trakcji elektrycznej przewodowej w podziemiach kopalń jest porównywalność wartości prądu zwarciovego na końcu strefy zasilania z wartością prądu rozruchowego lokomotyw znajdujących się bliżej stacji¹⁰; dotyczy to zwłaszcza awaryjnego zasilania dwu lub więcej rejonów z jednej stacji prostownikowej.

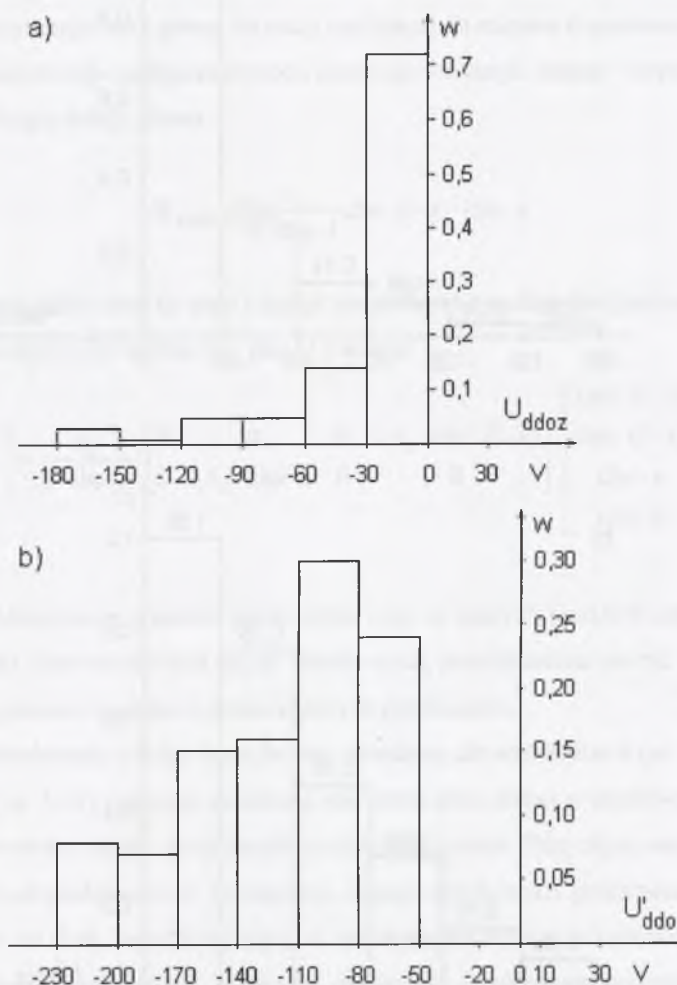
5.5.2.3. Napięcia dotykowe podczas zwarcia przewodu jezdnego z ziemią

W przypadku zwarcia przewodu jezdnego z ziemią z pominięciem sieci dolnej (doziemnie przewodu jezdnego), prąd zwarciovy wpływa do szyn poprzez rezystancję przejścia i punktowo odprowadzany jest w punkcie zasilającym dolnym do bieguna ujemnego stacji zasilającej. Największa ujemna wartość potencjału szyn występuje wówczas w dolnym punkcie zasilającym i obliczyć ją można z zależności (por. tablica 4.5, poz.1):

$$V(s) = \frac{-I_{\text{doz}} \cdot r_s}{\alpha \cdot \text{sh} \alpha \cdot l} \text{ch} \alpha \cdot (l - s) \cdot \text{ch} \alpha \cdot s \quad (5.12)$$

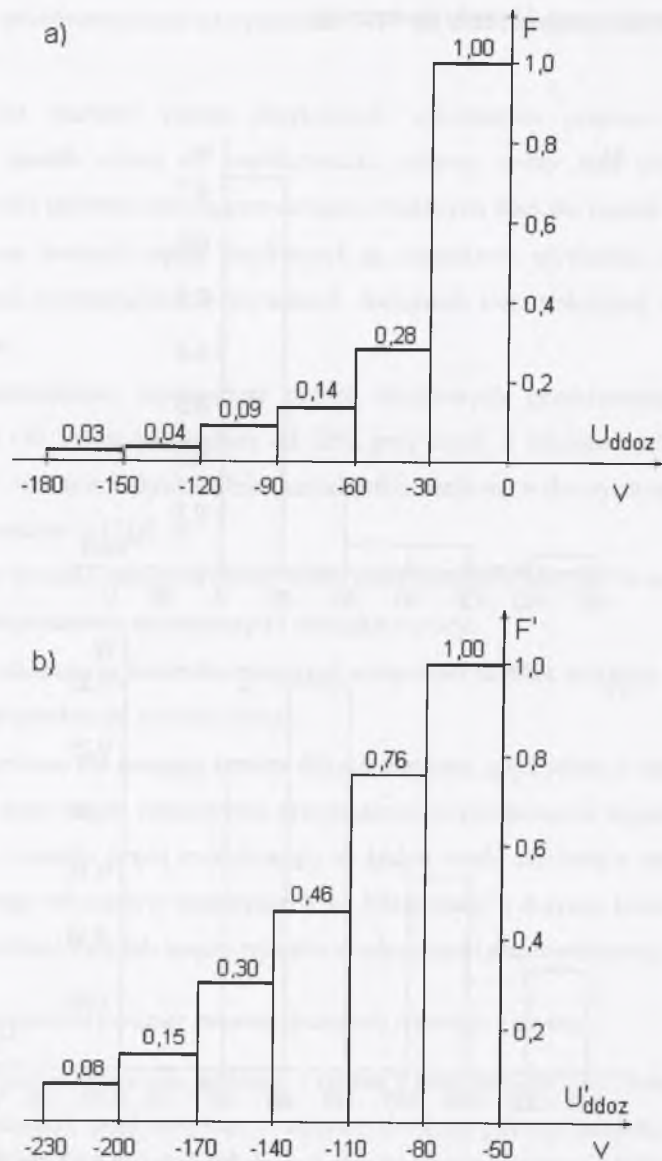
¹⁰ W celu odróżnienia prądu zwarciovego od prądu rozruchowego niezbędne jest stosowanie zabezpieczeń różniczkujących, reagujących na szybkość narastania prądu.

w którym I_{doz} oznacza wartość prądu doziemnego.



Rys. 5.21. Względne częstości występowania napięć dotykowych podczas doziemień w linii o długości 6 km, z trzema stacjami zasilającymi: a) w sieci o współczynniku upływu $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) w sieci o współczynniku upływu $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$

Fig. 5.21. Relative frequencies of the generation of touch voltages during grounding in the line 6 km long, with three supply stations: a) for current leak coefficient $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) for current leak coefficient $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$



Rys. 5.22. Dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa występowania napięć dotykowych podczas doziemień w sieci trakcyjnej: a) w sieci o współczynniku upływu $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) w sieci o współczynniku upływu $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$

Fig. 5.22. Cumulative distribution function of the generation of touch voltages during grounding in the traction system a) for current leak coefficient $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) for current leak coefficient $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$

Prąd doziemny wyznacza się ze wzoru:

$$I_{\text{doz}} = \frac{U_n}{R_{\text{SZ}} + R_{\text{sg}} + R_{\text{z-sz}}} \quad (5.13)$$

gdzie

U_n – napięcie znamionowe sieci trakcyjnej,

R_{SZ} – zastępcza rezystancja stacji prostownikowej i zasilającej ją sieci,

R_{sg} – rezystancja sieci górnej od stacji zasilającej do miejsca doziemienia,

$R_{\text{z-sz}}$ – rezystancja zastępcza obwodu ziemnopowrotnego: ziemia – szyny – punkt zasilający dolny, równa

$$R_{\text{z-sz}} = \frac{r_s}{\alpha \cdot s \cdot h \alpha \cdot l} \text{ch} \alpha \cdot (l - s) \cdot \text{ch} \alpha \cdot s \quad (5.14)$$

Rozkład potencjałów szyn (a więc i napięć dotykowych) wzdłuż linii podczas doziemienia wynika (por. wzór (4.13) i tablica 4.5, poz.1) z wzoru:

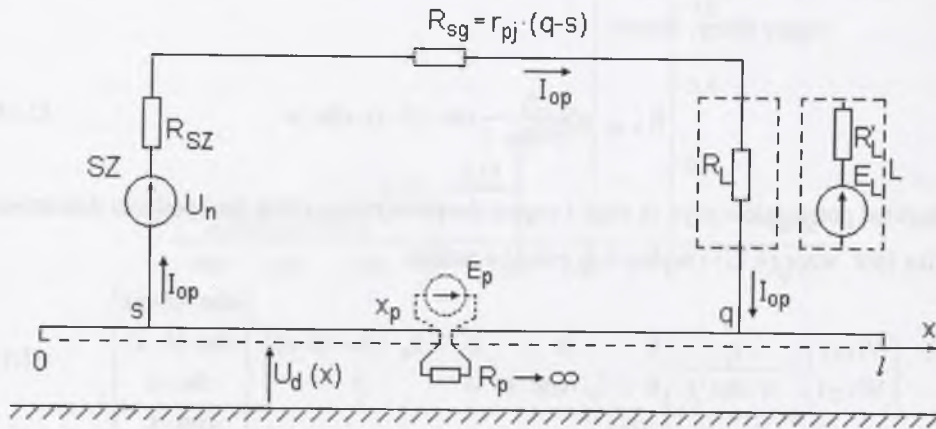
$$\begin{bmatrix} V(x_1) \\ V(x_2) \end{bmatrix} = \frac{r_s}{\alpha \cdot s \cdot h \alpha \cdot l} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -I_z \cdot \text{ch} \alpha \cdot (l - s) \\ 0 & -I_z \cdot \text{ch} \alpha \cdot s & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{ch} \alpha \cdot (l - x) \\ \text{ch} \alpha \cdot (l - x) \\ \text{ch} \alpha \cdot x \\ \text{ch} \alpha \cdot x \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Traktując obliczeniowe wartości potencjałów szyn w dolnych punktach zasilających oraz wzdłuż linii jako zbiór możliwych napięć dotykowych, przedstawiono na rys. 5.21 względną częstość występowania wartości z poszczególnych przedziałów.

Rys. 5.22 przedstawia z kolei dystrybuantę określoną dla rozkładów z rys. 5.21. Przebieg dystrybuanty (rys. 5.22) wskazuje na istotną rolę stanu sieci dolnej w możliwości pojawiania się wysokich wartości napięć dotykowych podczas doziemień. Przy złym stanie sieci dolnej ($\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$) prawdopodobieństwo wystąpienia napięć dotykowych przekraczających 120 V jest nie większe od 0,04; najczęściej napięcia zawierały się będą w przedziale od 0 do 30 V. Dobry stan sieci dolnej sprzyja większym napięciom dotykowym podczas doziemienia. Prawdopodobieństwo, że ich wartość przekroczy ok. 140 V wynosi ok. 0,30. Na szynach i częściach przewodzących dostępnych urządzeń uszynionych wystąpią podczas doziemień napięcia ujemne względem ziemi. Oznacza to, że ewentualne prądy rażeniowe płynące przy dotknięciu tych części ręką przez człowieka stojącego na spagu (ziemi) będą miały charakter prądów wstępujących (płynących w górę), a więc powodujących bardziej niekorzystne skutki.

5.5.2.4. Napięcia dotykowe w sieci o uszkodzonym złączu podłużnym

Uszkodzenie złącza podłużnego w warunkach kopalnianych nie należy do rzadkości [36]. Przypadek powstawania napięć dotykowych w takiej sytuacji ilustruje schematycznie rys. 5.23.



Rys. 5.23. Schemat sieci dolnej z uszkodzonym w punkcie x_p złączem podłużnym
Fig. 5.23. Diagram of the lower station with rail bond damaged at point x_p

Największych napięć dotykowych należy się spodziewać, gdy rezystancja uszkodzonego złącza zmierza do nieskończoności (przerwa w szynach). Rozkład potencjałów szyn opisany jest wówczas wzorami:

na odcinku $0 \leq x \leq s$

$$V(x) = \frac{I_{op} \cdot r_s}{\alpha \cdot \text{sh} \alpha l} \left[\frac{-E \cdot \alpha}{I_{op} \cdot r_s} \cdot \text{sh} \alpha (l - x_p) + \text{ch} \alpha (l - q) - \text{ch} \alpha (l - s) \right] \cdot \text{ch} \alpha x \quad (5.16)$$

na odcinku $s \leq x \leq x_p$.

$$V(x) = \frac{I_{op} \cdot r_s}{\alpha \cdot \text{sh} \alpha l} \left\{ \left[\frac{-E \cdot \alpha}{I_{op} \cdot r_s} \cdot \text{sh} \alpha (l - x_p) + \text{ch} \alpha (l - q) \right] \cdot \text{ch} \alpha x - \text{ch} \alpha s \cdot \text{ch} \alpha (l - x) \right\} \quad (5.17)$$

na odcinku $x_p \leq x \leq q$

$$V(x) = \frac{I_{op} \cdot r_s}{\alpha \cdot \text{sh} \alpha l} \left\{ \left[\frac{E \cdot \alpha}{I_{op} \cdot r_s} \cdot \text{sh} \alpha x_p + \text{ch} \alpha s \right] \cdot \text{ch} \alpha (l - x) + \text{ch} \alpha (l - q) \cdot \text{ch} \alpha x \right\} \quad (5.18)$$

na odcinku $q \leq x \leq l$

$$V(x) = \frac{I_{op} \cdot r_s}{\alpha \cdot \text{sh} \alpha l} \left[\frac{E \cdot \alpha}{I_{op} \cdot r_s} \cdot \text{sh} \alpha x_p + \text{ch} \alpha q - \text{ch} \alpha s \right] \cdot \text{ch} \alpha (l - x) \quad (5.19)$$

We wzorach (5.16) do (5.19) symbolem E oznaczono siłę elektromotoryczną zastępczego generatora, który należy włączyć do szyn w punkcie przerwy, by rozwiązać przypadek rozkładu potencjałów i rozplywu prądu w szynach posiadających przerwę [35]. Wartość tej siły elektromotorycznej oblicza się z wyrażenia:

$$E = \frac{I_{op} \cdot r_s}{\alpha} \left[\frac{\text{ch} \alpha (l - q)}{\text{sh} \alpha (l - x_p)} + \frac{\text{ch} \alpha s}{\text{sh} \alpha x_p} \right] \quad (5.20)$$

Prąd obciążenia sieci dolnej I_{op} z przerwą w punkcie x_p należy obliczyć uwzględniając rezystancję zastępczą szyn pomiędzy punktami q i s (por. rys.5.23):

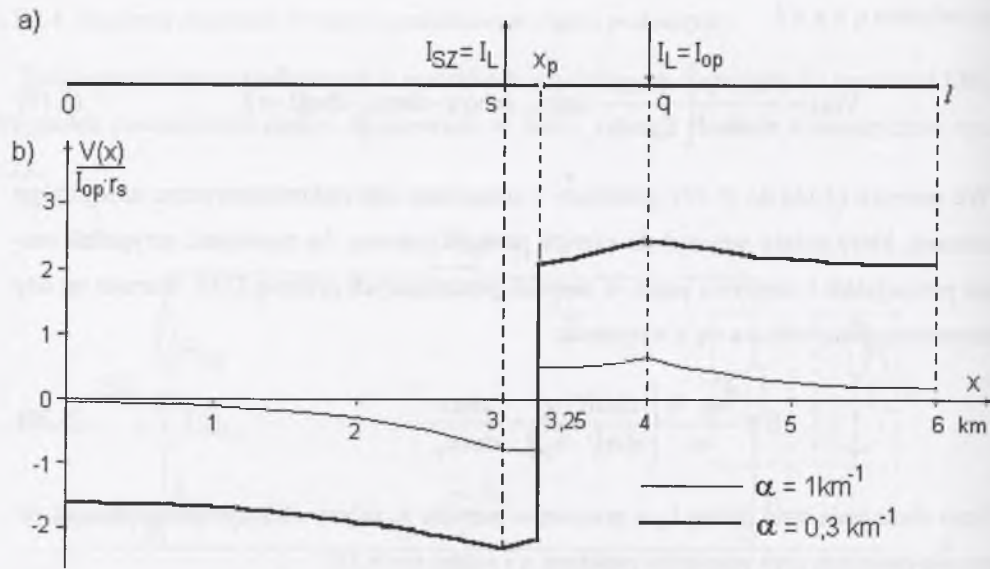
$$\begin{aligned} R_{q-s} &= \frac{V(q) - V(s)}{I_{op}} = \\ &= \frac{r_s}{\alpha \cdot \text{sh} \alpha s} \left[\frac{\text{ch}^2 \alpha (l - q) \cdot \text{sh} \alpha x_p}{\text{ch} \alpha (l - x_p)} + \frac{\text{ch}^2 \alpha s \cdot \text{sh} \alpha (l - x_p)}{\text{sh} \alpha x_p} + \text{ch} \alpha q \cdot \text{ch} \alpha (l - q) + \text{ch} \alpha (l - s) \cdot \text{ch} \alpha s \right] \end{aligned} \quad (5.21)$$

i zastępczą rezystancję lokomotywy R_L , zgodnie ze schematem z rys. 5.23:

$$I_{op} = \frac{U_n}{R_{SZ} + R_{sg} + R_L + R_{q-s}} \quad (5.22)$$

Występowanie przerwy w szynach spowoduje istotne zmiany w rozkładzie i wartościach potencjałów szyn. Dla przykładowego przypadku rozkład potencjałów przedstawiono na rys. 5.24. Charakterystyczne jest wystąpienie znacznego skoku potencjału w miejscu przerwy w szynach.

Przyjmując różne możliwe miejsca wystąpienia przerwy w szynach (w punktach o współrzędnych: 1,25 km, 1,5 km, 1,75 km, 3,25 km, 3,5 km, 3,75 km, 5,25 km, 5,5 km, 5,75 km) przy obciążeniu pojedynczą lokomotywą usytuowaną każdorazowo na końcu odpowiedniej strefy zasilania, uzyskano dla linii o długości 6 km (rys. 5.7) rozkłady względnych częstości występowania napięć dotykowych przedstawione na rys. 5.25. Dystrybuanty określone dla tych rozkładów pokazano na rys. 5.26.



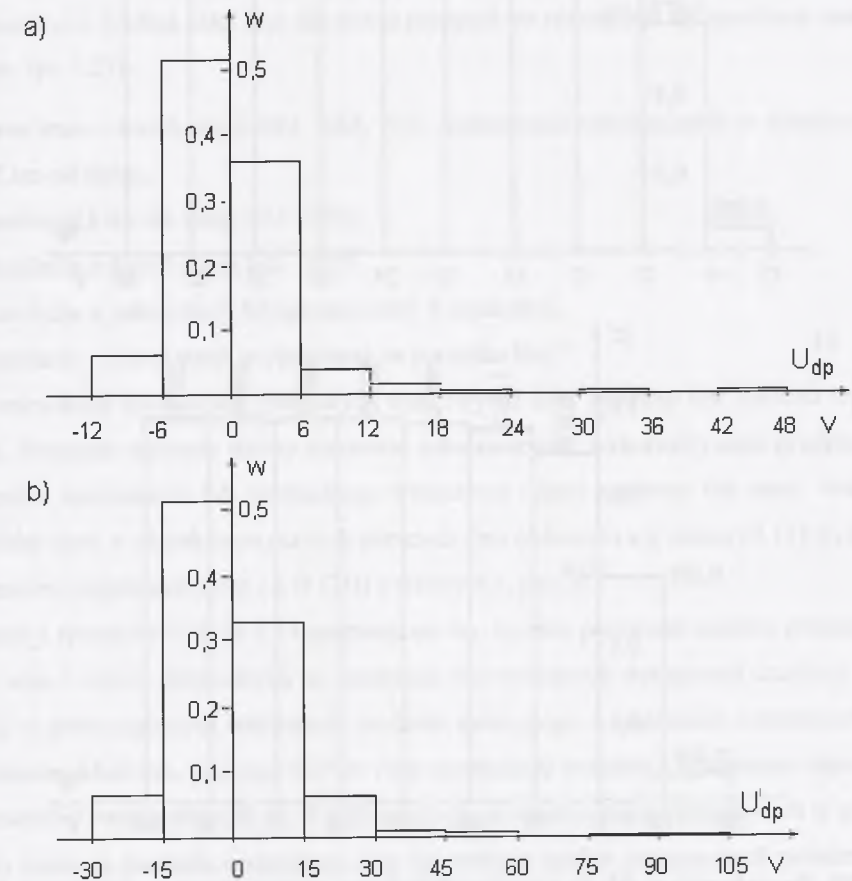
Rys. 5.24. Rozkład względnych potencjałów szyn z uszkodzonym złączem podłużnym w punkcie x_p , o współrzędnej $x = 3,25$ km: a) schemat zasilania i obciążenia sieci, b) rozkład potencjałów szyn względem ziemi

Fig. 5.24. Distribution of relative rails potentials with damaged rail bond at point x_p with coordinate $x = 3,25$ km: a) diagram of the supply system and load of the system b) distribution of rails potentials in relation to the ground

W przypadku szyn z uszkodzonym złączem podłużnym prawdopodobieństwo wystąpienia napięcia dotykowego ujemnego względem ziemi jest nieznacznie większe od prawdopodobieństwa pojawiania się napięć dodatnich. Wartości spodziewanych napięć dotykowych dodatnich są jednak znacznie wyższe (ok. 3-krotnie) od wartości napięć ujemnych. Podczas zbliżania się lokomotywy do uszkodzonego złącza podłużnego wzrastają wartości napięć dotykowych.

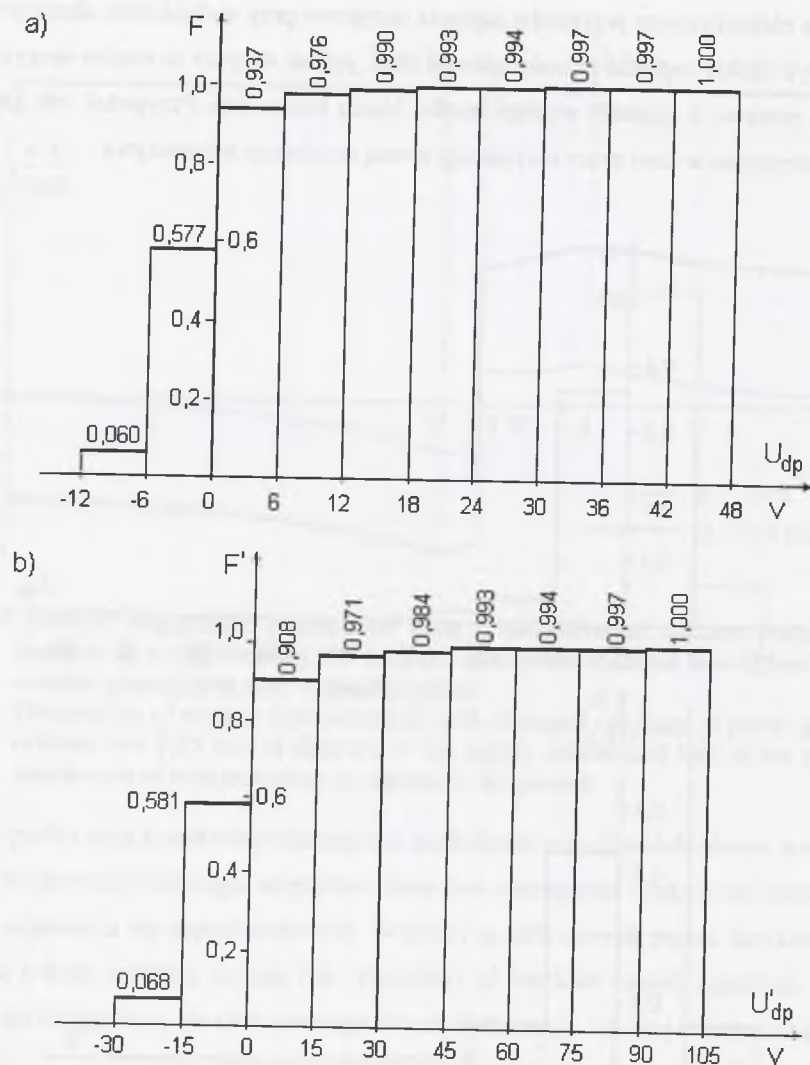
Wzory (5.16) do (5.22) oraz napięcia dotykowe przedstawione na rys. 5.25 i 5.26 dotyczą przypadku, gdy została przerwana ciągłość elektryczna szyn ($R_p \rightarrow \infty$). W rzeczywistości, przy uszkodzeniu złącza podłużnego, należy się liczyć ze skończoną wartością jego rezystancji. Analiza wpływu wartości rezystancji złącza na rozkład potencjałów szyn [36] wskazuje, że istotne zmiany wartości potencjałów występują przy rezystancji ok. 100-krotnie większej od rezystancji charakterystycznej, a więc przy $R_p > (0,012 \pm 0,13) \Omega$, w zależności od stanu sieci dolnej i rodzaju szyn. W warunkach kopalnianych, przy nieuniknionej korozji elementów łączących szyny mechanicznie (np. łubków), wartości rezystancji złącza w przypadku uszkodzenia dodatkowego połączenia elektrycznego mogą być znacznie wyższe.

W skrajnie niekorzystnym przypadku napięcia dotykowe przy uszkodzeniu złącza podłużnego mogą być bliskie napięciu znamionowemu sieci, jednak dotyczy to bardzo specyficznej sytuacji, gdy przerwa w szynach wystąpi bardzo blisko końca linii. Przypadek taki jest podobny do doziemienia w sieci przez rezystancję równą rezystancji lokomotywy.



Rys. 5.25. Względne częstości występowania napięć dotykowych w linii o długości 6 km, z trzema stacjami zasilającymi, w której zostało uszkodzone pojedyncze złącze podłużne (w obydwu tokach): a) przy współczynniku upływu $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) przy współczynniku upływu $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$

Fig. 5.25. Relative frequencies of the generation of touch voltages in the line 6 km long, with three supply stations and damaged single rail bond (in both modes): a) for current leak coefficient $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) for current leak coefficient $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$



Rys. 5.26. Dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa występowania napięć dotykowych w linii z uszkodzonym pojedynczym złączem podłużnym: a) w sieci o współczynniku upływu $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) w sieci o współczynniku upływu $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$

Fig. 5.26. Cumulative distribution function of the generation of touch voltages in the line with damaged single rail bond; a) in the system with current leak coefficient $\alpha = 1 \text{ km}^{-1}$, b) for $\alpha = 0,3 \text{ km}^{-1}$

5.5.3. Napięcia dotykowe w przypadkach awaryjnego sposobu zasilania sieci trakcyjnej

Jednym z czynników wpływających na wartości powstających potencjałów szyn (a więc i napięć dotykowych) jest sposób zasilania sieci trakcyjnej, zwłaszcza sieci dolnej. Najkorzystniejszym sposobem zasilania sieci trakcyjnej jest zasilanie ze stacji rozłożonych równomiernie wzdłuż linii, w odległościach $1+1,5+2 \text{ km}$ (por. rozdz. 4.3.5). Różnicowanie odległo-

ści między stacjami, zwłaszcza zwiększanie długości rejonów zasilanych z niektórych stacji, wpływa na wzrost spadków napięcia m. in. w sieci dolnej, a więc i na wartości potencjałów szyn. W konsekwencji należy się liczyć ze wzrostem napięć dotykowych na częściach przewodzących dostępnych uszynionych urządzeń. Na rys. 5.28 do 5.34 przedstawiono zmienność czasową potencjałów szyn w charakterystycznych punktach linii podczas przejazdu pojedynczej lokomotywy wzdłuż całej linii dla pięciu przypadków różniących się sposobem zasilania sieci (por. rys. 5.27):

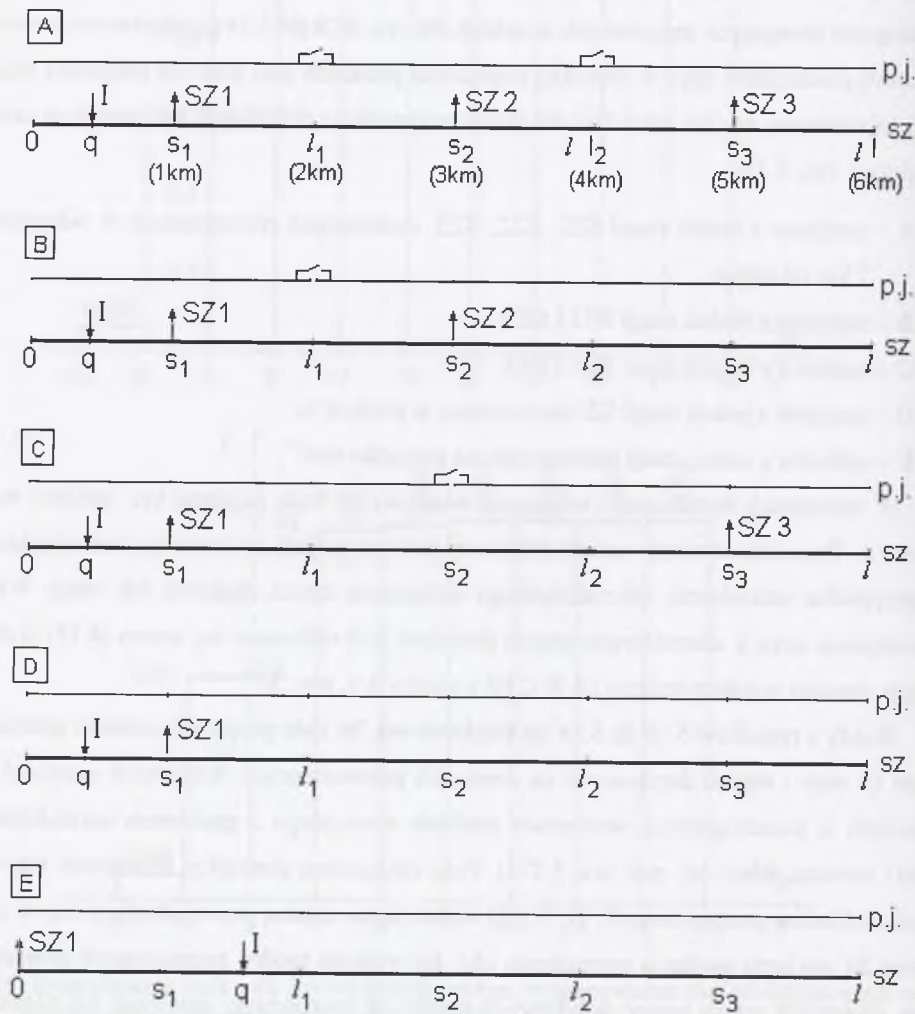
- A – zasilanie z trzech stacji SZ1, SZ2, SZ3, rozłożonych równomiernie w odległościach 2 km od siebie,
- B – zasilanie z dwóch stacji SZ1 i SZ2,
- C – zasilanie z dwóch stacji SZ1 i SZ3,
- D – zasilanie z jednej stacji SZ1 usytuowanej w punkcie s_1
- E – zasilanie z jednej stacji usytuowanej na początku linii¹¹.

W warunkach normalnych (roboczych właściwych) linia powinna być zasilana wg wariantu A. Pozostałe warianty należy traktować jako awaryjne, wykorzystywane przykładowo w przypadku uszkodzenia lub niezbędnego wyłączenia części zasilacza lub stacji. Wartości potencjałów szyn w charakterystycznych punktach linii obliczono wg wzoru (4.15) wykorzystując macierz współczynników $[A \ B \ C \ D]$ z tabelicy 4.5, poz. 5.

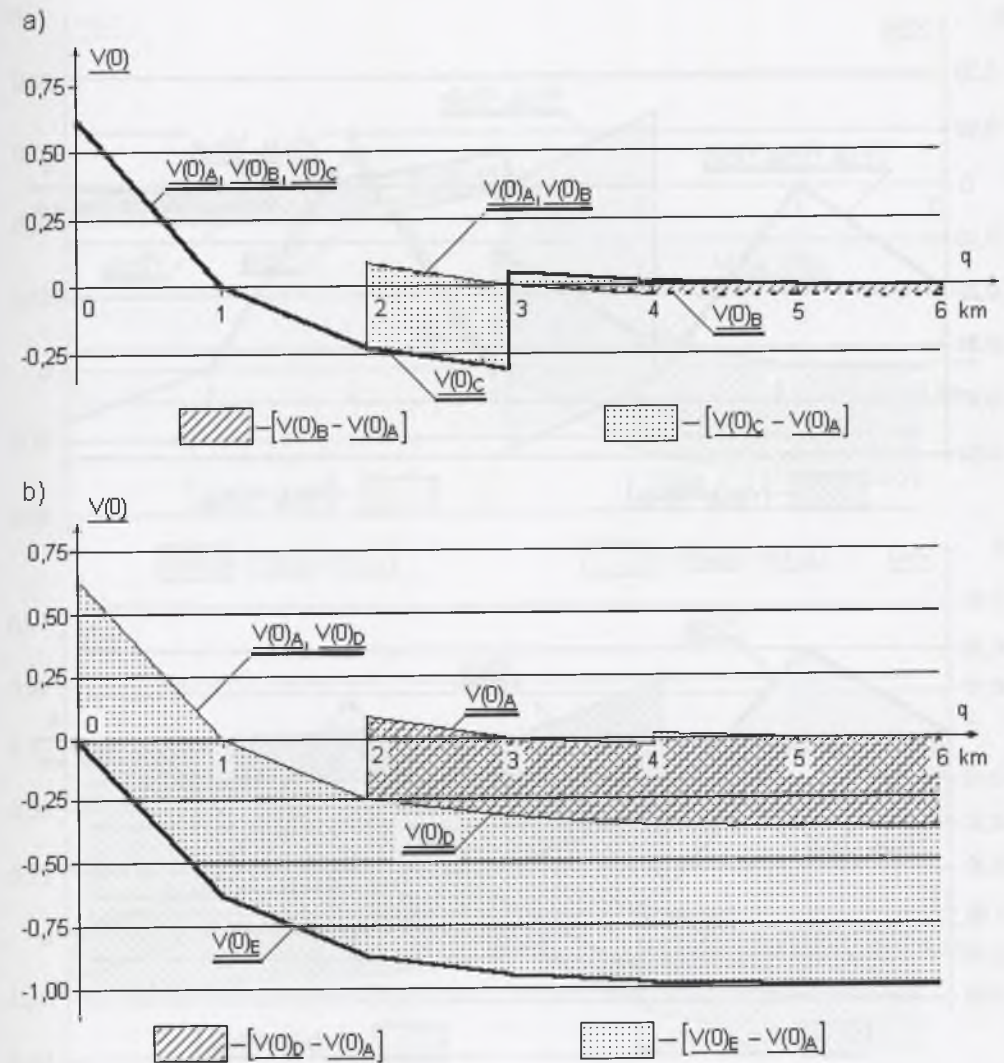
Każdy z rysunków 5.28 do 5.34 sporządzono tak, by móc porównać wartości potencjałów szyn (a więc i napięć dotykowych na częściach przewodzących dostępnych urządzeń uszynionych) w poszczególnych wariantach zasilania awaryjnego z zasilaniem normalnym (warunki robocze właściwe, por. rys. 5.27a). Pola zaznaczone pomiędzy wykresami odpowiednich rozkładów potencjałów (B, C, D i E) wskazują na zmianę napięć dotykowych w porównaniu do wariantu zasilania normalnego (A). Im większe rzędne zaznaczonych powierzchni, tym większych zmian napięć dotykowych należy się spodziewać, natomiast im większe odcięte – tym dłuższy będzie czas utrzymywania się zmienionych wartości tych napięć. Z analizy poszczególnych wykresów wynika, że miejscami, w których spodziewać się należy największego wzrostu potencjałów szyn, są okolice stacji zasilających (rys. 5.29, 5.31 i 5.33) oraz początku i końca linii (rys. 5.28 i 5.34). W przypadku wariantów zasilania D i E spo-

¹¹ Oczywiście jest, że przy zasilaniu z mniejszej liczby stacji, moce tych stacji w celu zapewnienia pełnego obciążenia sieci trakcyjnej muszą być odpowiednio większe. W praktyce spotyka się ustawienie np. dwóch stacji w jednym miejscu i wykonanie jednego wspólnego punktu zasilającego dolnego.

dziewać się należy kilkunastokrotnie większych napięć dotykowych niż przy zasilaniu normalnym.

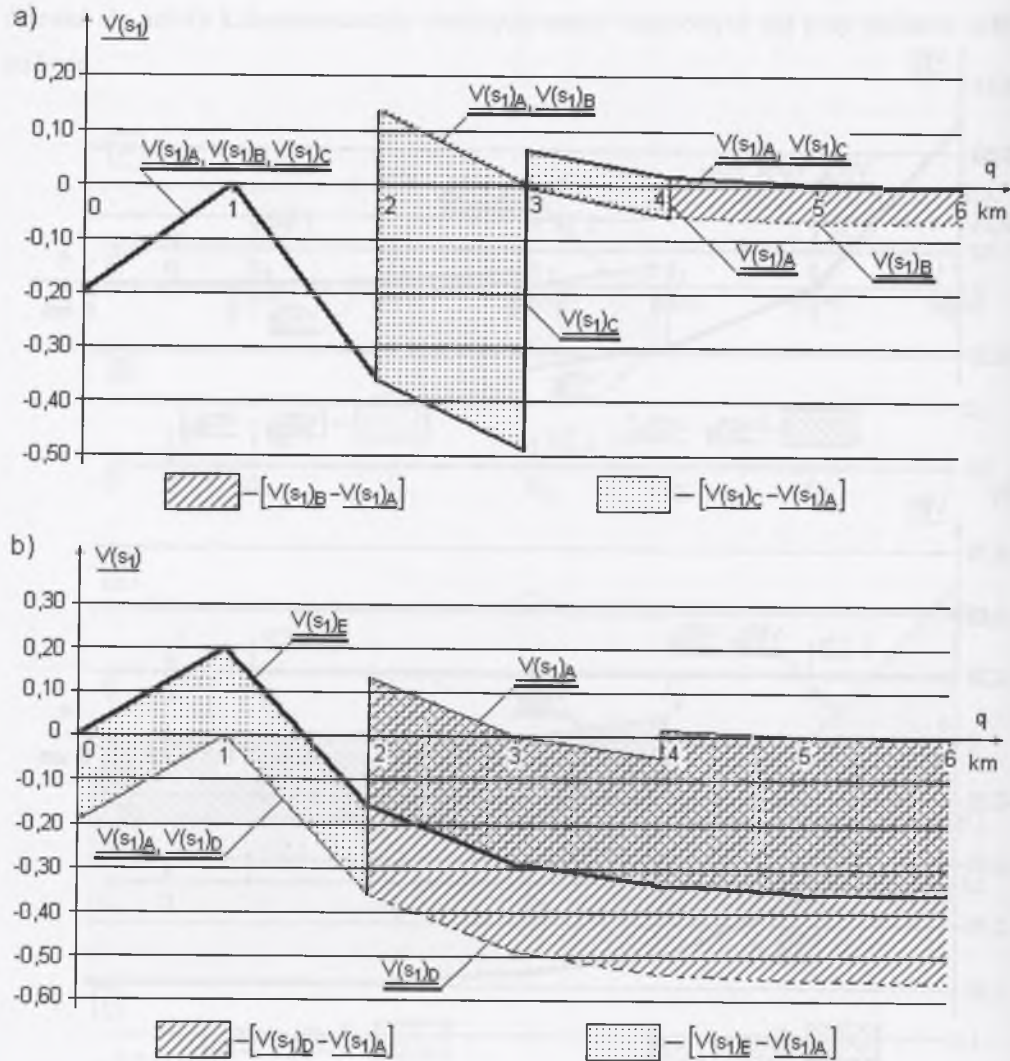


Rys. 5.27. Różne warianty zasilania przykładowej sieci trakcyjnej rozpatrywane w analizie wpływu sposobu zasilania na wartości napięć dotykowych przy dotyku pośrednim
Fig. 5.27. Different supply options for exemplary traction system considered in the analysis of the impact of supply option on the values of touch voltages at indirect touch



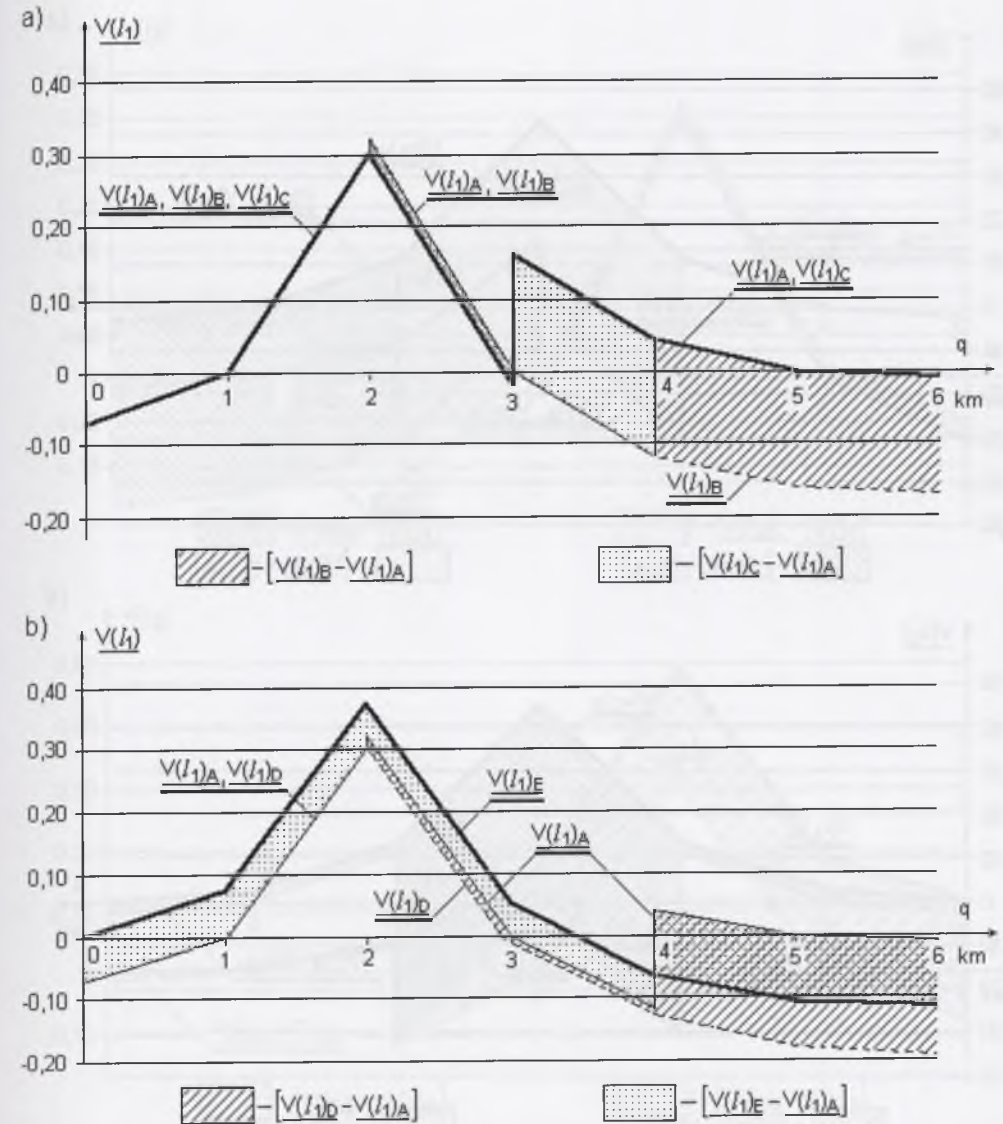
Rys. 5.28. Uproszczone przebiegi zmienności względnych wartości napięć dotykowych pojawiających się na częściach przewodzących dostępnych urządzeń uszynionych w pobliżu początku linii podczas przejazdu wzdłuż całej linii pojedynczej lokomotywy o stałym prądzie obciążenia przy różnych wariantach zasilania: a) porównanie wariantów zasilania A, B i C, b) porównanie wariantów zasilania A, D i E

Fig. 5.28. Simplified graphs of the variation of relative touch voltages generated on the conducting parts of available rail equipment in the vicinity of the origin of the line, during the motion of a single engine along the whole line, and under direct load current for different supply options: a) comparison of options A, B and C, b) comparisons of options A, D and E



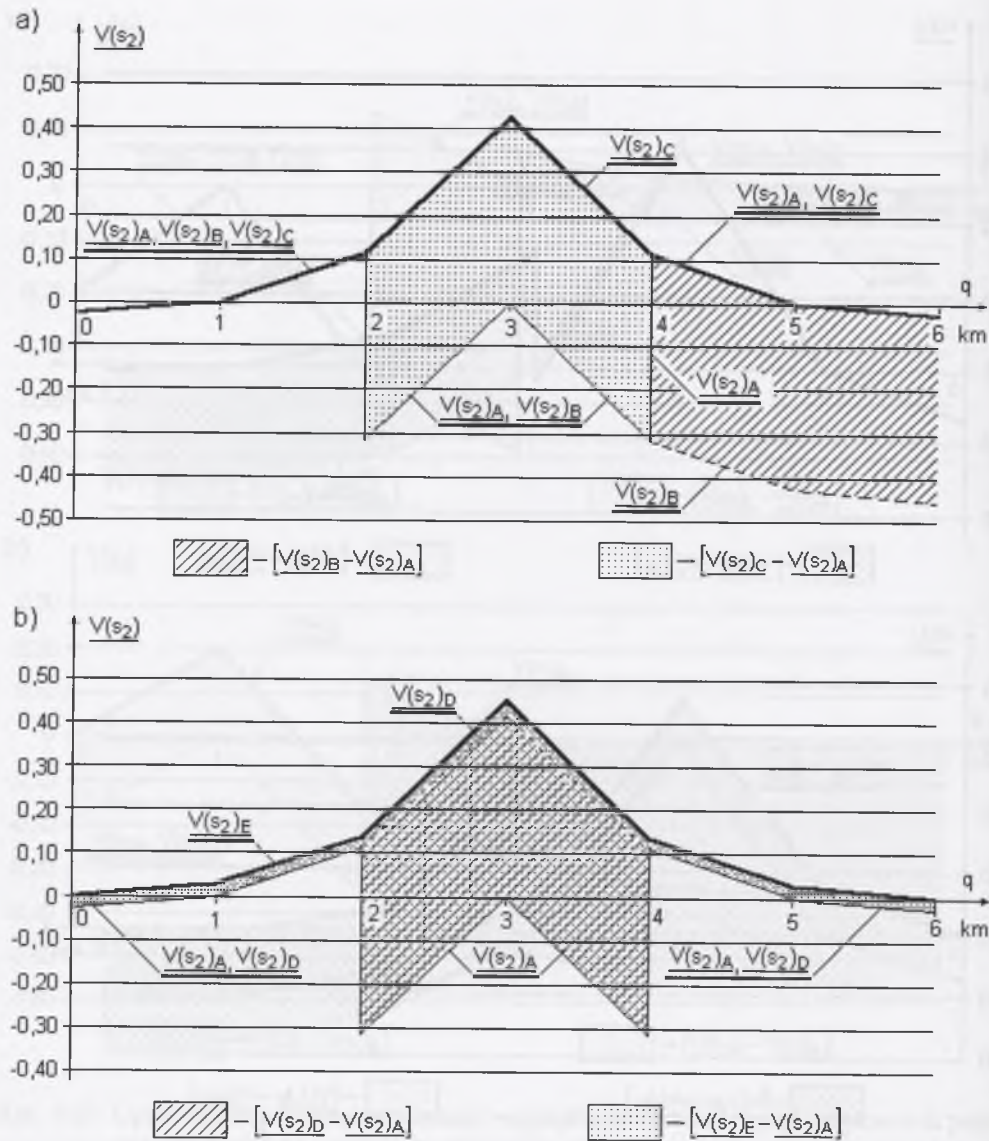
Rys. 5.29. Uproszczone przebiegi zmienności względnych wartości napięć dotykowych pojawiających się na częściach przewodzących dostępnych urządzeń uszynionych w pobliżu stacji zasilającej SZ1 ($s_1=1$ km) podczas przejazdu wzdłuż całej linii pojedynczej lokomotywy o stałym prądzie obciążenia przy różnych wariantach zasilania: a) porównanie wariantów zasilania A, B i C, b) porównanie wariantów zasilania A, D i E

Fig. 5.29. Simplified graphs of the variation of relative touch voltages generated on the conducting parts of available rail equipment in the vicinity of the supply station SZ1 ($s_1=1$ km) during the motion of a single engine along the whole line, and under direct load current for different supply options: a) comparison of options A, B and C, b) comparisons of options A, D and E



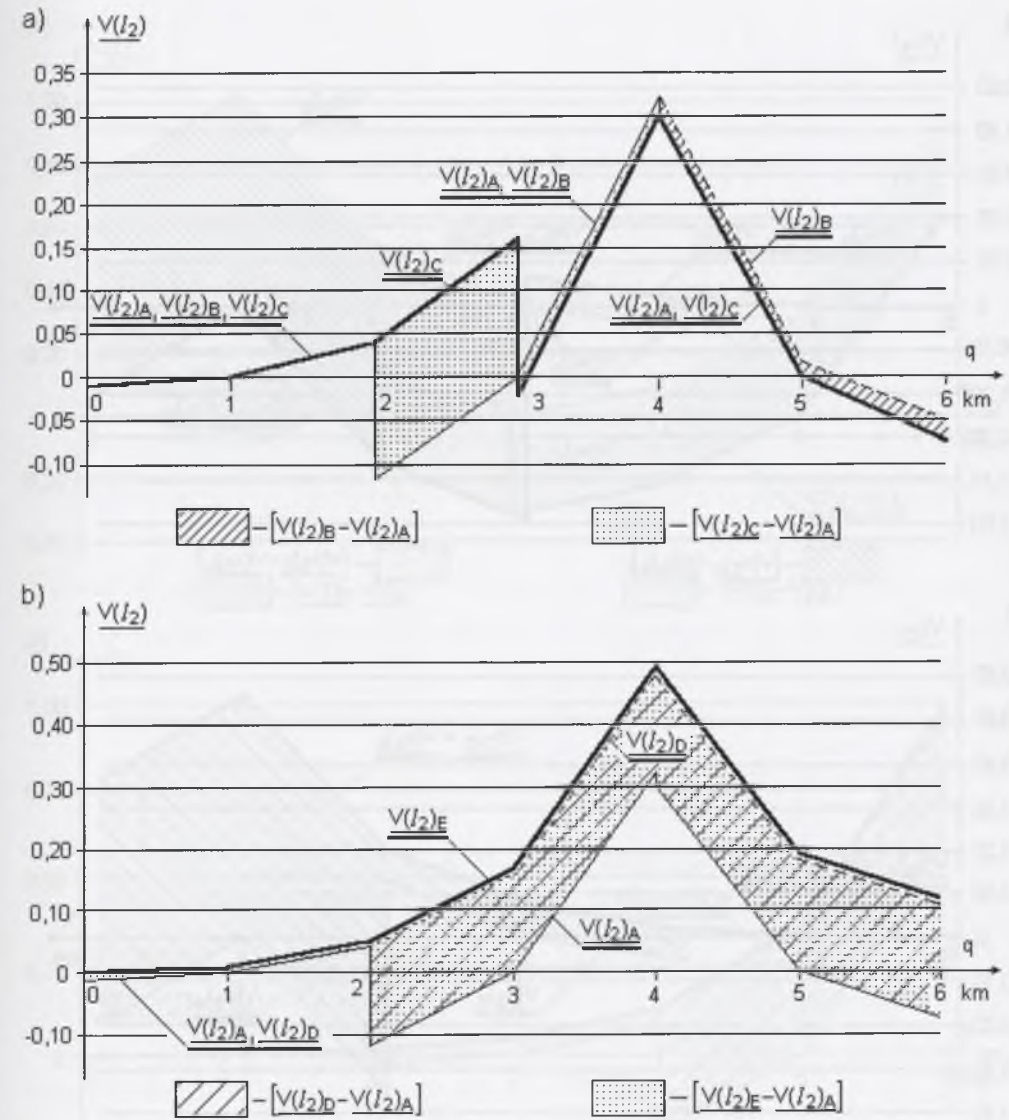
Rys. 5.30. Uproszczone przebiegi zmienności względnych wartości napięć dotykowych pojawiających się na częściach przewodzących dostępnych urządzeń uszynionych w pobliżu granicy stref zasilania przewodu jezdniowego ze stacji SZ1 i SZ2 ($l_1=2$ km) podczas przejazdu wzdłuż całej linii pojedynczej lokomotywy o stałym prądzie obciążenia przy różnych wariantach zasilania: a) porównanie wariantów zasilania A, B i C, b) porównanie wariantów zasilania A, D i E

Fig. 5.30. Simplified graphs of the variation of relative touch voltages generated on the conducting parts of available rail equipment in the vicinity of the supply zone boundary of the contact wire supplied by stations SZ1 and SZ2 ($l_1=2$ km) during the motion of a single engine along the whole line, and under direct load current for different supply options: a) comparison of options A, B and C, b) comparisons of options A, D and E



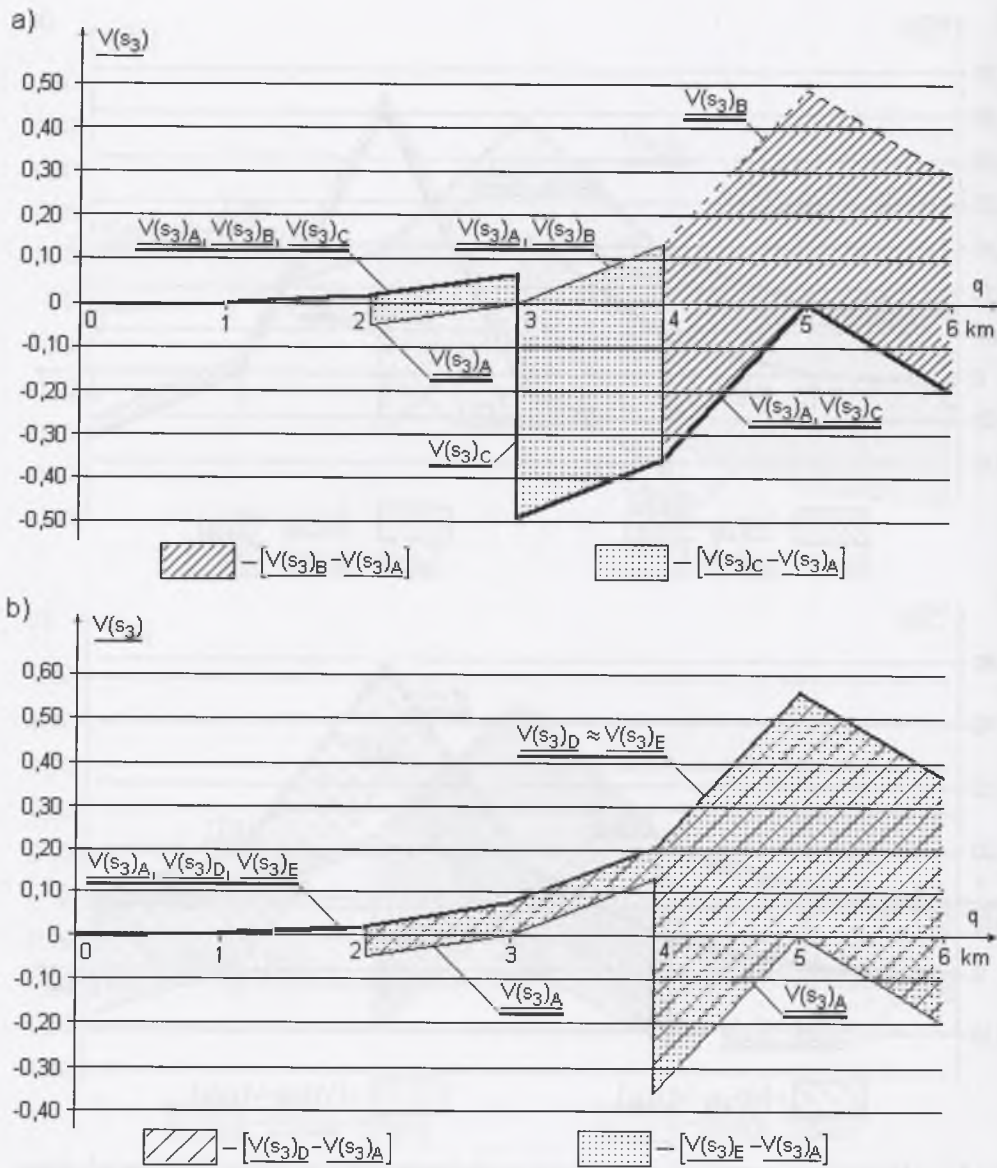
Rys. 5.31. Uproszczone przebiegi zmienności względnych wartości napięć dotykowych pojawiających się na częściach przewodzących dostępnych urządzeń uszynionych w pobliżu stacji SZ2 ($s_2=3$ km) podczas przejazdu wzdłuż całej linii pojedynczej lokomotywy o stałym prądzie obciążenia przy różnych wariantach zasilania: a) porównanie wariantów zasilania A, B i C, b) porównanie wariantów zasilania A, D i E

Fig. 5.31. Simplified graphs of the variation of relative touch voltages generated on the conducting parts of available rail equipment in the vicinity of the supply station ZS2 ($s_2=3$ km) during the motion of a single engine along the whole line, and under direct load current for different supply options: a) comparison of options A, B and C, b) comparisons of options A, D and E



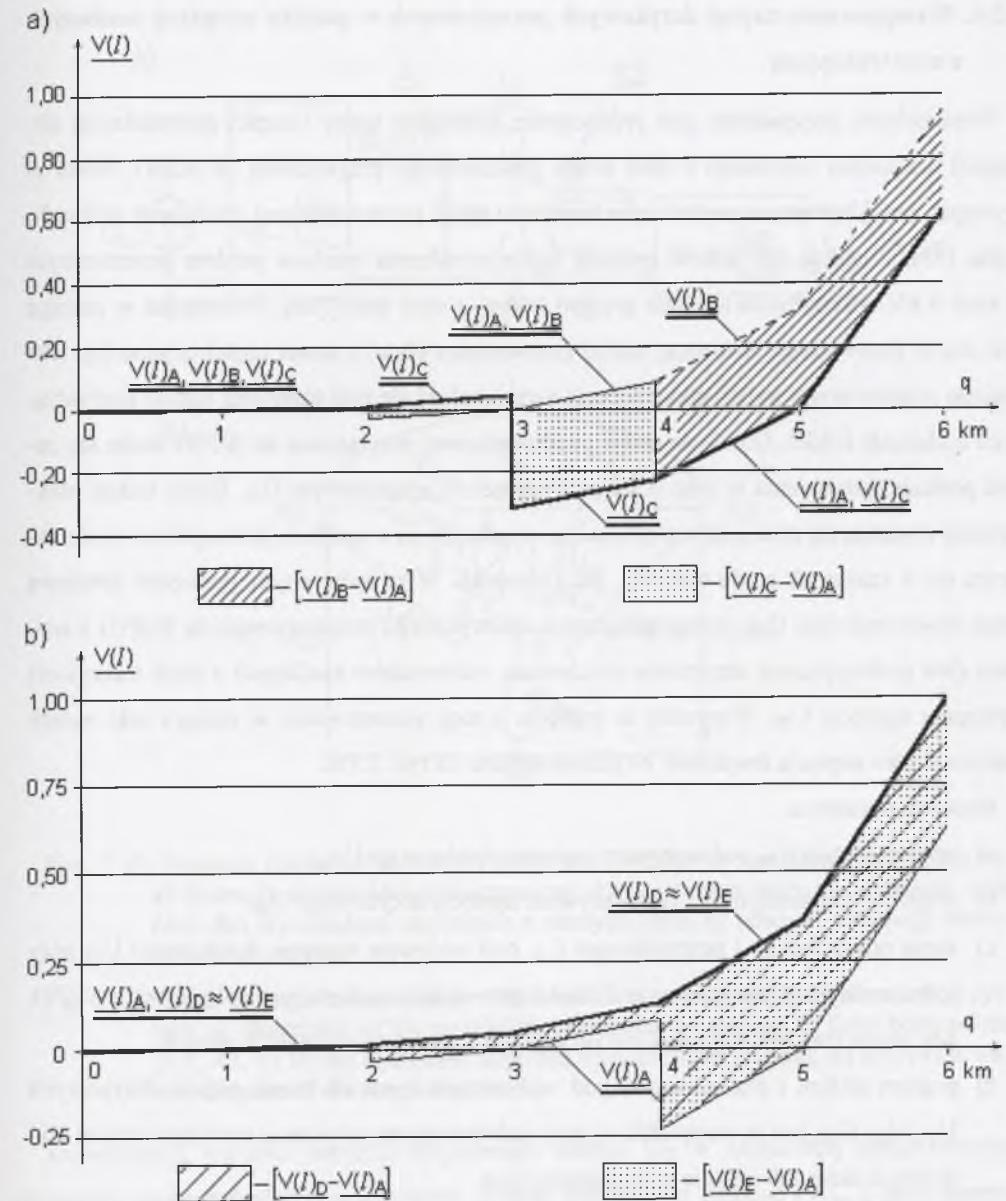
Rys. 5.32. Uproszczone przebiegi zmienności względnych wartości napięć dotykowych pojawiających się na częściach przewodzących dostępnych urządzeń uszynionych w pobliżu granicy zasilania przewodu jezdnego ze stacji SZ2 i SZ3 ($l_2=4$ km) podczas przejazdu wzdłuż całej linii pojedynczej lokomotywy o stałym prądzie obciążenia przy różnych wariantach zasilania: a) porównanie wariantów zasilania A, B i C, b) porównanie wariantów zasilania A, D i E

Fig. 5.32. Simplified graphs of the variation of relative touch voltages generated on the conducting parts of available rail equipment in the vicinity of the supply zone boundary of the contact wire supplied by stations SZ3 and ZS4 ($l_2=4$ km) during the motion of a single engine along the whole line, and under direct load current for different supply options: a) comparison of options A, B and C, b) comparisons of options A, D and E



Rys. 5.33. Uproszczone przebiegi zmienności względnych wartości napięć dotykowych pojawiających się na częściach przewodzących dostępnych urządzeń uszynionych w pobliżu stacji SZ3 ($s_3 = 5$ km) podczas przejazdu wzdłuż całej linii pojedynczej lokomotywy o stałym prądzie obciążenia przy różnych wariantach zasilania: a) – porównanie wariantów zasilania A, B i C, b) – porównanie wariantów zasilania A, D i E

Fig. 5.33. Simplified graphs of the variation of relative touch voltages generated on the electricity conducting parts of available rail equipment in the vicinity of the supply station SZ3 ($s_3 = 5$ km) during the motion of a single engine along the whole line, and under direct load current for different supply options: a) comparison of options A, B and C, b) comparisons of options A, D and E



Rys. 5.34. Uproszczone przebiegi zmienności względnych wartości napięć dotykowych pojawiających się na częściach przewodzących dostępnych urządzeń uszynionych w pobliżu końca linii podczas przejazdu wzdłuż całej linii pojedynczej lokomotywy o stałym prądzie obciążenia przy różnych wariantach zasilania: a) – porównanie wariantów zasilania A, B i C, b) – porównanie wariantów zasilania A, D i E

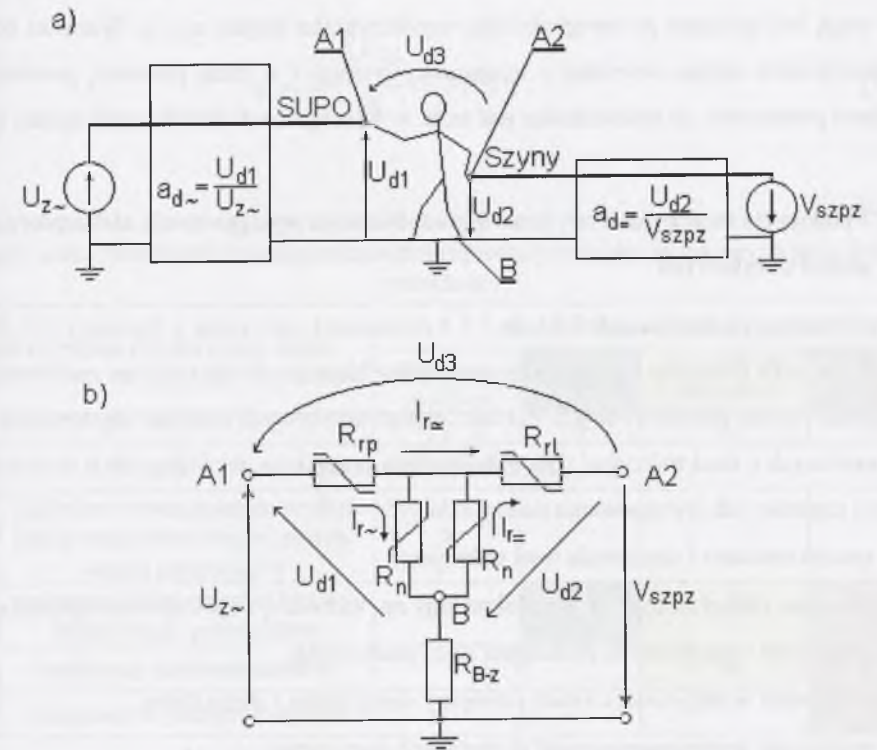
Fig. 5.34. Simplified graphs of the variation of relative touch voltages generated on the conducting parts of available rail equipment in the vicinity of the end of the line, during the motion of a single engine along the whole line, and under direct load current for different supply options: a) comparison of options A, B and C, b) comparisons of options A, D and E

5.5.4. Występowanie napięć dotykowych przemiennych w pobliżu urządzeń zasilanych z sieci trakcyjnej

Szczególnym przypadkiem jest jednoczesne dotknięcie szyny i części przewodzącej dostępnej urządzenia zasilanego z sieci prądu przemiennego przyłączonej do SUPO. Może to wystąpić, przykładowo, w najbliższym otoczeniu stacji prostownikowej zasilającej sieć trakcyjną [38]. Znajdują się tam w pobliżu siebie urządzenia zasilane prądem przemiennym (z sieci 6 kV) i urządzenia zasilane prądem stałym z sieci trakcyjnej. Pozostające w zasięgu ręki części przewodzące dostępne, części przewodzące obce, a nawet części czynne (np. obciążone prądem szyny trakcji elektrycznej) mogą znaleźć się pod wpływem napięć pochodzących z różnych źródeł. Obudowa stacji prostownikowej przyłączona do SUPO może się znaleźć podczas doziemienia w sieci 6 kV pod napięciem przemiennym U_{d1} . Szyny trakcji elektrycznej znajdują się stale pod napięciem U_{d2} wynikającym z rozkładu potencjałów i zmieniającym się w czasie tak co do wartości, jak i kierunku. W związku z tym, pomiędzy obudową stacji prostownikowej (lub innego urządzenia elektrycznego przyłączonego do SUPO) a szynami (lub podlegającymi uszynieniu obudowami odbiorników zasilanych z sieci trakcyjnej) występuje napięcie U_{d3} . Wszystkie te napięcia z racji pozostawania w zasięgu ręki należy traktować jako napięcia dotykowe, co przedstawiono na rys. 5.35a.

Możliwe są rażenia:

- prądem stałym $I_{r\rightarrow}$, pod wpływem napięcia dotykowego U_{d2} ,
- prądem przemiennym $I_{r\rightarrow}$, pod wpływem napięcia dotykowego U_{d1} ,
- sumą prądu stałego i przemiennego $I_{r\Rightarrow}$, pod wpływem napięcia dotykowego U_{d3} przy jednoczesnym dotknięciu szyn i części przewodzącej dostępnej połączonej z SUPO, gdy reszta ciała odizolowana jest od skał lub części przewodzących obcych,
- prądem stałym i przemiennym pod wpływem wszystkich trzech napięć dotykowych U_{d1} , U_{d2} , U_{d3} ; jest to przypadek c), przy jednoczesnym połączeniu trzeciego punktu ciała (B) ze skałą lub częścią przewodzącą obcą.



Rys. 5.35. Napięcia dotykowe w pobliżu stacji prostownikowej zasilającej sieć trakcyjną: a) ilustracja możliwości jednoczesnego dotyku trzema różnymi punktami ciała (A1, A2, B) urządzeń zasilanych z różnych sieci, b) schemat zastępczy obwodów rażeniowych

Fig. 5.35. Touch voltages in the vicinity of the rectifiers station supplying the traction system: a) illustration of the possibility of simultaneous touch at three body points (A1, A2, B) by the equipment supplied from different stations, b) equivalent circuit diagram of the shock circuits

Teoretycznie, wartości napięcia dotykowego stałego U_{d2} w najbardziej niekorzystnym przypadku mogą być równe potencjałowi punktu zasilającego dolnego (V_{szpz}), określanemu podczas normalnej pracy sieci zgodnie z zasadami przedstawionymi w rozdz. 5.5.1, w przypadku uszkodzeń – wg rozdz. 5.5.2, a w przypadku awaryjnego zasilania sieci trakcyjnej – wg rozdz. 5.5.3. W praktyce, rzeczywiste wartości tego napięcia wynikają dodatkowo z okoliczności towarzyszących wypadkowi (np. rozkładowi przestrzennemu konstrukcji pozostających w zasięgu ręki). Ilustruje to na rys. 5.35a współczynnik dotyku a_d przyjmujący wartości nie większe od 1. Podobnie jest w przypadku napięcia dotykowego przemiennego U_{d1} . Największa jego spodziewana wartość określona jest wg kryterium ochronnego działania systemu

uziemiających przewodów ochronnych dla sieci 6 kV, czyli $U_z \leq 50$ V [92]. W praktyce wartości mogą być mniejsze po uwzględnieniu współczynnika dotyku $a_d \leq 1$. Wartości obydwu współczynników dotyku wynikają z miejscowej sytuacji i w razie potrzeby, powinny być określone pomiarowo, co przewidziane jest m.in. w wymaganiach dodatkowych normy [93].

5.5.5. Propozycja metodyki oceny prawdopodobieństwa występowania niebezpiecznych napięć dotykowych

Przedstawione w rozdziałach 5.5.1 do 5.5.4 rozważania oraz znane z literatury [54, 69, 77, 78, 34] zjawiska związane z powstawaniem prądów błędzących wskazują na możliwość występowania bardzo zróżnicowanych wartości napięć dotykowych podczas użytkowania urządzeń zasilanych z sieci trakcyjnej. Do ważniejszych czynników decydujących o wartości tych napięć i częstości ich występowania należy zaliczyć:

- sposób zasilania i obciążenia sieci trakcyjnej,
- stan sieci dolnej nieuszkodzonej (określony np. wartością współczynnika wpływu α),
- możliwość występowania uszkodzeń złącz podłużnych,
- możliwość występowania zwarć pomiędzy siecią górną i siecią dolną,
- możliwość występowania zwarć doziemnych sieci górnej,
- możliwość występowania napięć dotykowych przemiennych w pobliżu urządzeń zasilanych z sieci trakcyjnej.

Wpływ zasilania sieci trakcyjnej na powstawanie prądów błędzących i występowanie napięć dotykowych analizowano w rozdz. 4.3.5 (tablica 4.4) i w rozdz. 5.5.3. Znaczenie pozostałych czynników przedstawiono odpowiednio w rozdziałach: 4.3.2 (tablica 4.1), 5.5.2, 5.5.3. Syntetycznie ujęte wyniki tej analizy przedstawiono w tablicy 5.4.

Wskaźnik charakteryzujący prawdopodobieństwo występowania niebezpiecznych napięć dotykowych obliczyć można ze wzoru (3.2a) przyjmując liczbę czynników ryzyka $k = 16$:

- 4 czynniki ryzyka wg tablicy 5.2,
- 5 czynników ryzyka wg tablicy 4.1,
- 6 czynników ryzyka wg tablicy 5.4,
- 1 czynnik ryzyka wg tablicy 4.4.

Wzór (3.2) przyjmie wówczas postać:

$$P_{UD} = \frac{\sum_{i=1}^{16} C_{Zi}}{64} \Rightarrow P\{UD\}. \quad (5.23)$$

Tablica 5.4

Zasady oceny możliwości występowania niebezpiecznych napięć dotykowych przy dotyku pośrednim

Opis czynnika ryzyka i jego stanu		Ocena stanu czynnika ryzyka:			
		najlepszy możliwy	zalecany	najgorszy dopuszczalny	niedopuszczalnie zły
1		2	3	4	5
Zasilanie sieci trakcyjnej					
Punkty zasilające dolne:	rozłożone równomiernie wzdłuż linii z zastosowaniem wyrównywania potencjałów	X			
	rozłożone równomiernie bez wyrównywania potencjałów	(X) ¹	X	(X) ¹	(X) ¹
	rozłożone nierównomiernie			X	(X) ¹
	skupione w jednym miejscu				X
Możliwość awaryjnego zasilania sieci trakcyjnej					
Wykluczone zasilanie awaryjne dwóch lub więcej rejonów z jednej stacji		X			
Przejsciowe (do czasu usunięcia awarii) zasilanie dwóch lub więcej rejonów z jednej stacji, po uzgodnieniu z inżynierem strażowym			X		
Przejsciowe (do czasu usunięcia awarii) zasilanie dwóch lub więcej rejonów z jednej stacji, bez uzgodnienia z inżynierem strażowym				X	
Stałe lub długotrwałe (rozmyślne) utrzymywanie zasilania z jednej stacji dwóch lub więcej rejonów					X
Obciążenie sieci trakcyjnej					
Liczba lokomotyw pracujących równocześnie	≤1	X			
	2÷4		X		
	≥2 w jednym miejscu lub > 4			X	
Zahamowana lokomotywa pozostawiona z włączonym nastawnikiem na zasypanych pyłem torach					X

1	2	3	4	5
Stan sieci dolnej nieuszkodzonej – wg tablicy 4.1 (rozdz. 4.3.2)				
Możliwość występowania uszkodzeń złącz podłużnych				
Wdrożone procedury systematycznego kontrolowania i naprawiania złącz podłużnych	X			
Okresowa kontrola stanu sieci dolnej		X		
Kontrola stanu sieci dolnej doraźna lub okazjonalna			X	
Brak kontroli stanu sieci dolnej				X
Możliwość występowania zwarć doziemnych lub pomiędzy siecią górną i siecią dolną				
Brak odnotowanych przypadków zwarć w ciągu ostatnich trzech lat; wdrożone procedury badań zabezpieczeń zwarciovych	X			
Odnutowane przypadki zwarć; wdrożone procedury badań zabezpieczeń zwarciovych		X		
Brak odnotowanych przypadków zwarć w ciągu ostatnich trzech lat; brak aktualnych badań zabezpieczeń zwarciovych			X	
Brak badań zabezpieczeń zwarciovych				X
Możliwość występowania napięć dotykowych przemiennych w pobliżu urządzeń zasilanych z sieci trakcyjnej				
Części przewodzące dostępne urządzeń AC i DC poza zasięgiem ręki	X			
Wdrożone procedury pomiaru napięć dotykowych AC i DC		X		
Brak wdrożonych procedur pomiaru napięć dotykowych AC i DC			X	

¹⁾ z uwzględnieniem zasad oceny przedstawionych w tablicy 4.4 (rozdział 4.3.5)

5.6. Analiza czynników ryzyka charakteryzujących spodziewane wartości prądów rażeniowych

5.6.1. Analiza napięć dotykowych i prądów rażeniowych występujących podczas dotyku bezpośredniego

Analizując wypadki elektryczne spowodowane dotykiem bezpośrednim, wyróżnić należy cztery charakterystyczne sytuacje:

- a) bezpośrednie dotknięcie przewodu jezdnego przy jednoczesnym kontakcie ze spągami lub częścią przewodzącą dostępną obcą (dotyk bezpośredni jednobiegunowy),

- b) dotknięcie przewodu jezdnego przedmiotem przewodzącym przy jednoczesnym kontakcie ze spągami lub częścią przewodzącą dostępną obcą,
- c) dotknięcie uszynaającego przewodu roboczego odbiornika zasilanego z sieci trakcyjnej w przypadku, gdy przewód ten oderwany jest od szyn jezdnych, przy jednoczesnym kontakcie ze spągami lub częścią przewodzącą dostępną obcą,
- d) dotknięcie przewodu jezdnego przy jednoczesnym kontakcie z szynami jezdnyimi (dotyk bezpośredni dwubiegunowy).

Dodatkowo, mimo że nie zanotowano takiego wypadku, uwzględnić należy sytuację:

- e) dotknięcia części czynnej odbiornika zasilanego z sieci trakcyjnej (z drutu ślizgowego) prawidłowo dołączonego do szyn (dobry stan roboczego przewodu uszynaającego).

W każdej z tych sytuacji wartość napięcia dotykowego i w konsekwencji, prądu rażeniowego, zależą od wielu czynników, których analizę przeprowadzić można na podstawie odpowiednio sporządzonego schematu zastępczego¹². Przy sporządzaniu schematów zastępczych kierowano się następującymi zasadami:

1. Dla każdego typu (rodzaju) schematu zastępczego sporządzić można wersję pełną, z której wynikają najmniejsze i pośrednie wartości napięcia dotykowego oraz wersję uproszczoną, odpowiadającą największej wartości tego napięcia.
2. Obciążenie sieci trakcyjnej, wyrażone przykładowo wartością zastępczego prądu obciążenia lokomotyw I_{zo} , może się zmieniać od zera ($I_{zo}=0$), do wartości maksymalnej (I_{zom}) ustalonej pomiarowo lub obliczeniowo.
3. Spadek napięcia w szynach wynika z rozkładu potencjałów szyn względem ziemi wywołanych pracą wszystkich lokomotyw na całym poziomie wydobywczym i można jego wartość wyznaczyć obliczeniowo [34].
4. Największe wartości napięć dotykowych przy dotyku bezpośrednim występują wówczas, gdy sieć trakcyjna jest nieobciążona ($I_{zo}=0$). Stan taki, przedstawiony za pomocą uproszczonego schematu zastępczego, występuje w rzeczywistych sieciach z prawdopodobieństwem, które można ocenić analizując rozkład jazdy i organizację ruchu pociągów.
5. Bliżej nieokreślone wartości rezystancji przejścia obuwia, rękawic i odzieży ochronnej, a także przewodzących przedmiotów, poprzez które dochodzi do dotyku bezpośredniego lub pośredniego, należy przyjmować i korygować z uwzględnieniem skutków wypadku, a w schematach uproszczonych – można pomijać.

¹² Na celowość takiego podejścia, będącego częścią tzw. analizy instrumentalnej, wskazuje m. in. Manojłow [60].

Ponadto przy obliczaniu spodziewanej wartości prądu rażeniowego należy uwzględnić możliwie wszystkie czynniki decydujące o wartości rezystancji ciała człowieka, tzn.: nieliniowość tej rezystancji, cechy klimatu w miejscu wypadku, czas pracy uszkodzonego do chwili wypadku, a także drogę i kierunek przepływu prądu rażeniowego (por. rozdz. 5.6.3 i 5.7).

Na rysunkach 5.36, 5.37 i 5.39 przedstawiono schematy zastępcze obwodu rażeniowego w przypadku dotyku bezpośredniego jednobiegunowego, a na rys. 5.38– w przypadku dotyku bezpośredniego dwubiegunowego. Rysunek 5.40 przedstawia schemat zastępczy w przypadku możliwego (choć nie zanotowanego w praktyce) wypadku dotyku bezpośredniego części czynnej odbiornika zasilanego z sieci trakcyjnej przy prawidłowo wykonanym uszynieniu roboczym. W schematach zastępczych przyjęto następujące oznaczenia:

A, B – odpowiednio punkt wpływu i wypływu prądu rażeniowego,

R_c – rezystancja ciała człowieka pomiędzy punktami A i B,

R_r, R_n – rezystancja jednej ręki, jednej nogi,

I_r – prąd rażeniowy,

U_d, U_{dm} – napięcie dotykowe, największa wartość napięcia dotykowego,

U_{zr} – napięcie źródła (250 V),

V_{szpz} – potencjał szyn w punkcie zasilającym dolnym,

ΔV_{sz} – spadek napięcia w szynach wywołany pracą lokomotyw (wynikający z rozkładu potencjałów szyn traktowanych jako przewodnik o równomiernie rozłożonych parametrach),

I_{zom} – największa wartość zastępczego prądu obciążenia sieci trakcyjnej,

I_o – prąd obciążenia odbiornika zasilanego z przewodu jezdnego,

R_{pz} – rezystancja zastępcza źródła, przewodu jezdnego i przewodów zasilających (przewodu zasilającego górnego i przewodu zasilającego dolnego),

R_{sz} – rezystancja zastępcza szyn pomiędzy punktem wpływu prądu rażeniowego (B) lub prądu obciążenia i punktem powrotnym,

R_{sz-z} – rezystancja zastępcza szyn względem ziemi,

R_{B-z} – rezystancja przejścia pomiędzy punktem wypływu prądu rażeniowego (B) i ziemią,

R_{B-sz} – rezystancja przejścia pomiędzy punktem wpływu prądu rażeniowego (B) i szynami,

R_{pp} – rezystancja przedmiotu przewodzącego, za pośrednictwem którego dotknięto przewodu jezdnego,

R_o – rezystancja zastępcza odbiornika zasilanego z przewodu jezdnego (np. tablicy ostrzegawczej), wyznaczona ze wzoru:

$$R_o = \frac{U_{ro}}{I_o} \approx \frac{U_n}{I_n}$$

w którym

U_{ro} – napięcie robocze w miejscu przyłączenia odbiornika,

U_n – napięcie znamionowe sieci,

I_n – prąd znamionowy odbiornika,

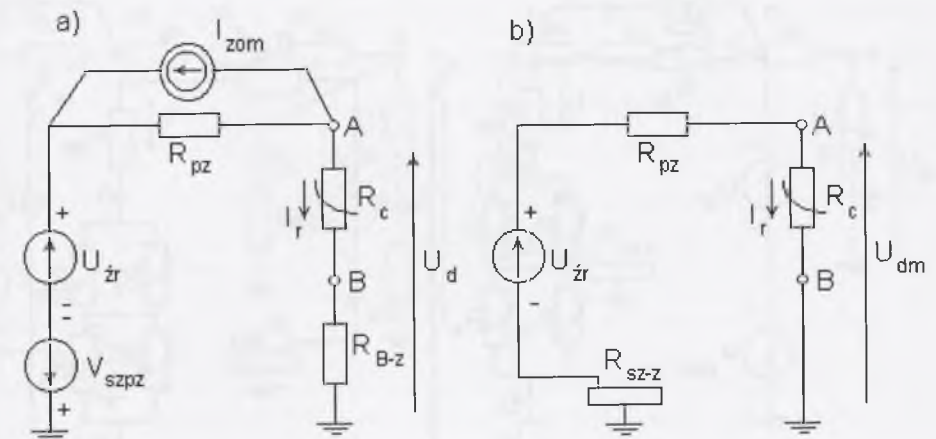
I_o – prąd obciążenia odbiornika,

w przypadku gdy odbiornikiem jest np. ruszająca lokomotywa, prąd I_o równy jest prądowi rozruchowemu przy odpowiednim połączeniu silników,

R_{go} – rezystancja górnego przewodu zasilającego odbiornik zasilany z przewodu jezdnego,

R_{do} – rezystancja przewodu uszyniającego roboczego odbiornika zasilanego z przewodu jezdnego,

R_{do-z} – rezystancja przejścia względem ziemi uszkodzonego (odłączonego od szyn) przewodu uszyniającego roboczego odbiornika zasilanego z przewodu jezdnego.



Rys. 5.36. Schemat zastępczy obwodu rażeniowego przy dotyku bezpośrednim jednobiegunowym przewodu jezdnego: a) wersja pełna uwzględniająca obciążenie sieci trakcyjnej, b) wersja uproszczona do wyznaczania największych wartości napięć dotykowych

Fig. 5.36. Equivalent circuit diagram of the shock circuit at contact wire unipolar direct touch: a) complete version considering the traction system load, b) simplified version for the designation of the highest touch voltage values

Spodziewane wartości napięć dotykowych w przypadku dotyku bezpośredniego wynikają z analizy schematów zastępczych obwodów rażeniowych. Można je opisać (używając oznaczeń wyjaśnionych powyżej) następującymi zależnościami:

- dla jednobiegunowego dotyku bezpośredniego przewodu jezdnego (rys. 5.36, rys. 5.37)

$$U_d = U_{\dot{z}r} - V_{szpz} - I_{zom} \cdot R_{pz} \quad (5.24a)$$

$$U_{dm} = U_{\dot{z}r} \quad (5.24b)$$

- dla dwubiegunowego dotyku bezpośredniego przewodu jezdnego (rys. 5.38)

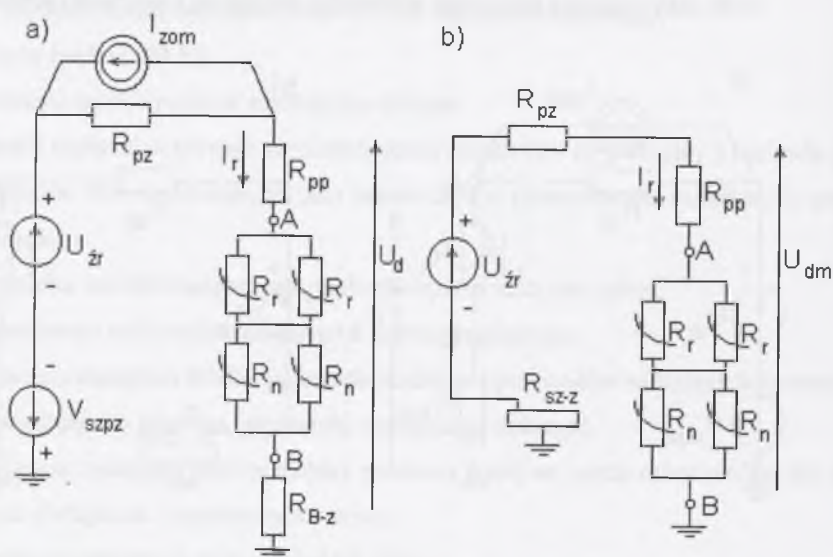
$$U_d = U_{\dot{z}r} - \Delta V_{sz} - I_{zom} \cdot R_{pz} \quad (5.25a)$$

$$U_{dm} = U_{\dot{z}r} \quad (5.25b)$$

- dla dotyku bezpośredniego uszkodzonego przewodu roboczego (rys. 5.39)

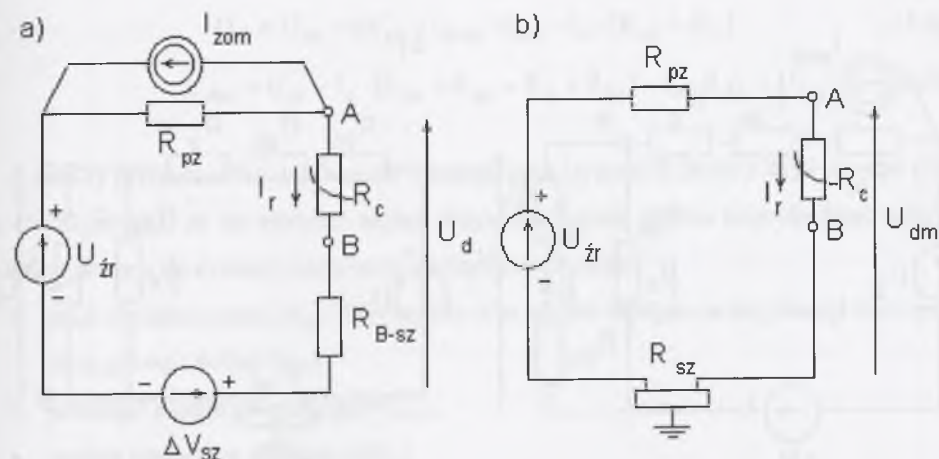
$$U_d = U_{\dot{z}r} - V_{szpz} - I_{zom} \cdot R_{pz} - I_o \cdot (R_{go} + R_o + R_{do}) \quad (5.26a)$$

$$U_{dm} = U_{\dot{z}r} \quad (5.26b)$$



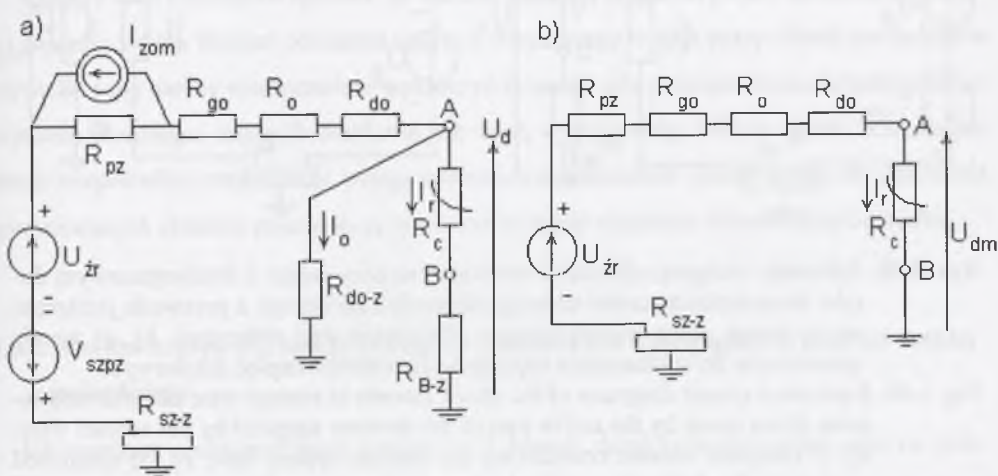
Rys. 5.37. Schemat zastępczy obwodu rażeniowego przy dotyku bezpośrednim jednobiegunowym przewodu jezdnego przedmiotem przewodzącym: a) wersja pełna uwzględniająca obciążenie sieci trakcyjnej, b) wersja uproszczona do wyznaczania największych wartości napięć dotykowych

Fig. 5.37. Equivalent circuit diagram of the shock circuit at contact wire unipolar direct touch by electricity conducting object: a) complete version considering the traction system load, b) simplified version for the designation of the highest touch voltage values



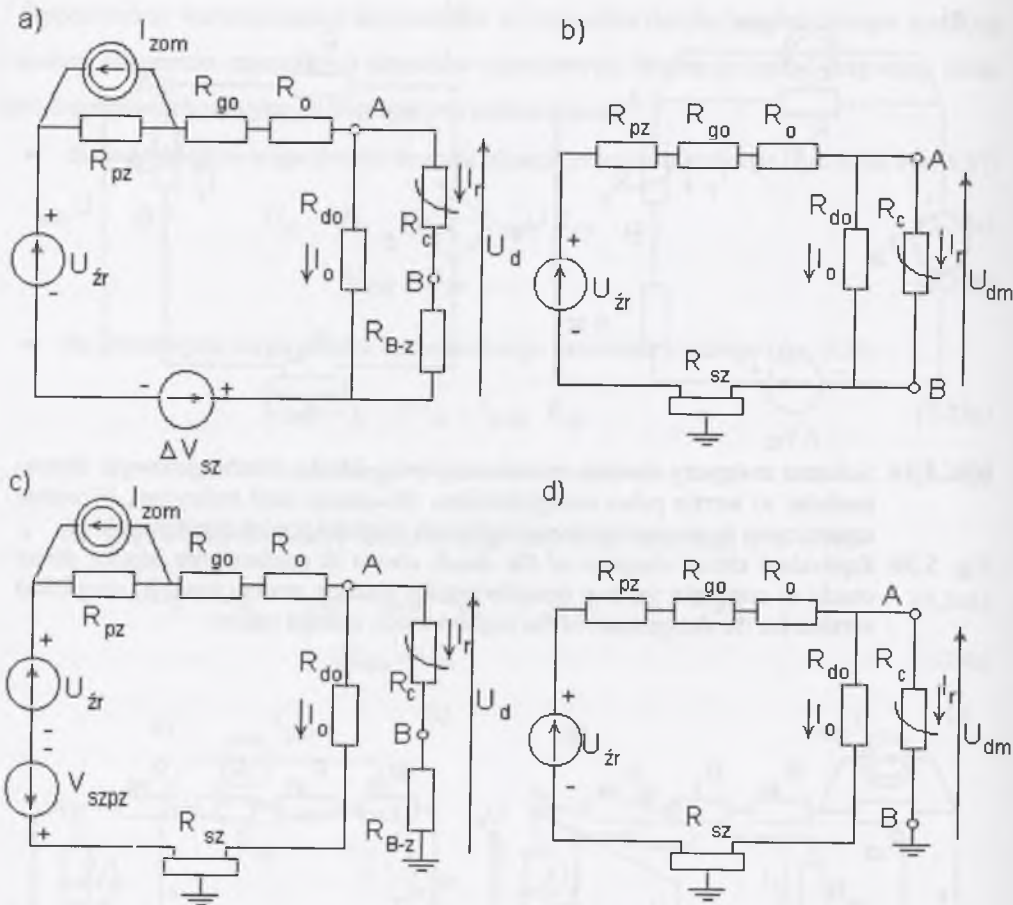
Rys. 5.38. Schemat zastępczy obwodu rażeniowego przy dotyku dwubiegunowym bezpośrednim: a) wersja pełna uwzględniająca obciążenie sieci trakcyjnej, b) wersja uproszczona do wyznaczania największych wartości napięć dotykowych

Fig. 5.38. Equivalent circuit diagram of the shock circuit at contact wire bipolar direct touch: a) complete version considering the traction system load, b) simplified version for the designation of the highest touch voltage values



Rys. 5.39. Schemat zastępczy obwodu rażeniowego przy dotyku bezpośrednim uszkodzonego (oderwanego od szyn) przewodu uszyniającego roboczego tablicy ostrzegawczej zasilanej z przewodu jezdnego: a) wersja pełna uwzględniająca obciążenie sieci trakcyjnej, b) wersja uproszczona do wyznaczania największych wartości napięć dotykowych

Fig. 5.39. Equivalent circuit diagram of the shock circuit at damaged (separated from the rail) rail wire direct touch by the warning board supplied by the contact wire: a) complete version considering the traction system load, b) simplified version for the designation of the highest touch voltage values



Rys. 5.40. Schematy zastępcze obwodów rażeniowych przy jedno- i dwubiegunowym dotyku bezpośrednim części czynnej odbiornika zasilanego z przewodu jezdnego: a), c) wersje pełne uwzględniające obciążenie sieci trakcyjnej, b), d) wersje uproszczone do wyznaczania największych wartości napięć dotykowych

Fig. 5.40. Equivalent circuit diagrams of the shock circuits at contact wire unipolar and bipolar direct touch by the active part of the receiver supplied by the contact wire: a), c) complete version considering the traction system load, b), d) simplified version for the designation of the highest touch voltage values

- dla jednobiegunowego dotyku bezpośredniego części czynnej odbiornika zasilanego z przewodu jezdnego (rys. 5.40a)

$$U_d = U_{zr} - V_{szpz} - I_{zom} \cdot R_{pz} - I_o \cdot (R_{go} + R_o) \quad (5.27a)$$

$$U_{dm} = U_{zr} - I_o \cdot (R_{pz} + R_{go} + R_o) \approx U_{zr} \quad (5.27b)$$

- dla dwubiegunowego dotyku bezpośredniego części czynnej odbiornika zasilanego z przewodu jezdnego (rys. 5.40c)

$$U_d = U_{zr} - \Delta V_{sz} - I_{zom} \cdot R_{pz} - I_o \cdot (R_{go} + R_o) \quad (5.28a)$$

$$U_{dm} = U_{zr} - I_o \cdot (R_{pz} + R_{go} + R_o + R_{sz}) = I_o \cdot R_{do} \approx U_{zr} \quad (5.28b)$$

Z analizy przedstawionych schematów zastępczych (rysunki 5.36 do 5.41) i wzorów (5.24) do (5.28) wynika, że na wartości napięć dotykowych przy dotyku bezpośrednim wpływają mogą, stosownie do sytuacji rażeniowej, następujące czynniki:

- prąd obciążenia sieci (I_{zom}) i wywołany nim spadek napięcia na rezystancji sieci zasilającej górnej i dolnej (R_{pz}),
- potencjał punktu powrotnego (V_{szpz}),
- spadek napięcia w szynach (ΔV_{sz}),
- prąd obciążenia, rezystancja części czynnej odbiorników zasilanych z sieci trakcyjnej i rezystancja przewodów zasilających te odbiorniki (R_o , R_{go} , R_{do}),
- rezystancja zastępcza szyn pomiędzy punktem powrotnym i punktem przyłączenia odbiornika zasilanego z sieci trakcyjnej (R_{sz}).

Każdy z tych czynników sprawia, że wartość napięcia dotykowego jest mniejsza od pełnego napięcia źródła. Stopień obniżenia napięcia dotykowego w tych przypadkach jest jednakże niewielki i nie można równocześnie wykluczyć sytuacji, gdy podczas dotyku bezpośredniego czynniki obniżające napięcie dotykowe nie będą występowały. Należy zatem, rozpatrując dotyk bezpośredni, przyjmować wersje uproszczone schematów zastępczych i do określenia spodziewanych skutków porażenia przyjmować napięcie dotykowe równe napięciu źródła.

5.6.2. Analiza napięć dotykowych i prądów rażeniowych występujących podczas dotyku pośredniego

Jak wynika z przedstawionych w tabelicy 5.1 danych, dotyk pośredni rzadko staje się przyczyną wypadków porażenia. Jedyny zarejestrowany w analizowanym czasie wypadek, który można zakwalifikować do spowodowanych dotykiem pośrednim, wydarzył się w warunkach nietypowych, gdy lokomotywa elektryczna nie miała odpowiedniego połączenia elektrycznego z szynami jezdnyymi (tabelica 5.1, poz. 21). Schemat zastępczy obwodu rażeniowego dla tego przypadku przedstawiono na rys. 5.41.

Na rys. 5.41, 5.42 i 5.43, oprócz oznaczeń wyjaśnionych w rozdz. 5.6.1, użyto następujących:

I_{pk} – prąd pobierany przez nieruchomą lokomotywę, której koła stykają się z szynami przez warstwę rozsypanego pyłu kamiennego,

R_{pk} – rezystancja przejścia pomiędzy kołami lokomotywy i szynami pokrytymi warstwą rozsypanego pyłu kamiennego,

R_s – rezystancja uzwojeń silników unieruchomionej lokomotywy,

R_{PE} – rezystancja przewodu uszyniającego ochronnego.

Napięcie dotykowe wynika z wyrażenia (rys. 5.41a):

$$U_d = U_{zr} - \Delta V_{sz} - I_{zom} \cdot R_{pz} - I_{pk} \cdot R_s \quad (5.29)$$

W skrajnej sytuacji, gdy rezystancja warstwy pyłu kamiennego pokrywającego szyny (R_{pk}) będzie dążyła do nieskończoności (rys. 5.41d), przypadek sprowadzić można do podobnego wypadku towarzyszącym dotykowi bezpośredniemu (rys. 5.36, rys. 5.37), przy którym maksymalna wartość napięcia dotykowego będzie równa napięciu źródła (rys. 5.36b).

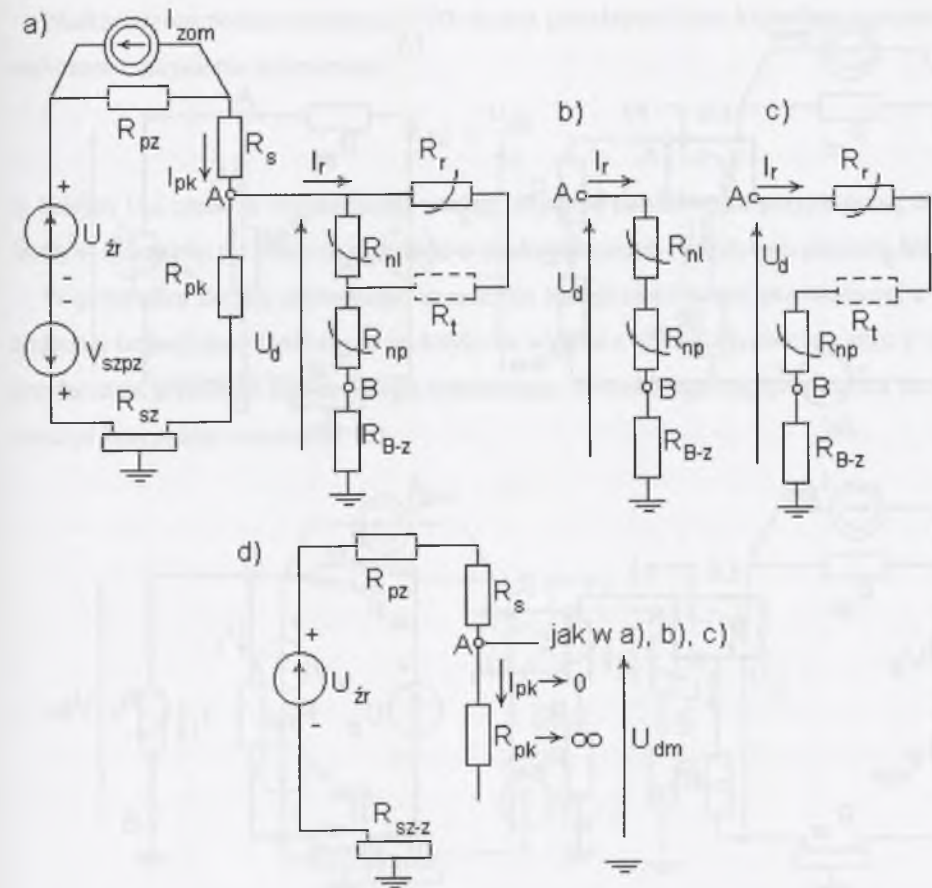
Innym, typowym przypadkiem dotyku pośredniego, jest dotknięcie części przewodzących dostępnych urządzeń zasilanych z przewodu jezdnego (np. lampy, tablice informacyjne) lub stanowiących wyposażenie sieci trakcyjnej (np. łączniki sekcyjne). Napięcia dotykowe należy rozpatrywać wówczas dla dwóch przypadków:

- przy uszkodzeniu izolacji podstawowej tych urządzeń,
- przy nieuszkodzonej izolacji podstawowej, gdy napięcie dotykowe wynika z potencjału szyn, do których przyłączony jest przewód uszyniający ochronny.

Wśród wypadków zaistniałych w ciągu analizowanych 10 lat taka sytuacja nie wystąpiła. Może to świadczyć o skuteczności uszynienia ochronnego, jako wymaganego środka ochrony przy dotyku pośrednim w urządzeniach zasilanych z przewodu jezdnego. Na rys. 5.42 przedstawiono schematy zastępcze obwodów prądów rażeniowych, jakie powstają w przypadku dotknięcia obudowy łącznika sekcyjnego (ŁS), w którym nastąpiło uszkodzenie izolacji podstawowej. Wartość napięcia dotykowego wynika wówczas z wyrażenia:

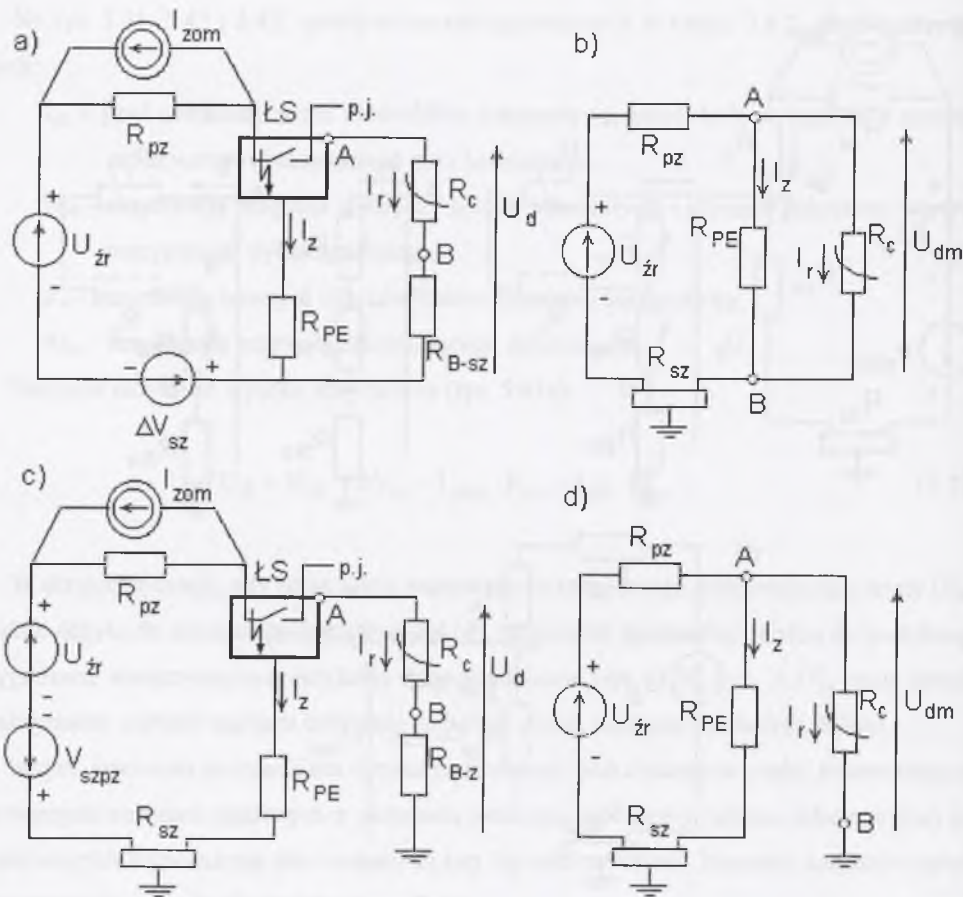
$$U_d = I_z \cdot R_{PE} \quad (5.30)$$

w którym I_z – prąd zwarcia metalicznego przewodu jezdnego z obudową łącznika sekcyjnego połączoną z szynami przewodem uszyniającym ochronnym PE.



Rys. 5.41. Schemat zastępczy prawdopodobnych obwodów rażeniowych, jakie mogły powstać przy dotyku pośrednim kabiny lokomotywy, której koła stykały się z szynami przez warstwę pyłu kamiennego, a nastawnik nie został przestawiony w pozycję 0 (silniki odłączone od przewodu jezdnego): a) wersja pełna, uwzględniająca obciążenie sieci trakcyjnej lokomotywami, przy założeniu przepływu prądu rażeniowego dwoma drogami: ręka – tułów – noga prawa, oraz: noga lewa – noga prawa, b) wersja pełna przy uwzględnieniu przepływu prądu rażeniowego na drodze: noga lewa – noga prawa, c) wersja pełna przy założeniu przepływu prądu rażeniowego na drodze: ręka – tułów – noga prawa, d) wersja uproszczona do wyznaczenia największych wartości napięć dotykowych

Fig. 5.41. Equivalent circuit diagram of probable shock circuits that might be generated at the direct touch of the engine cab, with the wheels in contact with the rails through the coal dust layer, and the controller not set in 0 position (motors disconnected from the contact wire): a) complete version considering the traction system load and assuming the passage of the shock current through two paths: hand – torso – right leg, left leg – right leg, b) complete version assuming the passage of the shock current through: left leg – right leg, c) complete version assuming the passage of the shock current through the path: hand – torso – right leg, d) simplified version for the designation of the highest touch voltage values



Rys.5.42. Schematy zastępcze obwodów rażeniowych powstających przy dotyku pośrednim urządzeń trakcyjnej elektrycznej przewodowej, w których nastąpiło uszkodzenie izolacji podstawowej: a) wersja pełna uwzględniająca obciążenie sieci trakcyjnej lokomotywami przy założeniu napięcia dotykowego w odniesieniu do szyn jezdnych, b) wersja uproszczona do wyznaczenia największych wartości napięć dotykowych odniesionych do szyn jezdnych, c) wersja pełna uwzględniająca obciążenie sieci trakcyjnej lokomotywami przy założeniu napięcia dotykowego w odniesieniu do ziemi, d) wersja uproszczona do wyznaczenia największych wartości napięć dotykowych odniesionych do ziemi

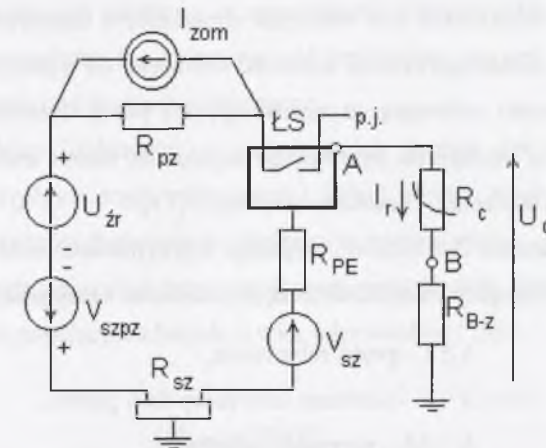
Fig. 5.42. Equivalent circuit diagrams of the shock circuits generated at indirect touch by wired electric traction equipment, under the condition of damage to basic insulation: a) complete version considering the traction system load by engines and assuming the touch voltage related to traffic rails, b) simplified version for the designation of the highest touch voltage values related to the traffic rails, c) complete version considering the traction system load by engines and assuming the touch voltage related to the ground, d) simplified version for the designation of the highest touch voltage values related to the earth

Przekształconą postać wyrażenia (5.30) można potraktować jako kryterium poprawności wykonania uszynienia ochronnego:

$$R_{PE} \leq \frac{U_{dd}}{I_z} \quad (5.31)$$

w którym U_{dd} oznacza dopuszczalną wartość napięcia dotykowego, przyjmowaną 60 V lub 30 V, w zależności od lokalnych warunków środowiskowych i przyjętego poziomu ryzyka.

W przypadku dotyku pośredniego urządzenia trakcyjnej elektrycznej przewodowej o nieuszkodzonej izolacji (rys. 5.44) napięcie dotykowe wynika z wartości potencjału szyn w punkcie przyłączenia przewodu uszyniającego ochronnego. Wartość tego napięcia można zatem wyznaczyć korzystając z wzoru (4.13).



Rys. 5.43. Schemat zastępczy obwodu rażeniowego powstającego w przypadku dotyku pośredniego urządzeń trakcyjnej elektrycznej przy nieuszkodzonej izolacji podstawowej

Fig. 5.43. Equivalent circuit diagram of the shock circuit generated at direct contact by wired electric traction equipment under undamaged condition of basic insulation

Napięcia dotykowe przekraczające wartość dopuszczalną mogą występować przede wszystkim w przypadku uszkodzenia złącza podłużnego lub zwarć w sieci trakcyjnej (por. I13 oraz I11, I12 w drzewie zdarzeń, rys. 5.2). Analizę wartości tych napięć przeprowadzono w rozdz. 5.5.2.

5.6.3. Wzrost ryzyka porażenia prądem elektrycznym w warunkach dyskomfortu cieplnego

5.6.3.1. Wpływ dyskomfortu cieplnego na rezystancję ciała człowieka

Wyrobiska podziemne charakteryzują się znacznym zróżnicowaniem warunków klimatycznych. Mimo wielu działań zmierzających do zapewnienia komfortu cieplnego w miejscu

pracy, stale występują jeszcze wyrobiska, w których parametry klimatu odbiegają od pożądanych. Przykładowo w roku 2000 liczba wyrobisk o temperaturze przekraczającej $+28^{\circ}\text{C}$ wynosiła w polskich kopalniach 164 (w roku 1999 – 224) [67]. Do pogorszenia warunków klimatycznych przyczyniają się m.in. nagrzewające się podczas pracy urządzenia elektryczne, zwłaszcza zlokalizowane w miejscach słabo wentylowanych [35].

Wartość spodziewanego prądu rażeniowego przy określonym napięciu dotykowym zależy od rezystancji ciała człowieka. Spośród czynników wpływających na zmiany rezystancji ciała, na pierwszy plan w warunkach podziemi kopalń wysuwają się warunki środowiskowe w miejscu pracy. W warunkach podziemi kopalń syntetycznym wskaźnikiem umożliwiającym uwzględnienie wpływu środowiska i jednocześnie wydatku energetycznego pracującego człowieka na jego samopoczucie jest wskaźnik dyskomfortu cieplnego [13]. Dyskomfort cieplny jest pojęciem określającym m.in. zdolność człowieka do wykonywania pracy w środowisku, którego warunki odbiegają od zapewniających pracę najbardziej wydajną i bezpieczną pod względem obciążenia termicznego organizmu (stanu zadowolenia człowieka z warunków ciepłych otoczenia – komfortu cieplnego) [13].

Bezwymiarowy wskaźnik dyskomfortu cieplnego δ przyjmować może wartości z jednego z trzech zakresów, którym przyporządkowane są dopuszczalne czasy pracy [13]:

$$\begin{aligned} \delta &\geq 1 - \text{praca zabroniona,} \\ 0,8 &\leq \delta < 1 - \text{skrócony czas pracy do 6 godzin,} \\ \delta &< 0,8 - \text{normalny czas pracy,} \end{aligned}$$

przy czym jako komfort cieplny traktuje się warunki, w których wskaźnik $\delta = 0$.

Ujemne wartości wskaźnika dyskomfortu cieplnego ($\delta < 0$) charakterystyczne są dla warunków środowiska odczuwanego jako chłodne.

Jednym z ważniejszych procesów zachodzących w organizmie człowieka, które decydują o odczuwaniu dyskomfortu cieplnego, jest wydzielanie się potu, które to zjawisko, jak wiadomo [2, 41, 60], wpływa z kolei w bardzo istotny sposób na rezystancję skóry.

Szczegółowe, prowadzone od wielu lat badania [np. 56, 60, 82] i rozważania nad wpływem poszczególnych składników warunków środowiskowych na rezystancję ciała człowieka, nie znalazły jeszcze ilościowego ujęcia w dokumentach normalizacyjnych [97]. W niektórych propozycjach przepisowych [104] rozróżnia się dwa rodzaje warunków środowiskowych przyporządkowując im dwa przedziały rezystancji ciała (powyżej $1\text{ k}\Omega$ i do $1\text{ k}\Omega$) i dwie różne wartości dopuszczalnych napięć dotykowych.

Interesujące wnioski wyprowadzić można z badań rezystancji ciała elektromonterów zatrudnionych w zróżnicowanych warunkach podziemi kopalń [40, 41]. Analizując metodykę prowadzenia tych badań (pomiar „rezystancji standardowej” na drodze pomiędzy opuszkiem kciuka i palca środkowego jednej dłoni), należy przyjąć, że uzyskane wyniki charakteryzują w większym stopniu właściwości elektryczne skóry (naskórka) niż całego ciała. Nie można pominąć też faktu, że badania odnoszące zmienność rezystancji do wskaźnika dyskomfortu cieplnego prowadzone były na nielicznej grupie 4 osób, co upoważnia do wyciągania jedynie wstępnych wniosków. Łącząc jednakże wyniki badań w kopalniach [40, 41] z zależnościami przedstawionymi w raporcie IEC-479 [73] można zaproponować uproszczony model rezystancji ciała człowieka w różnych warunkach dyskomfortu cieplnego.

Podstawą tego modelu jest założenie, że na rezystancję ciała składają się:

- rezystancja wewnętrzna R_w , której wartość praktycznie nie jest zależna od wpływów środowiskowych i od napięcia dotykowego,
- rezystancja skóry (dokładniej – podwójna jej wartość, tzn. w miejscu wpływu i w miejscu wypływu prądu rażeniowego), której wartość zależy od napięcia dotykowego i od wskaźnika dyskomfortu cieplnego w miejscu pracy.

Rezystancji wewnętrznej można przyporządkować wartość stałą, równą wartości asymptotycznej dla określonej populacji badanych, a więc odpowiednio [73]:

$$\begin{aligned} R_{w5\%} &= 650\ \Omega, \\ R_{w50\%} &= 750\ \Omega, \\ R_{w95\%} &= 850\ \Omega. \end{aligned} \tag{5.32}$$

Rezystancja skóry natomiast zależy będzie:

- od napięcia dotykowego zgodnie z zależnością podaną w raporcie IEC-479 [73],
- od wskaźnika dyskomfortu cieplnego i napięcia dotykowego – zgodnie z wynikami badań w kopalniach [41], tzn. z wykorzystaniem wyrażenia:

$$Z_0 = \frac{70 \cdot (1 + \delta)^{-0,7}}{\sqrt[3]{U_d}} \tag{5.33}$$

w którym

U_d – napięcie dotykowe (rażenia), V,

δ – wskaźnik dyskomfortu cieplnego.

Z_0 – impedancja standardowa¹³ ciała człowieka, k Ω ,

Dodatkowo przyjęto następujące założenia:

- dla wskaźnika dyskomfortu $\delta = 1$, przy którym praca jest zabroniona i zagrażająca zdrowiu, rezystancja skóry jest pomijalna ($R_s \rightarrow 0$); argumentem za przyjęciem tego założenia jest fakt intensywnego pocenia się człowieka w takich warunkach,
- jako warunki normalne w odniesieniu do rezystancji ciała należy przyjąć taki wskaźnik dyskomfortu δ_n , przy którym rezystancja ciała równa jest wartości wynikającej z raportu IEC-479 [73].

Uproszczony model rezystancji ciała przy określonym napięciu dotykowym i wskaźniku dyskomfortu cieplnego, można zatem przedstawić w postaci równania:

$$R_c(U_d, \delta) = R_w + [R(U_d) - R_w] \cdot k_R(\delta) \quad (5.34)$$

gdzie

R_w – rezystancja wewnętrzna równa rezystancji asymptotycznej, por. (5.32),

(U_d) – rezystancja ciała człowieka dla napięcia U_d i określonej populacji wg raportu IEC-479,

$k_R(\delta)$ – współczynnik uwzględniający wpływ dyskomfortu cieplnego na rezystancję ciała człowieka.

Współczynnik $k_R(\delta)$ przyjmować może następujące wartości:

- $k_R(\delta=1) = 0$ – rezystancja skóry pomijalna, rezystancja ciała równa jest rezystancji wewnętrznej,
- $k_R(\delta=\delta_n) = 1$ – rezystancja ciała wynika z zależności podanej w raporcie IEC-479,
- $k_R(\delta_n < \delta < 1)$ – wynika z wyrażenia:

$$k_R(\delta) = \frac{Z_0(\delta)}{Z_0(\delta=1)} - 1 = \frac{(1+\delta)^{-0,7}}{(1+1)^{-0,7}} - 1 = 0,616 \cdot (1+\delta)^{-0,7} - 1 \quad (5.35)$$

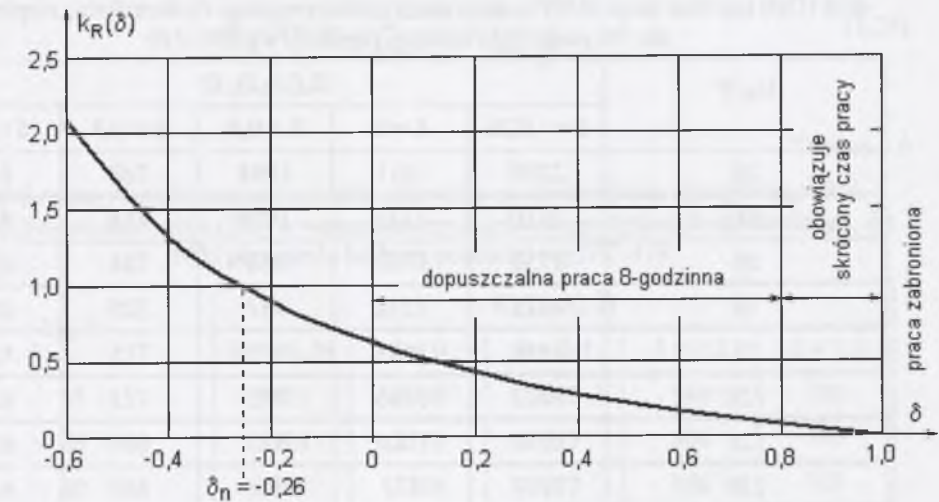
przy czym Z_0 jest „impedancją standardową” wynikającą ze wzoru (5.33) [41].

¹³ Określenie użyte w publikacjach [40, 41] dotyczy wyników pomiarów impedancji ciała wykonanych w określony sposób i odnoszących się do określonych warunków środowiskowych scharakteryzowanych za pomocą katastopni wilgotnych K_w lub wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ . Autor w dalszych rozważaniach nie traktuje Z_0 jako impedancji ciała człowieka (jej wartości bezwzględnej) wykorzystując jedynie zbadaną zależność tej impedancji od warunków klimatycznych. Zależność ta posłużyła do zaproponowania własnego modelu rezystancji ciała człowieka w zmieniających się warunkach środowiskowych podziemi kopalń.

Wówczas:

$$\delta_n = -0,26 \quad (5.36)$$

Na rys. 5.44 przedstawiono zależność współczynnika $k(\delta)$ od wskaźnika dyskomfortu cieplnego, a w tablicach 5.5, 5.6 i 5.7 zestawiono obliczeniowe wartości rezystancji ciała człowieka odpowiadające wybranym charakterystycznym wartościom tego wskaźnika.



Rys. 5.44. Zależność współczynnika uwzględniającego zmienność rezystancji ciała $k_R(\delta)$ od wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ . Zaznaczono charakterystyczne wartości wskaźnika dyskomfortu, przy których dopuszcza się różny czas pracy człowieka

Fig. 5.44. Relation between the ratio considering variable resistance of the human body $k_R(\delta)$ and thermal discomfort coefficient δ , with the indication of the characteristic values of the thermal coefficient for which different duration of human work is permitted

Wskaźnik dyskomfortu cieplnego jest wielkością postulowaną do stosowania przy charakteryzowaniu warunków pracy w wyrobiskach podziemnych. W praktyce częściej spotyka się w kopalniach ocenę klimatycznych warunków pracy na podstawie systematycznych pomiarów katatermometrycznych, a wielkością służącą do ilościowej ich oceny jest natężenia chłodzenia wyrażane w katastopniach wilgotnych. Badania zależności rezystancji ciała elektromonterów zatrudnionych w podziemiach kopalń od warunków klimatycznych wyrażanych w katastopniach doprowadziły do sformułowania zależności [40]:

$$Z_0 = \frac{0,45 \cdot K_w^{2,3}}{\sqrt[3]{U_d}} \quad (5.37)$$

w której

K_w – liczba katastrofni wilgotnych, a pozostałe oznaczenia są takie same jak we wzorze (5.33).

Tablica 5.5

Spodziewane wartości rezystancji ciała człowieka na drodze prądu rażeniowego dłoń – dłoń (DD) lub dłoń stopa (DS) w warunkach zróżnicowanego dyskomfortu cieplnego, dla 5% percentylu badanej populacji wg IEC-479

U_d, V	$R_c(U_d, \delta), \Omega$				
	$\delta = -0,26$	$\delta = 0$	$\delta = 0,4$	$\delta = 0,8$	$\delta = 1,0$
25	2200	1611	1084	768	650
30 ^{d)}	2110	1555	1059	761	650
50	1750	1332	958	734	650
60	1645	1272	931	726	650
75	1510	1183	891	715	650
120	1482	1166	883	713	650
125	1230	1010	812	694	650
150	1169	972	795	690	650
180	1097	927	775	684	650
210	1024	882	755	679	650
220	1000	867	748	677	650
250	767	722	683	659	650
700	750	712	678	658	650
1000	700	681	664	654	650
Wartość asymptotyczna	650	650	650	650	650

^{d)} wartości napisane kursywą zostały obliczone przy zastosowaniu interpolacji liniowej

Przeprowadzając podobne rozważania jak poprzednio, uproszczony model rezystancji ciała człowieka można przedstawić w postaci wzoru:

$$R_c(U_d, K_w) = R_w + [R(U_d) - R_w] \cdot k_R(K_w) \quad (5.38)$$

w którym współczynnik uwzględniający wpływ warunków klimatycznych na rezystancję ciała człowieka $k_R(K_w)$ przyjmować może następujące wartości:

- $k_R(K_{w0}) = 0$ – rezystancja skóry pomijalna, rezystancja ciała równa jest rezystancji wewnętrznej,
- $k_R(K_{wn}) = 1$ – rezystancja ciała wynika z zależności podanej w raporcie IEC-479,
- $k_R(K_{w0} < K_w < K_{wn})$ – wynika z wyrażenia:

$$k_R(K_w) = \frac{Z_0(K_w)}{Z_0(K_{wn})} = \frac{K_w^{2,3}}{K_{wn}^{2,3}} \quad (5.39)$$

Tablica 5.6

Spodziewane wartości rezystancji ciała człowieka na drodze prądu rażeniowego dłoń – dłoń (DD) lub dłoń stopa (DS) w warunkach zróżnicowanego dyskomfortu cieplnego, dla 50% percentylu badanej populacji wg IEC-479

U_d, V	$R_c(U_d, \delta), \Omega$				
	$\delta = -0,26$	$\delta = 0$	$\delta = 0,4$	$\delta = 0,8$	$\delta = 1,0$
25	3875	2688	1625	988	750
30	3698	2578	1319	904	750
50	2990	2139	1377	920	750
60	2782	2010	1319	904	750
75	2470	1816	1232	881	750
120	2398	1771	1212	876	750
125	1750	1370	1030	826	750
150	1645	1305	1001	818	750
180	1518	1126	965	809	750
210	1392	1148	930	799	750
220	1350	1122	918	796	750
250	1117	977	853	778	750
700	1100	967	848	777	750
1000	1050	936	834	773	750
Wartość asymptotyczna	750	750	750	750	750

Charakterystyczne skrajne wartości katastrofni wilgotnych K_{w0} i K_{wn} ocenić można na podstawie następującego rozumowania, uwzględniającego zależność wydajności człowieka od warunków klimatycznych oraz zalecane i dopuszczalne normy komfortu pracy [17]:

- a) przy $K_w \geq 15$ wydajność pracy górnika ocenia się na poziomie 100%, przy czym wysoki komfort pracy gwarantuje środowisko, w którym osiągnięto liczbę katastrofni wilgotnych z przedziału (18 – 25); stąd wartość K_{w_n} , przy której rezystancja ciała człowieka nie odbiega od wartości podawanej w raporcie IEC [73], nie powinna być mniejsza od 15,
- b) wydajność pracy górnika spada poniżej 60% przy $K_w < 5$, co w wyrobisku o prędkości przewietrzającego powietrza $w = 0,1$ m/s, odpowiada temperaturze wilgotnej 30°C , a więc temperaturze, w której praca jest zabroniona (z wyjątkiem prowadzenia akcji ratowniczej); można zatem przyjąć, że $K_{w_0} = 5$, czyli, że rezystancja ciała człowieka w takich warunkach wynika tylko z rezystancji wewnętrznej (rezystancja skóry jest pomijalna), a wartość współczynnika $k_R(K_{w_0} = 5)$ równa jest zero,

Tablica 5.7

Spodziewane wartości rezystancji ciała człowieka na drodze prądu rażeniowego dłoń – dłoń (DD) lub dłoń stopa (DS) w warunkach zróżnicowanego dyskomfortu cieplnego, dla 95% percentylu badanej populacji wg IEC-479

U_d, V	$R_c(U_d, \delta), \Omega$				
	$\delta = -0,26$	$\delta = 0$	$\delta = 0,4$	$\delta = 0,8$	$\delta = 1,0$
25	8800	5779	3076	1454	850
30	8100	5345	2880	1401	850
50	5300	3609	2096	1188	850
60	4780	3287	1950	1148	850
75	4000	2803	1732	1089	850
120	3900	2741	1704	1059	850
125	3000	2183	1452	1013	850
150	2770	2040	1388	996	850
180	2493	1869	1310	975	850
210	2217	1698	1233	954	850
220	2125	1641	1207	947	850
250	1589	1308	1058	906	850
700	1550	1284	1046	903	850
1000	1500	1253	1032	899	850
Wartość asymptotyczna	850	850	850	850	850

- c) przy $K_w = 11$ wydajność pracy górnika osiąga poziom ok. 75% i należy skrócić czas pracy do 6 godzin; przyjmując, że te właśnie warunki klimatyczne powinny charakteryzować zwiększoną wrażliwość na działanie prądu elektrycznego wyrażającą się również obniżeniem rezystancji ciała człowieka poniżej umownego poziomu $1000 \Omega^{14}$, można metodą kolejnych przybliżeń ustalić wartość 20 katastrofni wilgotnych, jako odpowiadającą klimatowi, przy którym rezystancja ciała człowieka nie zależy od tego klimatu ($K_{w_0} = 20$).

Wobec tego wzór (5.39) przyjmie postać:

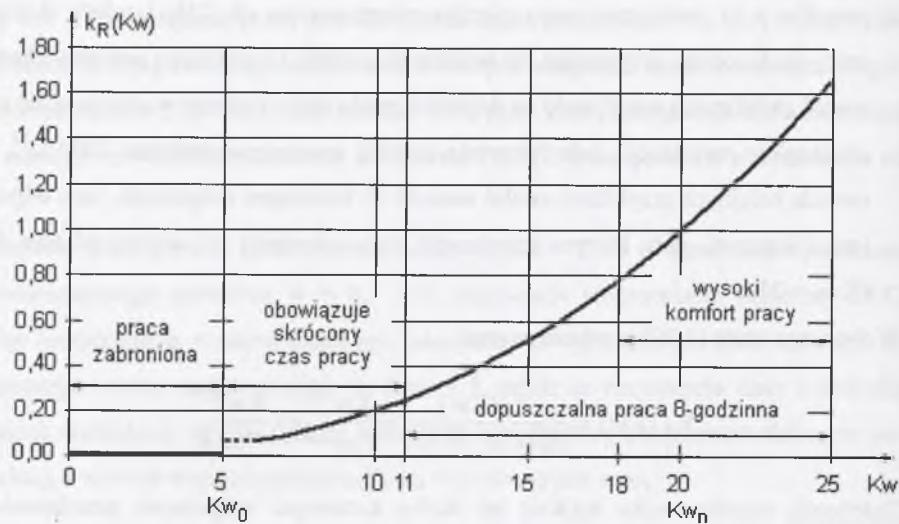
$$k_R(K_w) = \frac{Z_0(K_w)}{Z_0(K_{w_n} = 20)} = \frac{K_w^{2,3}}{20^{2,3}} = \frac{K_w^{2,3}}{982,6} \quad (5.40)$$

Zależność współczynnika $k_R(K_w)$ od liczby katastrofni wilgotnych przedstawiono na rys. 5.45. W tablicach 5.8 do 5.10 przedstawiono natomiast obliczeniowe wartości rezystancji ciała człowieka odpowiadające zróżnicowanemu klimatowi wyrobisk.

Analizując wartości rezystancji ciała człowieka zamieszczone w tablicach 5.5, 5.6 i 5.7, warto zwrócić uwagę na kolumny odpowiadające wskaźnikowi dyskomfortu $\delta = 0$ i $\delta = 0,4$ w tablicy 5.5. Wynika z nich, że wartość wskaźnika dyskomfortu $\delta = 0,4$ można przyjąć jako wartość rozgraniczającą warunki, w których rezystancja ciała człowieka (dla 5% percentylu populacji) jest w przybliżeniu równa co najmniej 1000Ω i mniej niż 1000Ω . Pozwala to nawiązać do proponowanego niegdyś [104] kryterium różnicowania rezystancji ciała, a więc i wrażliwości na porażenia. Można zatem przyjąć następujące założenie:

- w wyrobiskach (i/lub na stanowiskach pracy), w których wskaźnik dyskomfortu cieplnego nie przekracza wartości 0,4, rezystancja ciała człowieka i wrażliwość człowieka na działanie prądu elektrycznego jest zbliżona do spotykanej (percentyl 5%) w warunkach powierzchniowych ($R_c > 1000 \Omega$),
- w wyrobiskach (i/lub na stanowiskach pracy), w których wskaźnik dyskomfortu cieplnego ma wartość większą od 0,4, rezystancja ciała człowieka jest obniżona ($R_c < 1000 \Omega$), a wrażliwość człowieka na działanie prądu elektrycznego jest istotnie obniżona w stosunku do spotykanej w warunkach powierzchniowych.

¹⁴ W nawiązaniu do obowiązujących dawniej przepisów [104].



Rys. 5.45. Zależność współczynnika uwzględniającego zmienność rezystancji ciała $k_R(Kw)$ od katostopni wilgotnych Kw . Zaznaczono charakterystyczne wartości Kw , przy których dopuszcza się różny czas pracy człowieka

Fig. 5.45. Relation between the ration considering variable resistance of the human body k_R (δ) and humidity Kata- degrees Kw with the indication of the characteristic values of the degrees for which different duration of human work is permitted

Tablica 5.8

Spodziewane wartości rezystancji ciała człowieka na drodze prądu rażeniowego dłoń – dłoń (DD) lub dłoń stopa (DS) w warunkach zróżnicowanego klimatu ocenianego w katostopniach wilgotnych, dla 5% percentylu badanej populacji wg IEC-479

U_d, V	$R_c(U_d, Kw), \Omega$				
	$Kw = 20$	$Kw = 15$	$Kw = 11$	$Kw = 8$	$Kw = 5$
1	2	3	4	5	6
25	2200	1456	1038	836	650
30	2110	1409	1015	825	650
50	1750	1222	925	782	650
60	1654	1172	901	770	650
75	1510	1097	865	753	650
120	1482	1083	858	750	650
125	1230	952	795	720	650
150	1169	920	786	716	650
180	1097	882	762	704	650
210	1024	845	744	695	650
220	1000	832	738	692	650
250	767	711	679	664	650

cd. tablicy 5.8

	1	2	3	4	5	6
	700	750	702	675	662	650
	1000	700	676	663	656	650
Wartość asymptotyczna	650	650	650	650	650	650

Tablica 5.9

Spodziewane wartości rezystancji ciała człowieka na drodze prądu rażeniowego dłoń – dłoń (DD) lub dłoń stopa (DS) w warunkach zróżnicowanego klimatu ocenianego w katostopniach wilgotnych, dla 50% percentylu badanej populacji wg IEC-479

U_d, V	$R_c(U_d, Kw), \Omega$				
	$Kw = 20$	$Kw = 15$	$Kw = 11$	$Kw = 8$	$Kw = 5$
25	3875	2375	1531	1125	750
30	3698	2283	1487	1104	750
50	2990	1915	1310	1019	750
60	2782	1807	1258	994	750
75	2470	1644	1180	956	750
120	2398	1607	1162	947	750
125	1750	1270	1000	870	750
150	1645	1215	974	857	750
180	1518	1150	942	542	750
210	1392	1084	911	827	750
220	1350	1062	900	822	750
250	1117	941	842	794	750
700	1100	932	838	792	750
1000	1050	906	825	786	750
Wartość asymptotyczna	750	750	750	750	750

Tablica 5.10

Spodziewane wartości rezystancji ciała człowieka na drodze prądu rażeniowego dłoń – dłoń (DD) lub dłoń stopa (DS) w warunkach zróżnicowanego klimatu ocenianego w katostopniach wilgotnych, dla 95% percentylu badanej populacji wg IEC-479

U_d, V	$R_c(U_d, Kw), \Omega$				
	$Kw = 20$	$Kw = 15$	$Kw = 11$	$Kw = 8$	$Kw = 5$
1	2	3	4	5	6
25	8800	4984	2838	1804	850
30	8100	4620	2663	1720	850

cd. tablicy 5.10

1	2	3	4	5	6
50	5300	3164	1963	1384	850
60	4780	2894	1833	1322	850
75	4000	2488	1638	1228	850
120	3900	2436	1613	1216	850
125	3000	1968	1388	1108	850
150	2770	1848	1330	1080	850
180	2493	1705	1261	1047	850
210	2217	1561	1192	1014	850
220	2125	1513	1169	1003	850
250	1589	1234	1035	939	850
700	1550	1214	1025	934	850
1000	1500	1188	1013	928	850
Wartość asymptotyczna	850	850	850	850	850

5.6.3.2. Prognozowanie wzrostu ryzyka porażenia prądem elektrycznym w warunkach dyskomfortu cieplnego

Zmniejszanie się rezystancji ciała człowieka w miarę wzrostu dyskomfortu cieplnego po- ciąga za sobą, przy stałej wartości napięcia dotykowego, wzrost ewentualnego prądu rażeniowego. Pomijając wpływ dyskomfortu na prawdopodobieństwo wypadku¹⁵, wzrost ciężkości porażenia przy wzroście wartości prądu rażeniowego jest ewidentny. „Ciężkość porażenia”, stanowiąca jeden ze składników ryzyka (por. rys. 5.5) jest pojęciem trudnym do jednoznacznego określenia ilościowego z punktu widzenia rozważań technicznych; bardziej szczegółowy opis jest domeną medycyny (patofizjologii). Chcąc jednak analizować i oceniać ryzyko porażenia prądem elektrycznym, niezbędne jest podjęcie próby opisu ciężkości porażenia w kategoriach ilościowych, najlepiej w postaci wskaźnika, którego wartość będzie uzależniona od czynników decydujących o spodziewanej wartości prądu rażeniowego. Podstawą do określenia takiego wskaźnika może być wykres zależności $t_r = f(I_r)$, przedstawiający strefy czasowo-prądowe skutków działania prądów stałych [73].

¹⁵ Prawdopodobieństwo wypadku również może wzrosnąć w wyniku ogólnego pogorszenia samopoczucia człowieka w warunkach klimatycznych odbiegających od normalnych, a wraz z tym np. obniżenia refleksu; badanie tego typu zależności wykracza jednak poza zakres niniejszej pracy.

Za niepożądane (niebezpieczne) można uznać skutki wywołane prądem rażeniowy większym od prądu samouwolnienia, oznaczonego na wykresie (rys. 5.46 i rys. 5.1) krzywą b. Każdy punkt, określony współrzędnymi (I_{ri} , t_{ri}), znajdujący się na wykresie na prawo od krzywej b (np. punkt P_i na rys. 5.46a), reprezentuje sytuację, w której ciężkość porażenia jest niepożądana; im bardziej współrzędne punktu oddalone są od krzywej b (zwłaszcza w kierunku osi odciętych), tym większa jest ciężkość porażenia. Ponieważ o skutkach rażenia (ocenia- nych wg wykresu $t_r = f(I_r)$) decyduje zarówno wartość prądu rażeniowego, jak i czas rażenia, to jako miarę ciężkości porażenia można przykładowo uznać zbiór punktów ograniczonych z jednej strony krzywą b, a z drugiej strony rzędną i odciętą rozpatrywanego punktu. Im większe pole powierzchni uzyskanej w ten sposób figury, tym większa jest ciężkość porażenia. Jest to oczywiście opis uproszczony. Trzeba bowiem zdawać sobie sprawę z faktu, że skutki przepływu prądu rażeniowego nie są zależne liniowo od jego wartości. Przykładowo, skutki ciepłe są w przybliżeniu proporcjonalne do kwadratu prądu, a więc punktom położo- nym bardziej na prawo od krzywej b należałoby przypisać większą wagę. Aktualny stan wie- dzy w zakresie elektropatologii nie umożliwia jednak dostatecznie szczegółowego opisu roz- kładu intensywności skutków rażenia w zaznaczonych na wykresie strefach. Dlatego też w rozważaniach związanych z ryzykiem przyjęto założenie, że miarą ciężkości porażenia jest pole powierzchni wyznaczonej w sposób podany wyżej.

Ponieważ wartość prądu rażeniowego, przy stałym napięciu dotykowym, zależna jest od rezystancji ciała, a ta od warunków środowiskowych, więc wyznaczyć należy dwie spodzie- wane wartości prądu:

- prąd rażeniowy I_{r1} obliczony przy założeniu, że rezystancja ciała odpowiada warun- kom środowiskowym normalnym, a więc umownej wartości współczynnika dyskom- fortu cieplnego $\delta = -0,26$ (lub liczbie katastrofni wilgotnych $K_w = 20$), obliczany ze wzoru:

$$I_{r1} = \frac{U_d}{R_c(\delta = -0,26)}, \quad (5.41)$$

- prąd rażeniowy I_{ri} obliczony dla rezystancji ciała odpowiadającej określonym warun- kom środowiskowym, cechującym się wskaźnikiem dyskomfortu δ_i (lub liczbą kata- stopni K_{wi}):

$$I_{ri} = \frac{U_d}{R_c(\delta_i)}. \quad (5.42)$$

Celowe jest rozróżnienie dwóch przypadków:

- wartość prądu rażeniowego I_{r1} nie przekracza najmniejszej wartości wynikającej z krzywej c_1 (rys. 5.46a),
- wartość prądu rażeniowego I_{r1} wyznacza na krzywej c_1 czas t_{rd1} (rys. 5.46b).

W pierwszym przypadku ciężkość porażenia w normalnych warunkach środowiskowych (przy prądzie rażeniowym I_{r1}) odpowiada polu powierzchni wyznaczonej punktami A–B–C w strefie braku możliwości samouwolnienia (DC3), zaznaczonej na rys. 5.46a kolorem zielonym. Rzędna punktów A i B ustalona została na poziomie umownego czasu trwania rażenia, równego umownemu czasowi działania urządzeń ochronnych zapewniających samoczynne wyłączenie zasilania $t_{wu} = 5s$ w przypadkach, gdy wartości prądów rażeniowych nie osiągają wartości wynikających z krzywej c_1 .

W warunkach środowiskowych różniących się od normalnych, cechujących się wskaźnikiem dyskomfortu cieplnego δ_i , którym odpowiada prąd rażeniowy I_{ri} zależny od rezystancji ciała $R_c(\delta_i)$, ciężkość porażenia wzrasta. Charakteryzuje to pole powierzchni figury A–B_i–C_i. Skrajnie niekorzystnym warunkom środowiskowym ($\delta = 1$) odpowiada największy prąd rażeniowy I_{rm} , wynikający z rezystancji ciała $R_c(\delta_i = 1)$. Ciężkość porażenia (a więc i ryzyko) określona jest wówczas polem powierzchni figury A–E–G, przy czym część tego pola (A–D–F–G) należy do strefy DC3, a część (D–E–F), zaznaczona na rys. 5.46a kolorem czerwonym, do strefy bezpośredniego zagrożenia życia, DC4. Jako czas trwania rażenia przyjęto umowny czas $t_{wu} = 5s$.

W drugim przypadku (rys. 5.46b) wartość spodziewanego prądu rażeniowego I_{r1} jest na tyle duża, że wyznacza na krzywej c_1 dopuszczalny czas rażenia t_{rd1} , przed upływem którego powinno nastąpić samoczynne wyłączenie zasilania, by nie dopuścić do rażenia zagrażającego powstaniem fibrylacji komór serca (w strefie DC4). Ciężkość porażenia wyznaczona jest wówczas polem powierzchni figury A'–B'–C' (zaznaczonym na rys. 5.46b kolorem zielonym) i znać ją można za tolerowalną, pod warunkiem, że urządzenie ochronne spowoduje samoczynne wyłączenie zasilania po czasie t_{rd1} . W bardziej niekorzystnych warunkach środowiskowych (δ_i) prąd rażeniowy, przy tej samej wartości napięcia dotykowego, będzie większy (I_{ri}) powodując wzrost ciężkości porażenia do poziomu określonego polem powierzchni figury (A'–B'_i–G'_i–H). Część (B'–B'_i–F_i) pola tej figury znajduje się w strefie DC4, w której występuje bezpośrednie zagrożenie życia. Wreszcie w warunkach skrajnego dyskomfortu cieplnego ($\delta = 1$) prąd rażeniowy osiągnąć może wartość I_{rm} , a ciężkość porażenia reprezentowana będzie przez pole powierzchni figury (A–B_i–G_i–H). W strefie DC4 znajduje się wówczas zbiór punktów powierzchni wyznaczonej punktami D–E–F.

Z rozważań powyższych wynika, że w miarę pogarszania się warunków środowiskowych (wzrostu wartości wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ) rośnie pole powierzchni figury skojarzonej z ciężkością porażenia. Wskaźnik przyrostu ciężkości porażenia związany z pogorszeniem warunków środowiskowych można zatem zdefiniować jako stosunek pola powierzchni $S(\delta_i)$ figury odpowiadającej określonej wartości wskaźnika dyskomfortu cieplnego δ_i , do pola powierzchni $S(\delta = -0,26)$ figury odpowiadającej normalnym warunkom środowiskowym ($\delta = -0,26$):

$$\Delta S = \frac{S(\delta_i)}{S(\delta = -0,26)} = \frac{\int_{I_{rs}}^{I_{rn}} (t_{rd} - b(I_r)) d(I_r)}{\int_{I_{rs}}^{I_{rn}} (t_{rd} - b(I_r)) d(I_r)} \quad (5.43)$$

gdzie

I_{rs} – dolna granica całkowania równa minimalnemu prądowi samouwolnienia wynikającemu z krzywej b ($I_{rs} = 25$ mA),

t_{rd} – równanie prostej określającej dopuszczalny czas działania prądu rażeniowego (równy umownej wartości 5s dla przypadku z rys. 5.46a i równy czasowi samoczynnego wyłączenia zasilania t_{rd1} dla przypadku z rys. 5.46b),

$b(I_r)$ – równanie krzywej ograniczającej strefę DC3 z lewej strony, przy czym dla przypadku z rys. 5.46b, dla prądów przekraczających wartość 200 mA przyjęto stałą wartość czasu równą 10 ms.

I_{rn} – prąd rażeniowy odpowiadający warunkom środowiskowym normalnym, por. wzór (5.41).

Część pola figury odpowiadającej zwiększonej ciężkości porażenia znajduje się w strefie DC3 (kolor żółty), natomiast druga część w strefie DC4 wskazującej na możliwość wystąpienia fibrylacji komór serca (kolor czerwony).

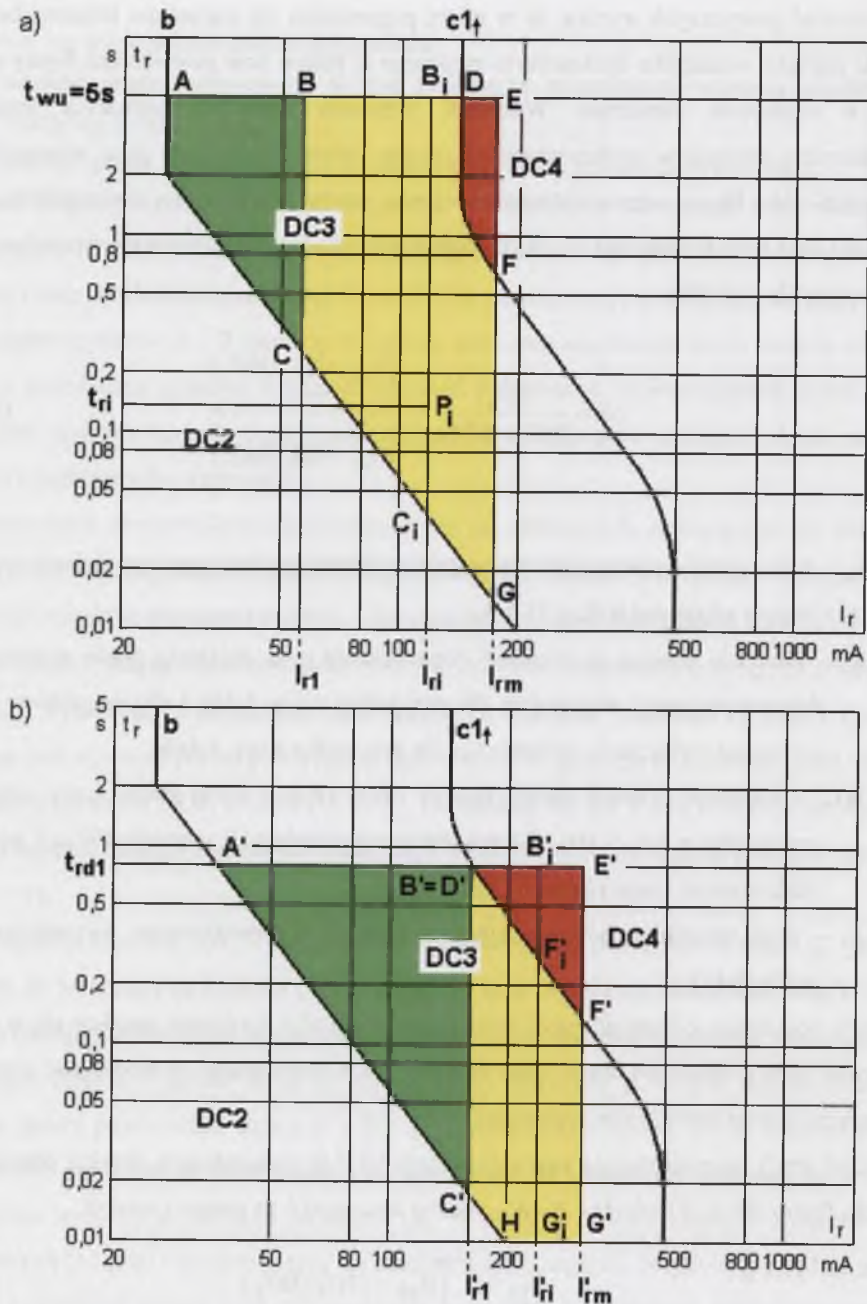
Udział strefy bezpośredniego zagrożenia życia DC4 w zwiększonym ryzyku, odpowiadający polu figury (D–E–F) lub (D'–E'–F'), można wyznaczyć za pomocą wzoru:

$$S_{zz} = \int_{I_{re1min}}^{I_{rm}} (t_{rd} - c_1(I_r)) d(I_r) \quad (5.44)$$

w którym

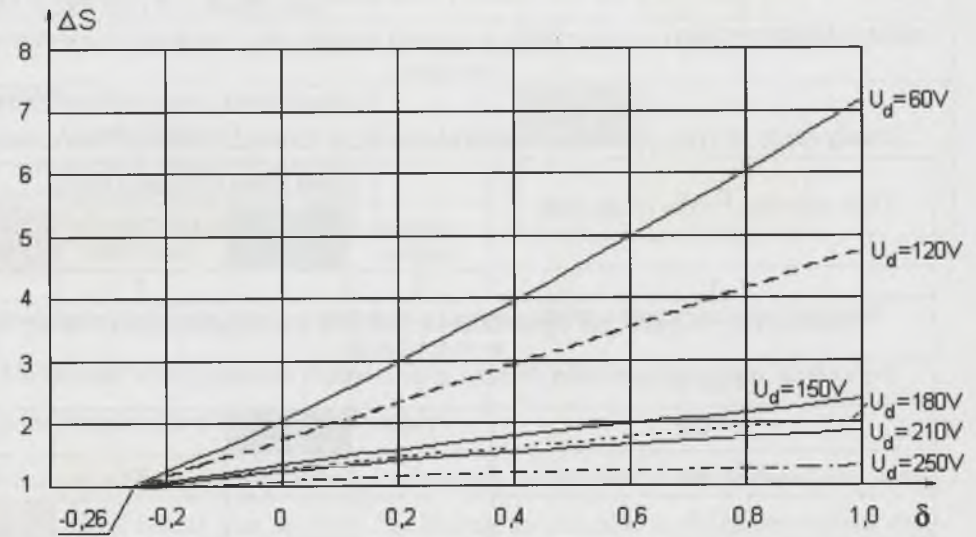
I_{re1min} – wartość minimalnego prądu niefibrylującego (wg krzywej c_1) w przypadku z rys. 5.46a oraz prądu I_{r1} w przypadku z rys. 5.46b,

$c_1(I_r)$ – równanie krzywej ograniczającej strefę DC4 z lewej strony (krzywa prądów niefibrylujących).



Rys. 5.46. Ilustracja graficzna sposobu określania wzrostu ryzyka spowodowanego obniżeniem rezystancji ciała człowieka pracującego w warunkach zwiększonego dyskomfortu cieplnego przy stałej wartości napięcia dotykowego
 Fig. 5.46. Graphic representation of determining increased risk related to reduced resistance of human body working in the conditions of increased thermal discomfort at constant value of the voltage touch

Ponieważ równania krzywych $b(I_r)$ i $c1(I_r)$ we wzorach (5.43) i (5.44) nie są określone analitycznie, za najbardziej efektywną metodę całkowania należy uznać całkowanie numeryczne z wykorzystaniem reguły trapezów. Trzeba zauważyć, że na rys. 5.46 użyto współrzędnych logarytmicznych, w związku z czym przed całkowaniem wygodniej jest zmienić współrzędne na liniowe.



Rys. 5.47. Wzrost ryzyka porażenia prądem elektrycznym przy wzroście wskaźnika dyskomfortu cieplnego ponad wartość $\delta = -0,26$
 Fig. 5.47. Increased risk of electric shock with the values of thermal coefficient exceeding: $\delta = -0,26$

Na rys. 5.47 przedstawiono wyniki stosownych obliczeń (wykonanych z wykorzystaniem arkusza kalkulacyjnego Excel) jako próbę ilościowego przedstawienia wzrostu możliwej ciężkości porażenia (a tym samym i ryzyka) związanego ze zmianą warunków środowiskowych przy stałej wartości napięcia dotykowego. Zwraca uwagę bardzo znaczny (kilkakrotny) wzrost obszaru niebezpiecznych skutków rażenia prądem elektrycznym przy pogarszających się warunkach środowiskowych ($\delta > 0,4$) w przypadku napięć dotykowych uznawanych za dopuszczalne (60 V i 120 V). Wskazuje to jednoznacznie na potrzebę uwzględniania warunków środowiskowych przy ustalaniu kryteriów działania dodatkowych środków ochrony przeciwporażeniowej. Wpływ środowiska na skutki rażenia przy napięciach dotykowych o wyższych wartościach ($U_d \geq 150V$) jest znacznie mniejszy. Wynika to stąd, że zmniejszenie rezystancji ciała pod wpływem warunków środowiskowych przy wyższych wartościach na-

pięcia dotykowego jest niewielkie (por. tablice 5.3 do 5.8), a duża wartość prądu rażeniowego nawet w sytuacji komfortu cieplnego powoduje poważne skutki.

Wobec braku w dokumentach normalizacyjnych jednoznacznego ilościowego ujęcia wpływu warunków środowiskowych na rezystancję ciała człowieka [97] i jednocześnie świadomość istotnego znaczenia warunków środowiskowych przy wyborze środków ochrony [4], zaproponowano ujęte w tablicy 5.11 zasady oceny, dostosowując je do przyjętego w poprzednich rozdziałach wzorca.

Tablica 5.11

Zasady oceny wpływu warunków środowiskowych na zmiany rezystancji ciała człowieka

Opis czynnika ryzyka i jego stanu	Ocena stanu czynnika ryzyka:			
	najlepszy możliwy	zalecany	najgorszy dopuszczalny	niedopuszczalnie zły
1	2	3	4	5
Wartości wskaźnika dyskomfortu cieplnego w wytypowanych miejscach pomiarowych w wyrobiskach				
$\delta = 0$ lub $\delta < 0$	X			
$\delta < 0,8$		X		
$0,8 \leq \delta < 1$			X	
$\delta \geq 1$				X
Wartości wskaźnika dyskomfortu cieplnego w miejscach pracy urządzeń elektrycznych				
$\delta = 0$ lub $\delta < 0$	X			
$\delta < 0,8$		X		
$0,8 \leq \delta < 1$			X	
$\delta \geq 1$				X
Brak pomiarów wskaźnika dyskomfortu cieplnego w miejscach pracy urządzeń elektrycznych				X
Dodatkowe czynniki opisujące pracę elektryka lub/i stan urządzenia elektrycznego				
Wykonywanie prac przy urządzeniach znajdujących się częściowo pod napięciem w pomieszczeniu o wskaźniku dyskomfortu cieplnego:	$\delta = 0$ lub $\delta < 0$		X	
	$\delta < 0,8$			X
	$\delta \geq 0,8$			X

cd. tablicy 5.11

1	2	3	4	5	6
Wdrożone procedury oceny wpływu urządzeń elektrycznych na mikroklimat miejsca pracy elektryka i rezystancję ciała			X		
Brak procedur oceny wpływu urządzeń elektrycznych na mikroklimat miejsca pracy elektryka i rezystancję ciała				X	
Przewidywany charakter i czas pracy w miejscu o niekorzystnym wskaźniku dyskomfortu cieplnego					
Prace nieskomplikowane, krótkotrwałe (do ok.30 minut)			X		
Prace wymagające wykonywania prób i pomiarów lub precyzyjnych zabiegów monterskich, trwające ponad 30 minut				X	

5.7. Wpływ drogi przepływu prądu rażeniowego na stopień porażenia

5.7.1. Możliwości występowania różnych dróg rażenia podczas wypadków powstałych przy urządzeniach trakcji elektrycznej

Analiza wypadków powstałych przy urządzeniach trakcji elektrycznej przewodowej w warunkach podziemi kopalń (por. tablica 5.1) wskazuje na stosunkowo dużą różnorodność dróg przepływu prądu rażeniowego. Najczęściej wprawdzie obwód prądu rażeniowego wyznaczony jest przez dłonie i stopy, ale w ok. 62% wypadków punktem wpływu (lub wypływu) prądu były inne miejsca ciała, takie jak: głowa, szyja, kark, bark, ramię, przedramię, biodro. Rozpatrując możliwości powstania różnych dróg rozprzężenia prądu rażeniowego, w wypadkach wyróżnić można dwie zasadnicze grupy:

- wypadki powstałe podczas obsługi różnych urządzeń trakcji elektrycznej, dotyczące przede wszystkim elektryków,
- wypadki pozostałe, do których dochodzi przypadkowo w wyniku świadomego lub nieświadomego nieostrożnego kontaktowania się z urządzeniami trakcji elektrycznej; ulegają nim przede wszystkim osoby spoza ruchu elektrycznego.

W pierwszej grupie czynnikami decydującymi o drodze rażenia są:

- rodzaj wykonywanej pracy,
- sposób posadowienia obsługiwanego urządzenia i ergonomiczność wybranych elementów jego konstrukcji,
- wymiary urządzenia i pomieszczenia (wyrobiska), w którym to urządzenie jest zainstalowane, odniesione do zasięgu ręki,

- obecność w miejscu zainstalowania urządzenia innych urządzeń elektrycznych oraz części przewodzących obcych,
- wykonywanie pracy w niekompletnej, wilgotnej lub uszkodzonej odzieży roboczej.

Większość tych czynników należy uznać za sprzyjające zróżnicowaniu możliwych dróg rażenia. W szczególności dotyczy to wymiarów urządzeń w odniesieniu do wymiarów wyrobisk (powszechnie występująca ciasnota miejsca pracy) i obecności w strefie zasięgu ręki różnorodnych urządzeń elektrycznych oraz części przewodzących obcych. Czynnikiem specyficznym, zwiększającym prawdopodobieństwo wystąpienia niekorzystnych dróg przepływu prądu rażeniowego, jest obecność szyn jezdnych (części czynnych) i znacznych trudności w dokładnym odizolowaniu tych szyn od części przewodzących obcych.

W drugiej grupie wypadków zbiór punktów ciała człowieka stanowiących potencjalne punkty wpływu i wypływu prądu rażeniowego (a więc i możliwych dróg rażenia) jest jeszcze większy. Głównymi czynnikami decydującymi są niefrasobliwość i nieprzestrzeganie podstawowych reguł bezpiecznej pracy, a nawet poruszania się w wyrobiskach z nisko zawieszonymi elementami sieci górnej.

Elektromonterzy obsługujący urządzenia elektryczne, a także osoby spoza ruchu elektrycznego, kontaktujące się z urządzeniami elektrycznymi przypadkowo, zmuszone są niejednokrotnie do wykonywania prac w pozycji sprzyjającej niespodziewanemu dotknięciu urządzenia elektrycznego lub elementów sieci trakcyjnej. Upoważnia to do przyjęcia założenia, że podczas wypadków elektrycznych prąd rażeniowy płynąć może pomiędzy dwoma dowolnymi, przypadkowo skojarzonymi punktami ciała. Niezbędne staje się wobec tego podjęcie problemu wpływu drogi rażenia na jego skutki i to w zakresie szerszym niż w istniejących dokumentach normalizacyjnych [np. 73] i opracowaniach monograficznych [np. 60].

5.7.2. Zasady oceny skutków porażenia prądami płynącymi różnymi drogami

Spośród możliwych sposobów oddziaływania prądu elektrycznego na organizm człowieka wyróżnić należy trzy zasadnicze:

- a) działanie na układ krążenia,
- b) działanie na układ nerwowy i tkankę wewnętrzną,
- c) działanie cieplne.

Intensywność każdego z nich zależy w znacznej mierze od drogi przepływu prądu rażeniowego. Najszerzej znane i traktowane jako najbardziej wiarygodne ustalenia kryterialne, przedstawione w raporcie nr 479-1 Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej [73], dotyczą przypadku przepływu prądu rażeniowego pomiędzy lewą dłonią i obydwoma stopami,

przy czym w przypadku prądu rażeniowego stałego przyjęto umowny kierunek od stóp do lewej dłoni (prąd płynący w górę, prąd wstępujący). Drogi te można zatem potraktować jako drogi odniesienia.

Przy rozpatrywaniu innych dróg rażenia wyróżniono następujące, najbardziej charakterystyczne punkty możliwego zetknięcia się człowieka z obwodem elektrycznym: **G** – głowa, **Dp** – dłoń prawa, **DI** – dłoń lewa, **DD** – obydwie dłonie, **Kp** – klatka piersiowa, **P** – plecy, **SI** – stopa lewa, **Sp** – stopa prawa, **SS** – obydwie stopy. W ramach analizy ryzyka istnieje zatem potrzeba oceny skutków, jakie wywołują prądy rażeniowe płynące tymi drogami.

W odniesieniu do oddziaływania prądu elektrycznego na układ krążenia (możliwość wywołania migotania komór serca), raport IEC [72] podaje przybliżony sposób przeliczania prądów określonych dla drogi lewa dłoń – stopy (**DI** – **SS**) na wartości prądów płynących innymi drogami, powodujące takie same skutki, wg wzoru:

$$I_{r(A-B)} \cdot F_{(A-B)} = I_{r(DI-SS)} \quad (5.45)$$

w którym

$I_{r(A-B)}$ – prąd rażeniowy płynący dowolną drogą (od punktu A do punktu B),

$I_{r(DI-SS)}$ – prąd rażeniowy płynący od lewej dłoni do obydwu stóp, $F_{(A-B)}$ – współczynnik prądu serca uwzględniający rozptył prądu rażeniowego w organizmie i działanie tej jego części, która przepływa w okolicy serca.

Wartości współczynników prądu serca określone w raporcie IEC [73] zestawiono w tabeli 5.12, w polach wyróżnionych. Z tabeli 5.12 wynika, że wartości współczynników prądu serca ustalone są jedynie w odniesieniu do ok. 30% możliwych dróg rażenia. W pozostałych przypadkach (w polach niezacieniowanych) wartości współczynników serca zaproponowano kierując się następującymi założeniami:

- a) Najbardziej niebezpieczną drogą prądu rażeniowego, pod względem możliwości wywołania fibrylacji komór serca, jest droga od klatki piersiowej do lewej dłoni (**Kp** – **DI**); współczynnik prądu serca wynosi wówczas $F_{(Kp-DI)} = 1,5$. W przypadku przepływu prądu rażeniowego od klatki piersiowej do obydwu dłoni (**Kp** – **DD**), działaniem prądu dotknięta jest również ta sama droga i działanie na układ krążenia jest równoważne.
- b) Działanie prądu rażeniowego płynącego od kończyn dolnych do klatki piersiowej jest równoważne działaniu na drodze od kończyn dolnych do lewej dłoni.
- c) Skutki przepływu prądu rażeniowego od klatki piersiowej do pleców (**Kp** – **P**) są równoważne ze skutkami na drodze od klatki piersiowej do dłoni prawej (**Kp** – **Dp**).

- d) Skutki prądu rażeniowego płynącego przez obydwie ręce są równoważne skutkom przepływu przez rękę lewą (warunek bardziej niebezpieczny).

Tablica 5.12

Współczynnik prądu serca przy rażeniach prądem stałym $F_{d.c.}$

B\A	G+	DI+	Kp+	SI+	DD+	SS+	Sp+	P+	Dp+
G	0	1,5	1,5	0,8	1,5	0,8	0,8	0,8	1,3
DI	1,5	0	1,5	1	0	1	1	0,7	0,25
Kp	1,5	1,5	0	1	1,5	1	1	1,3	1,3
SI	0,4	0,5	0,5	0	0,5	0	0	0,4	0,4
DD	1,5	0	1,5	1	0	1	1	0,7	0
SS	0,4	0,5	0,5	0	0,5	0	0	0,4	0,4
Sp	0,4	0,5	0,5	0	0,5	0	0	0,4	0,4
P	0,8	0,7	1,3	0,8	0,7	0,8	0,8	0	0,3
Dp	1,3	0,25	1,3	0,8	0	0,8	0,8	0,3	0

Uwagi: wg IEC 479, wskaźnik odniesienia

Remarks: acc.: IEC 479, relative path

- e) Skutki prądu rażeniowego płynącego od kończyn dolnych do pleców są równoważne skutkom przepływu od kończyn dolnych do dłoni prawej,
- f) Skutki prądu rażeniowego płynącego od kończyn dolnych i pleców do głowy są równoważne skutkom przepływu od kończyn dolnych do pleców,
- g) Skutki prądu rażeniowego płynącego od klatki piersiowej i kończyn górnych do głowy są równoważne skutkom przepływu prądu od klatki piersiowej do kończyn górnych,
- h) Skutki prądu rażeniowego stałego zstępującego (płynącego w dół) są równoważne skutkom przepływu prądu wstępującego (płynącego w górę) o wartości ok. dwukrotnie mniejszej, co wyrazić można wzorem:

$$I_r^\downarrow \cdot 0,5 = I_r^\uparrow, \quad (5.46)$$

przy czym rozróżnianie prądu wstępującego i zstępującego dotyczy tylko tych dróg, które obejmują klatkę piersiową, tułów i kończyny dolne.

- i) Prąd rażeniowy stały płynący poprzecznie (DI – Dp) może wywołać migotanie komór serca w zasadzie tylko przy większych wartościach [43, 61, 73]; przyjęto, że jest to war-

tość dwukrotnie większa od prądu wzdłużnego zstępującego, czyli czterokrotnie większa od prądu wzdłużnego wstępującego, zgodnie z wyrażeniem:

$$I_r^{\leftrightarrow} \cdot 0,25 = I_r^\downarrow \cdot 0,5 = I_r^\uparrow \quad (5.47)$$

Istota destruktywnego działania prądu elektrycznego na układ nerwowy jest ciągle jeszcze niedostatecznie poznana. Świadczyć o tym może między innymi brak jednoznacznego ustalenia wartości kryterialnych i równocześnie, wyniki badań świadczące o szczególnej roli układu nerwowego w rozplywie prądu rażeniowego, a także o możliwości uszkodzania neuronów pod wpływem przepływu prądu. Oddziaływanie na układ nerwowy prowadzić może do śmiertelnych porażień w wyniku zakłócenia bioautomatycznych systemów i procesów regulacji organizmu; fibrylację komór serca (jeśli w ogóle wystąpi) można wówczas traktować jako zjawisko wtórne, inicjowane porażeniem układu nerwowego [60]. Brak jakichkolwiek ustaleń ilościowych utrudnia jednoznaczne określenie wpływu drogi przepływu prądu na stopień porażenia układu nerwowego. Można jedynie dokonać próby hipotetycznego założenia, że skutki uszkodzeń układu nerwowego zależne będą od rozległości drogi przepływu prądu rażeniowego z zaakcentowaniem okolic zawierających organy o szczególnym znaczeniu (np. głowa, klatka piersiowa). Rozległość drogi, wynikająca m.in. z odległości między punktami wpływu i wypływu prądu rażeniowego, ma również znaczenie przy uwzględnianiu działania prądu elektrycznego na tkankę wewnętrzną. Wielkością najlepiej charakteryzującą wrażliwość na działanie prądu elektrycznego przepływającego przez ciało jest natężenie pola elektrycznego [60].

Korzystając zatem z całkowitej postaci prawa Ohma w polu przepływowym [42]:

$$\int_A^B \vec{E}_{wewn} dl \approx I_r \int_A^B \frac{dl}{\gamma \cdot s} = \Delta U_{A-B} \quad (5.48)$$

w której

\vec{E}_{wewn} – natężenie wewnętrznego pola elektrycznego wzdłuż drogi rażenia od punktu wpływu prądu rażeniowego A do punktu jego wypływu B,

I_r – prąd rażeniowy,

γ, s – konduktywność i przekrój tkanki, przez którą przepływa prąd rażeniowy,

można przyjąć założenie, że rozległości drogi przepływu prądu pomiędzy punktami A i B odpowiada spadkowi napięcia pomiędzy tymi punktami, ΔU_{A-B} .

Działanie ciepłne prądu rażeniowego wynika z kolei ze strat mocy w polu prądu elektrycznego (wzdłuż drogi rażenia) w złożonym, niejednorodnym przewodniku, jakim jest ciało człowieka. Gęstość przestrzenna mocy wynika z prawa Joule'a w postaci różniczkowej [42]:

$$\lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{J_r^2}{\gamma_c} \quad (5.49)$$

w której

J_r – gęstość prądu rażeniowego,

γ_c – konduktywność ciała.

Całkując wyrażenie (5.489 po całej objętości ciała otrzymamy wydzieloną w organizmie moc cieplną:

$$P = \int_V \frac{J_c^2}{\gamma_c} dV \quad (5.50)$$

Ze względu na niejednorodność i zmieniający się, skomplikowany przekrój ciała wzdłuż drogi przepływu prądu rażeniowego, niezbędne są założenia upraszczające, pozwalające określić zjawiska ciepłne w organizmie w sposób przybliżony. Drogę przepływu prądu rażeniowego można podzielić na odcinki, których przekrój s_i jest w przybliżeniu stały. Dla tych odcinków można napisać:

$$dV_i = s_i \cdot dl \quad \text{oraz} \quad J_{ri} = \frac{I_r}{s_i} \quad (5.51)$$

Po podstawieniu (5.51) do (5.50) otrzymamy prawo Joule'a w postaci całkowej określającej moc cieplną wydzieloną na i -tym odcinku drogi rażenia:

$$P_i = I_r^2 \int_{A_i}^{B_i} \frac{dl}{\gamma_{ci} \cdot s_i} \quad (5.52)$$

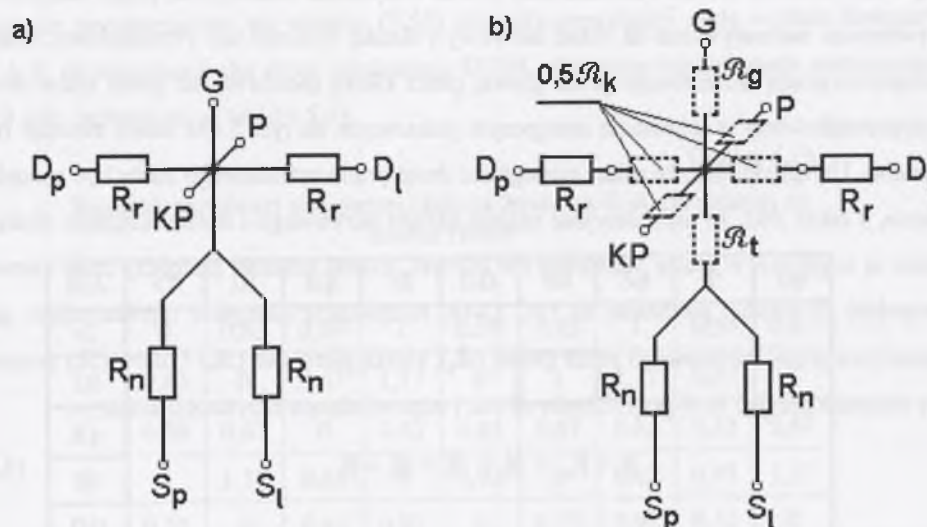
gdzie

A_i, B_i – początek i koniec i -tego odcinka drogi rażenia, na której można przyjąć stały przekrój.

Całkowita moc wydzielona przez prąd rażeniowy płynący od punktu A (punkt wpływu prądu rażeniowego do ciała) do punktu B (punkt wypływu prądu z ciała) będzie sumą mocy na poszczególnych odcinkach:

$$P_{A-B} = I_r^2 \cdot \sum_A^B \int_{A_i}^{B_i} \frac{dl}{\gamma_{ci} \cdot s_i} \quad (5.53)$$

Całki oznaczone występujące we wzorach (5.52) i (5.53) przedstawiają rezystancje poszczególnych odcinków ciała, przez które płynie prąd rażeniowy.



Rys. 5.48. Uproszczone schematy zastępcze ciała człowieka stosowane do określania rezystancji zastępczej i skutków prądu rażeniowego płynącego różnymi drogami:

a) schemat pomijający rezystancję głowy, tułowia i klatki piersiowej, b) proponowany uzupełniony schemat zastępczy. R_r – rezystancja jednej ręki, R_n – rezystancja jednej nogi, R_g – rezystancja zastępcza reprezentująca skutki przepływu prądu rażeniowego przez głowę, R_t – rezystancja zastępcza reprezentująca skutki przepływu prądu rażeniowego przez tułów, R_k – rezystancja zastępcza reprezentująca skutki przepływu prądu rażeniowego przez klatkę piersiową

Fig. 5.48. Simplified equivalent circuit diagrams of the human body used for the designation of equivalent resistance and the consequences of electric shock from shock currents passing through different paths: a) diagram ignoring the resistance of human head, torso and chest, b) proposal of the improved equivalent diagram. R_r – resistance of one hand, R_n – resistance of one leg, R_g – equivalent resistance representing the consequences of the passage of shock current through the human head, R_t – equivalent resistance representing the consequences of the passage of shock current through the torso, R_k – equivalent resistance representing the consequences of the passage of shock current through the chest

Drogi przepływu prądu rażeniowego w sposób zastępczy można scharakteryzować rezystancjami poszczególnych odcinków. Kierując się ustaleniami IEC [73], można przyjąć najprostszy elektryczny schemat zastępczy ciała człowieka w postaci przedstawionej na rys. 5.48a.

Wykorzystuje się go do obliczeń przybliżonych wartości prądów rażeniowych płynących różnymi drogami, przyjmując założenie, że rezystancje kończyn są w przybliżeniu równe ($R_r \approx R_n$). Schemat ten nie odzwierciedla jednak wszystkich oddziaływań prądu rażeniowego, a zwłaszcza oddziaływania na układ nerwowy i tkankę wewnętrzną. Przykładowo, skutkom przepływu prądu rażeniowego przez głowę, przez klatkę piersiową lub przez tułów nie jest przyporządkowany w schemacie zastępczym pokazanym na rys. 5.48a żaden element (rezystancja). Uwzględniając, że miarą rozległości drogi prądu rażeniowego może być spadek napięcia, a także fakt, że najważniejsze organy układu nerwowego i układu krążenia zlokalizowane są w głowie, w klatce piersiowej i w tułowiu, można schemat zastępczy ciała człowieka uzupełnić do postaci pokazanej na rys. 5.48b. Rezystancje zastępcze reprezentujące skutki przepływu prądu rażeniowego przez głowę (R_g), klatkę piersiową (R_k) i tułów (R_t) proponuje się wstępnie przyjąć za w przybliżeniu równe i odpowiadające rezystancji kończyn:

$$R_r \approx R_n \approx R_g \approx R_k \approx R_t \approx R \quad (5.54)$$

Rezystancję zastępczą reprezentującą skutki przepływu prądu rażeniowego przez klatkę piersiową rozdzielono po połowie w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach, tak aby schemat zastępczy mógł również odzwierciedlać działanie prądu rażeniowego płynącego od klatki piersiowej do pleców oraz do ramion. W celu podkreślenia, że wprowadzone rezystancje zastępcze reprezentujące skutki przepływu prądu rażeniowego przez głowę, klatkę piersiową i tułów nie odpowiadają rzeczywistym fizycznym rezystancjom tych elementów ciała, zaznaczono je inną czcionką.

5.7.3. Umowne wskaźniki równoważności skutków przepływu prądu rażeniowego stalego różnymi drogami

Traktując drogę rażenia od obydwu stóp do lewej dłoni jako drogę odniesienia, stopień porażenia przy innej drodze prądu rażeniowego, lecz tej samej wartości napięcia dotykowego ocenić można umownie wprowadzając zastępcze wskaźniki równoważności poszczególnych oddziaływań, wzorowane na współczynniku prądu serca.

Wskaźnik charakteryzujący równoważność działania prądu rażeniowego na układ krążenia przy takiej samej wartości napięcia dotykowego wyznaczyć można z wyrażenia [24]:

$$F_{F(A-B)} = F_{(A-B)} \cdot \frac{R_{z(A-B)}}{R_{z(DI-SS)}} \quad (5.55)$$

w którym

$F_{(A-B)}$ – współczynnik prądu serca,

$R_{z(A-B)}$, i $R_{z(DI-SS)}$ – rezystancje ciała pomiędzy dowolnymi punktami A-B oraz od lewej dłoni do obydwu stóp.

Wartości występującego we wzorze (5.55) stosunku rezystancji ciała wzdłuż dowolnej drogi A-B do rezystancji dla drogi odniesienia DI-SS, obliczone wg schematu zastępczego z rys. 5.48b, zestawiono w tabelicy 5.13.

Tabela 5.13

Stosunek zastępczej rezystancji ciała na drodze A-B do rezystancji na drodze DI-SS

B \ A	G	DI	Kp	SI	DD	SS	Sp	P	Dp
G	0	0,83	0,50	1	0,58	0,83	1	0,50	0,83
DI	0,83	0	0,67	1,17	0	1	1,17	0,67	1
Kp	0,50	0,67	0	0,83	0,42	0,67	0,83	0,33	0,67
SI	1	1,17	0,83	0	0,92	0	0,67	0,83	1,17
DD	0,58	0	0,42	0,92	0	0,75	0,92	0,42	0
SS	0,83	1	0,67	0	0,75	0	0	0,67	1
Sp	1	1,17	0,83	0,67	0,92	0	0	0,83	1,17
P	0,50	0,67	0,33	0,83	0,42	0,67	0,83	0	0,67
Dp	0,83	1	0,67	1,17	0	1	1,17	0,67	0

Obliczone wartości wskaźnika $F_{F(A-B)}$ przedstawiono w tabelicy 5.14.

Wskaźnik charakteryzujący równoważność działania prądu rażeniowego na układ nerwowy i tkankę wewnętrzną, zależny od rozległości drogi rażenia określić można, uwzględniając zależność (5.48) za pomocą wzoru:

$$F_{L(A-B)} = \frac{\sum_{DI}^{SS} I_{i-j} \cdot R_{i-j}}{\sum_A^B I_{a-b} \cdot R_{a-b}} \quad (5.56)$$

w którym i, j oraz a, b oznaczają początki i końce poszczególnych elementów schematu zastępczego ciała człowieka (rys. 5.48) odpowiednio pomiędzy punktami DI i SS oraz A i B.

Tablica 5.14

Wskaźnik $F_{F(A-B)}$ charakteryzujący równoważność działania prądu rażeniowego stałego na układ krążenia

B\A	G+	DI+	Kp+	SI+	DD+	SS+	Sp+	P+	Dp+
G	0,00	1,25	0,75	0,80	0,87	0,66	0,80	0,40	1,08
DI	1,25	0,00	1,01	1,17	0,00	1,00	1,17	0,47	0,25
Kp	0,75	1,01	0,00	0,83	0,63	0,67	0,83	0,43	0,87
SI	0,40	0,59	0,42	0,00	0,46	0,00	0,00	0,33	0,47
DD	0,87	0,00	0,63	0,92	0,00	0,75	0,92	0,29	0,00
SS	0,33	0,50	0,34	0,00	0,38	0,00	0,00	0,27	0,40
Sp	0,40	0,59	0,42	0,00	0,46	0,00	0,00	0,33	0,47
P	0,40	0,47	0,43	0,66	0,29	0,54	0,66	0,00	0,20
Dp	1,08	0,25	0,87	0,94	0,00	0,80	0,94	0,20	0,00

Przy takiej samej wartości napięcia dotykowego wywołującego porażenie wzdłuż różnych dróg, wzór (5.56) przyjmie postać:

$$F_{L(A-B)} = \frac{R_{z(A-B)} \cdot \sum_{DI}^{SS} k_{i-j} \cdot R_{i-j}}{R_{z(DI-SS)} \cdot \sum_A^B k_{a-b} \cdot R_{a-b}} \quad (5.57)$$

przy czym współczynniki $k_{i,j}$ oraz $k_{a,b}$ oznaczają stosunek prądu rażeniowego płynącego przez określony element schematu zastępczego ciała do prądu rażeniowego wpływającego do organizmu:

$$k_{a-b} = \frac{I_{a-b}}{I_{A-B}} \quad k_{i-j} = \frac{I_{i-j}}{I_{DI-SS}}, \quad (5.58)$$

Wskaźnik ten uwzględnia zarówno obszar ciała, przez który przepływa prąd rażeniowy, jak i wartość tego prądu w poszczególnych elementach schematu zastępczego ciała. Obliczone wartości wskaźnika przedstawiono w tablicy 5.15.

Wskaźnik równoważności cieplnego działania prądu rażeniowego określić można jako stosunek mocy cieplnej wydzielonej przez prąd rażeniowy na drodze standardowej (DI-SS) do mocy wydzielonej na drodze rażenia wyznaczonej dowolnymi punktami A-B:

$$F_{Q(A-B)} = \frac{I_{DI-SS}^2 \cdot R_{z(DI-SS)}}{I_{A-B}^2 \cdot R_{z(A-B)}} \quad (5.59)$$

Tablica 5.15

Wskaźnik $F_{L(A-B)}$ charakteryzujący równoważność rozległości strefy rażenia prądem płynącym różnymi drogami (od punktu A do punktu B)

B\A	G	DI	Kp	SI	DD	SS	Sp	P	Dp
G	0	1,17	1,17	1,17	0,82	0,97	1,17	1,17	1,17
DI	1,17	0	1,17	1,17	0	1	1,17	1,17	1,17
Kp	1,17	1,17	0	1,17	0,73	0,93	1,17	1,17	1,17
SI	1,17	1,17	1,17	0	0,92	0	1,17	1,17	1,17
DD	0,82	0	0,73	0,92	0	0,75	1,17	1,17	0
SS	0,97	1	0,93	0	0,75	0	0	0,93	1
Sp	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	0	0	1,17	1,17
P	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	0	1,17
Dp	1,17	1,17	1,17	1,17	0	1	1,17	1,17	0

Przy takiej samej wartości napięcia dotykowego wywołującego porażenie wzdłuż różnych dróg, wzór (5.59) przyjmie postać:

$$F_{Q(A-B)} = \frac{R_{z(A-B)}}{R_{z(DI-SS)}} \quad (5.60)$$

co oznacza, że wartości wskaźnika równoważności cieplnego oddziaływania prądu rażeniowego przepływającego wzdłuż różnych dróg odczytać można z tablicy 5.13.

Łączny efekt wszystkich trzech rodzajów oddziaływań prądu rażeniowego przy różnych drogach jego przepływu ocenić można sumując wszystkie trzy wskaźniki składowe. Wprowadzając zatem pojęcie wypadkowego wskaźnika stopnia (lub ciężkości) porażenia można wyrazić go za pomocą wzoru:

$$F_{w(A-B)} = w_F \cdot F_{F(A-B)} + w_L \cdot F_{L(A-B)} + w_Q \cdot F_{Q(A-B)} \quad (5.61)$$

w którym przez w_F , w_L i w_Q oznaczono współczynniki wagowe wskazujące, jakie oddziaływanie przeważa w powstawaniu w organizmie zjawisk stwarzających bezpośrednie zagrożenie życia. Wobec braku jednoznacznych badań ilościowych, w rozważaniach wstępnych proponuje się przyjąć przykładowo dwukrotnie wyższy udział decydującego wskaźnika. I tak, zgodnie z poglądem przypisującym podstawowe znaczenie oddziaływaniu prądu elektrycznego na układ krążenia, prowadzącemu do fibrylacji komór serca (wyrażonym między innymi w raporcie IEC 479 [73], zwiększoną wagę należałoby nadać wskaźnikowi fibrylacji F_F .

Wyrazić to można wzorem:

$$F_{w(A-B)}^F = 2 \cdot F_{F(A-B)} + F_{L(A-B)} + F_{Q(A-B)} \quad (5.62)$$

Wartości tego wskaźnika przedstawiono w tabelicy 5.16.

Tabela 5.16

Wypadkowy wskaźnik stopnia porażenia $F_{w(A-B)}^F$, charakteryzujący równoważność działania prądu rażeniowego stałego płynącego wzdłuż różnych dróg, ze szczególnym uwzględnieniem działania na układ krążenia

B\A	G+	DI+	Kp+	SI+	DD+	SS+	Sp+	P+	Dp+
G	0,00	4,49	3,17	3,77	3,14	3,13	3,77	2,47	4,16
DI	4,49	0,00	3,85	4,68	0,00	4,00	4,68	2,78	2,67
Kp	3,17	3,85	0,00	3,66	2,41	2,94	3,66	2,36	3,58
SI	2,97	3,51	2,83	0,00	2,76	0,00	1,84	2,66	3,28
DD	3,14	0,00	2,41	3,68	0,00	3,00	3,68	2,18	0,00
SS	2,46	3,00	2,27	0,00	2,25	0,00	0,00	2,14	2,80
Sp	2,97	3,51	2,83	1,84	2,76	0,00	0,00	2,66	3,28
P	2,47	2,78	2,36	3,33	2,18	2,91	3,33	0,00	2,24
Dp	4,16	2,67	3,58	4,21	0,00	3,60	4,21	2,24	0,00

Opowiadając się za poglądem o decydującym znaczeniu oddziaływania na układ nerwowy, prowadzącego do uszkodzenia neuronów i degradacji bioautomatycznych systemów i procesów regulacji organizmu (przedstawionych w roboczej hipotezie Manojłowa [60]), zwiększoną wagę należałoby przypisać wskaźnikowi F_L :

$$F_{w(A-B)}^L = F_{F(A-B)} + 2 \cdot F_{L(A-B)} + F_{Q(A-B)}, \quad (5.63)$$

którego obliczeniowe wartości zestawiono w tabelicy 5.17.

Eksponując natomiast jednocześnie oddziaływanie i na układ krążenia i na układ nerwowy (działanie cieplne wywołane samym tylko przepływem prądu rażeniowego, tzn. bez oparzeń łukiem elektrycznym, można traktować jako mniej istotne w stosunku do pozostałych) wypadkowy wskaźnik stopnia porażenia wyrażony będzie wzorem:

$$F_{w(A-B)}^{FL} = 2 \cdot F_{F(A-B)} + 2 \cdot F_{L(A-B)} + F_{Q(A-B)}, \quad (5.64)$$

a jego obliczeniowe wartości zestawiono w tabelicy 5.18.

Tabela 5.17

Wypadkowy wskaźnik stopnia porażenia $F_{w(A-B)}^L$, charakteryzujący równoważność działania prądu rażeniowego stałego płynącego wzdłuż różnych dróg, ze szczególnym uwzględnieniem działania na układ nerwowy i tkankę wewnętrzną

B\A	G+	DI+	Kp+	SI+	DD+	SS+	Sp+	P+	Dp+
G	0,00	4,42	3,59	4,14	3,09	3,43	4,14	3,24	4,25
DI	4,42	0,00	4,02	4,68	0,00	4,00	4,68	3,48	3,59
Kp	3,59	4,02	0,00	4,00	2,51	3,20	4,00	3,10	3,88
SI	3,74	4,10	3,59	0,00	3,22	0,00	3,01	3,50	3,98
DD	3,09	0,00	2,51	3,68	0,00	3,00	3,68	3,05	0,00
SS	3,10	3,50	2,87	0,00	2,63	0,00	0,00	2,80	3,40
Sp	3,74	4,10	3,59	3,01	3,22	0,00	0,00	3,50	3,98
P	3,24	3,48	3,10	3,83	3,05	3,55	3,83	0,00	3,21
Dp	4,25	3,59	3,88	4,45	0,00	3,80	4,45	3,21	0,00

Tabela 5.18

Wypadkowy wskaźnik stopnia porażenia $F_{w(A-B)}^{FL}$, charakteryzujący równoważność działania prądu rażeniowego stałego płynącego wzdłuż różnych dróg, ze szczególnym uwzględnieniem łącznego działania na układ krążenia oraz na układ nerwowy i tkankę wewnętrzną

B\A	G+	DI+	Kp+	SI+	DD+	SS+	Sp+	P+	Dp+
G	0,00	5,66	4,34	4,94	3,96	4,10	4,94	3,64	5,33
DI	5,66	0,00	5,02	5,85	0,00	5,00	5,85	3,95	3,84
Kp	4,34	5,02	0,00	4,83	3,14	3,87	4,83	3,53	4,75
SI	4,14	4,68	4,00	0,00	3,68	0,00	3,01	3,83	4,45
DD	3,96	0,00	3,14	4,60	0,00	3,75	4,60	3,35	0,00
SS	3,43	4,00	3,20	0,00	3,00	0,00	0,00	3,07	3,80
Sp	4,14	4,68	4,00	3,01	3,68	0,00	0,00	3,83	4,45
P	3,64	3,95	3,53	4,50	3,35	4,08	4,50	0,00	3,41
Dp	5,33	3,84	4,75	5,38	0,00	4,60	5,38	3,41	0,00

W celu porównania skutków porażenia wzdłuż różnych dróg w tabelicy 5.19 przedstawiono dodatkowo względne wartości wypadkowych wskaźników odniesione do drogi lewa dłoń-obydwie stopy (DI-SS), obliczone wg wzoru:

$$\underline{F}_{w(A-B)}^i = \frac{F_{w(A-B)}^i}{F_{w(DI-SS)}^i} \quad (5.65)$$

Tablica 5.19

Względne wartości wypadkowych wskaźników stopnia porażenia prądem stałym (d.c.) płynącym wzdłuż wybranych dróg A-B

A-B	SS-Dp (Dp-SS)	Dp-SI,p (SI,p-Dp)	Dp-DI (DI-Dp)	Dp-Kp (Kp-Dp)	DI-Kp (Kp-DI)	DI-SI,p (SI,p-DI)	SS-DD (DD-SS)	DD-Kp (Kp-DD)	G-Kp (Kp-G)
$\underline{F}_{w(A-B)}$	0,933 (0,960)	0,937 (1,093)	0,807 (0,968)	0,903 (1,084)	0,950 (1,140)	0,977 (1,170)	0,750 (0,752)	0,593 (0,712)	0,807 (0,968)
$\underline{F}_{w(A-B)}^F$	0,900 (0,933)	0,820 (1,053)	0,668 (0,890)	0,895 (1,193)	0,963 (1,283)	0,878 (1,170)	0,750 (0,750)	0,603 (0,803)	0,793 (1,057)
$\underline{F}_{w(A-B)}^L$	0,950 (0,971)	0,995 (1,113)	0,898 (1,026)	0,970 (1,109)	1,005 (1,149)	1,025 (1,170)	0,750 (0,751)	0,628 (0,717)	0,898 (1,026)
$\underline{F}_{w(A-B)}^{FL}$	0,920 (0,950)	0,890 (1,076)	0,768 (0,960)	0,950 (1,188)	1,000 (1,255)	0,936 (1,170)	0,750 (0,750)	0,628 (0,785)	0,868 (1,085)

Dodatkowo, w tablicy 5.19 przedstawiono wartości wskaźnika $\underline{F}_{w(A-B)}$ obliczone przy założeniu, że współczynniki wagowe we wzorze (5.61) równe są jeden.

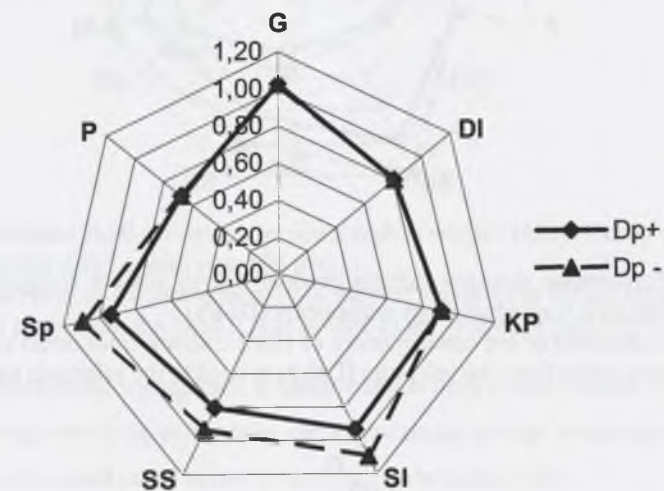
Przedstawione w rozdz. 5.7.2 i 5.7.3 zasady określania wypadkowych wskaźników stopnia porażenia prądem elektrycznym płynącym wzdłuż różnych dróg oparte są na znanych z literatury stwierdzeniach wynikających z mniej lub bardziej licznych badań przeprowadzanych na ludziach i zwierzętach, a także na analizie wypadków elektrycznych. Zaproponowane wskaźniki mogą być wykorzystane jedynie do umownej oceny skutków rażenia, a ich wartości zwracają uwagę na istotne zjawiska, które mogą towarzyszyć rażeniu prądem elektrycznym przepływającym wzdłuż różnych dróg. Ze względu na specyfikę przedmiotu i metody badań, nie przewiduje się bezpośredniego doświadczalnego weryfikowania ich słuszności. Mimo to celowość opracowania takich wskaźników należy uznać za bezsporną w kontekście konieczności ilościowej oceny ryzyka w systemie zarządzania bezpieczeństwem.

Cztery rodzaje wskaźników (F_w , F_w^F , F_w^L , F_w^{FL}) umożliwiają szczególne uwzględnianie różnorodnych oddziaływań prądu na organizm. Względne wartości wskaźników zestawione w tablicy 5.19 wskazują na dwie cechy charakterystyczne:

- wartości poszczególnych wskaźników odpowiadających określonej drodze rażenia różnią się stosunkowo niewiele; jest to argument potwierdzający słuszność zaproponowanego sumarycznego uwzględniania wszystkich możliwych skutków rażenia,

- największe wartości wskaźników (a więc i najbardziej niebezpieczne skutki rażenia) dotyczą przepływu prądu rażeniowego od lewej dłoni do jednej ze stóp oraz od lewej lub prawej dłoni do klatki piersiowej.

Graficzne porównanie względnych wartości umownych wypadkowych wskaźników stopnia porażenia prądem stałym płynącym wzdłuż wybranych dróg obliczonych względem drogi odniesienia DI-SS przedstawiono na rysunkach 5.49 do 5.52.

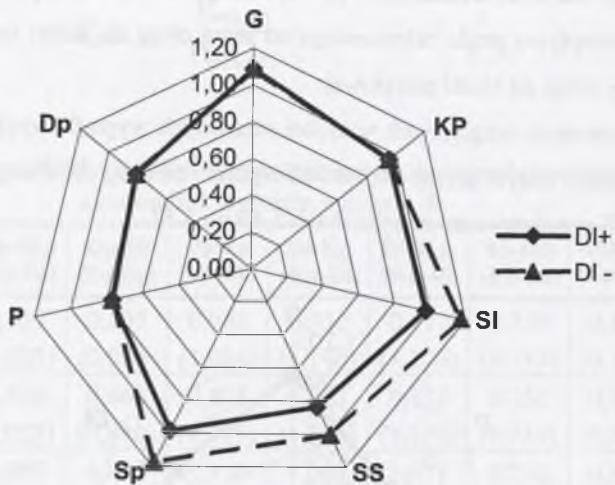


Rys. 5.49. Porównanie skutków rażenia prądem stałym wzdłuż różnych dróg od prawej dłoni (Dp) względem drogi odniesienia (DI-SS)

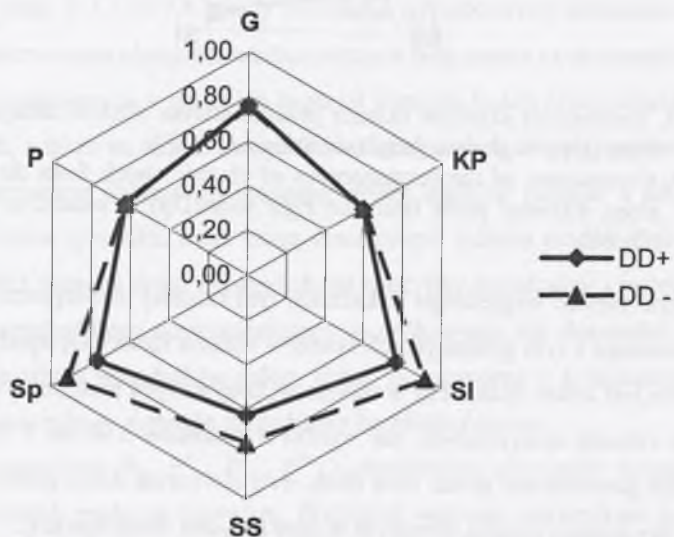
Fig. 5.49. Comparison of the consequences of electric shock from direct current passing along different paths from the right palm (Dp) as related to the reference path (DI-SS)

Im większa wartość względnego wskaźnika, tym bardziej niebezpieczna droga przepływu prądu rażeniowego i tym groźniejszych skutków rażenia należy się spodziewać. W analizie ryzyka istotna jest zatem ocena, czy w trakcie wykonywanych prac przewiduje się możliwość wystąpienia sytuacji sprzyjających, jak wynika z rysunków 5.49 do 5.52, dotykowi bezpośredniemu lub pośredniemu przez: lewą dłoń, lewą lub prawą stopę, głowę i klatkę piersiową, zwłaszcza przy prądzie rażenia płynącym w górę (prądzie wstępującym).

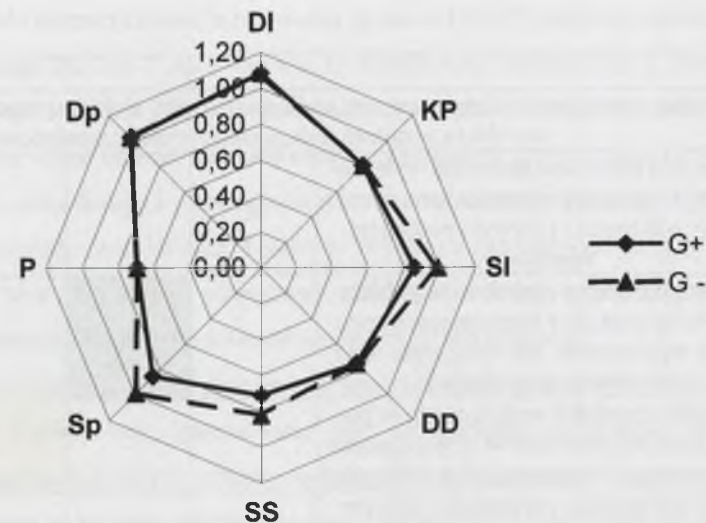
Zbiór potencjalnych sytuacji wypadkowych przy urządzeniach trakcyjnej elektrycznej dołowej może być bardzo obszerny i bardzo trudno byłoby określić ilościowo prawdopodobieństwo rażenia wzdłuż konkretnych dróg sprzyjających najpoważniejszym skutkom. Dlatego też celowe jest dokonanie przynajmniej oceny warunków sprzyjających powstawaniu zróżnicowanych dróg rażenia.



Rys. 5.50. Porównanie skutków rażenia prądem stałym wzdłuż różnych dróg od lewej dłoni (DI) względem drogi odniesienia (DI-SS)
 Fig. 5.50. Comparison of the consequences of electric shock from direct current along different paths from the left palm (Dp) as related to the reference path (DI-SS)



Rys. 5.51. Porównanie skutków rażenia prądem stałym wzdłuż różnych dróg od obydwu dłoni (DD) względem drogi odniesienia (DI-SS)
 Fig. 5.51. Comparison of the consequences of electric shock from direct current along different paths from the both palms (DD) as related to the reference path (DI-SS)



Rys. 5.52. Porównanie skutków rażenia prądem stałym wzdłuż różnych dróg od głowy (G) względem drogi odniesienia (DI-SS)
 Fig. 5.52. Comparison of the consequences of electric shock from direct current along different paths from the head (G) as related to the reference path (DI-SS)

Dopuszczenie możliwości wystąpienia zróżnicowanych dróg rażenia należy traktować jako równoznaczne wystąpieniu dróg najbardziej niebezpiecznych, a więc sprzyjające powiększeniu ryzyka. Propozycje zasad takiej oceny przedstawiono w tabelicy 5.20.

Tablica 5.20

Zasady oceny możliwości wystąpienia zróżnicowanych dróg rażenia prądem elektrycznym od urządzeń trakcyjnej elektrycznej dołowej

Opis czynnika ryzyka i jego stanu	Ocena stanu czynnika ryzyka:			
	najlepszy możliwy	zalecany	najgorszy dopuszczalny	niedopuszczalnie zły
1	2	3	4	5
Ergonomiczne cechy miejsca pracy elektromonterów obsługujących urządzenia trakcyjnej elektrycznej przewodowej				
Wymiary urządzenia i miejsca pracy pozwalają na swobodne wykonywanie wszystkich czynności	X	-	-	-
Spełnione wymagania minimalnych odstępów (jeżeli takie zostały ustalone)	-	X	-	-
Doraźne wykonywanie niektórych czynności w nietypowej pozycji	-	-	X	-
Konieczność wykonywania pracy w nietypowej pozycji przez dłuższy czas	-	-	-	X

1	2	3	4	5
Procedury zapewnienia bezpieczeństwa osób spoza ruchu elektrycznego wykonujących prace w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej				
W miejscu pracy sieć trakcyjna wyłączona spod napięcia i zabezpieczona przed przypadkowym i celowym podaniem napięcia	X	-	-	-
Praca lub doraźne czynności w pobliżu szyn lub przewodów uszyniających roboczych wykonywane po wyłączeniu sieci trakcyjnej spod napięcia	-	X	-	-
Doraźne czynności wykonywane w pobliżu szyn lub przewodów uszyniających roboczych przy włączonej sieci trakcyjnej	-	-	X	-
Praca lub doraźne czynności w pobliżu przewodu jezdnego znajdującego się pod napięciem	-	-	-	X
Procedury zapewnienia bezpieczeństwa przebywania w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej bez wykonywania prac przy tych urządzeniach				
Brak możliwości przebywania osób w wyrobiskach z siecią trakcyjną pod napięciem	X	-	-	-
W przypadku możliwości przebywania osób w wyrobiskach z siecią trakcyjną pod napięciem	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾
Uwagi: ¹⁾ Zgodnie z zasadami oceny możliwości wystąpienia okoliczności sprzyjających traktowaniu napięcia roboczego przewodu jezdnego jako napięcia dotykowego podczas normalnej pracy sieci trakcyjnej (por. tablica 5.2, z wyjątkiem dwóch ostatnich pozycji)

5.8. Analiza czynników ryzyka charakteryzujących czas rażenia

Czas rażenia zależy w ogólnym przypadku od dwóch rodzajów czynników:

- czynników charakteryzujących sposób dotknięcia punktów, pomiędzy którymi występuje napięcie robocze lub dotykowe i reakcje organizmu (głównie układu nerwowego) decydujące o możliwości uwolnienia się z obwodu prądu rażeniowego,
- czynników charakteryzujących działanie ewentualnego urządzenia ochronnego powodującego samoczynne wyłączenie zasilania.

Pierwsza grupa czynników ma znaczenie głównie w przypadku dotyku bezpośredniego. W sieciach trakcji elektrycznej dołowej, mimo że stosunkowo nisko zawieszony przewód jezdny stwarza poważne zagrożenie, nie są stosowane środki ochrony przy dotyku bezpośrednim (ochrony uzupełniającej). Powodem jest brak wdrożonych odpowiednich rozwiązań

technicznych, mimo że propozycje takich rozwiązań są znane [80]. Względnie wysoka¹⁶ wartość napięcia roboczego (ok. 250 V d.c.) sprawia, że spodziewane wartości prądu rażeniowego przy dotyku bezpośrednim znacznie przekraczają prądy samouwolnienia. Nie można zatem liczyć na ograniczenie czasu rażenia spowodowane samodzielnym uwolnieniem się uszkodzonego z obwodu rażeniowego i – konsekwentnie – na obniżenie ryzyka przez ograniczenie czasu przepływu prądu rażeniowego. Trzeba w związku z tym przyjąć, że przy dotyku bezpośrednim, przy braku urządzenia ochronnego, czas rażenia będzie wystarczająco długi, by spowodować najbardziej niekorzystne skutki (do śmiertelnych włącznie).

Druga grupa czynników może mieć znaczenie w przypadku, gdy jako środek ochrony przy dotyku pośrednim (dodatkowej) zastosowane jest samoczynne wyłączanie zasilania. Z zalecanych do stosowania środków ochrony dodatkowej w sieciach trakcji elektrycznej dołowej [93], samoczynne wyłączanie zasilania dostępne jest tylko przy uszynieniu ochronnym. Działanie uszynienia, jako środka ochrony przy dotyku pośrednim, polegać może albo na ograniczeniu napięcia dotykowego do wartości dopuszczalnej, albo (jeżeli spodziewane napięcie dotykowe jest wyższe od dopuszczalnego) na takim ograniczeniu czasu utrzymywania się napięcia dotykowego przez urządzenie ochronne, by skutki rażenia nie spowodowały zagrożenia życia. Potrzeba zastosowania urządzenia ochronnego powodującego samoczynne wyłączenie zasilania zależna jest więc od wartości spodziewanego napięcia dotykowego.

Z rozdziału 5.5.2 wynika, że największych wartości napięć dotykowych spodziewać się należy w przypadku doziemień przewodu jezdnego (z pominięciem części przewodzących dostępnych). Ze względną częstością występowania (odpowiadającą prawdopodobieństwu) ok. 0,08, można spodziewać się napięć dotykowych szyn oraz części przewodzących dostępnych urządzeń uszynionych z przedziału –200 do –230 V w stosunku do ziemi, a więc i większości części przewodzących obcych (por. rys. 5.22b). Warto zwrócić uwagę na fakt, że w przypadku dotknięcia części przewodzącej dostępnej urządzenia uszynionego rękami lub górną częścią ciała, prąd rażeniowy popłynie w górę (będzie miał charakter prądu wstępującego), a więc będzie bardziej niebezpieczny.

Przyjmując najbardziej niekorzystny przypadek, dla napięcia dotykowego 230 V, z tablicy 5.5 określono wartości rezystancji ciała odpowiadające różnym wartościom wskaźnika dyskomfortu cieplnego i obliczono odpowiednie wartości prądów rażeniowych. Dla wartości

¹⁶ Paradoksalnie, wartość napięcia roboczego zasilającego sieć trakcyjną należy w różnych sytuacjach traktować jako względnie niską lub względnie wysoką. Jest ona „zbyt niska”, by budzić należyty respekt (np. taki, jak sieci średniego lub wysokiego napięcia) i skłonić niektóre osoby do większej ostrożności (por. rozdz. 5.1), a jednocześnie na tyle wysoka, że skutki porażenia są najczęściej bardzo poważne.

tych, z wykresu zależności $t_r = f(U_d)$ [73], odczytano dopuszczalne czasy rażenia z krzywej c1 stanowiącej granicę strefy, w której nie występuje bezpośrednie zagrożenie życia. Wyniki obliczeń przedstawiono w tablicy 5.21.

Tablica 5.21

Obliczeniowe wartości prądów rażeniowych i dopuszczalnych czasów rażenia przy napięciu dotykowym 230V mogącym pojawić się w przypadku zwarcia doziemnego przewodu jezdnego

Charakterystyczne wielkości obliczeniowe	Wskaźnik dyskomfortu cieplnego				
	$\delta = -0,26$	$\delta = 0$	$\delta = 0,4$	$\delta = 0,8$	$\delta = 1,0$
$R_c(U_d=230V;\delta), \Omega$	922	819	726	671	650
I_r, mA	250	280	217	343	354
$t_{rg}(c1\uparrow)^*, ms$	248	168	120	98	85
$t_{rg}(c1\downarrow)^*, ms$	>5000	1575	837	689	567

* symbolami c1↑ i c1↓ oznaczono odpowiednio krzywe prądów niefibrylujących płynących w górę (wstępujących) i w dół (zstępujących)

Tablica 5.22

Zasady oceny czynników ryzyka wpływających na czas rażenia prądem elektrycznym od urządzeń trakcji elektrycznej dołowej

Opis czynnika ryzyka i jego stanu	Ocena stanu czynnika ryzyka:			
	najlepszy możliwy	zalecany	najgorszy dopuszczalny	niedopuszczalnie zły
Możliwość wystąpienia niekontrolowanych czasów rażenia przy dotyku bezpośrednim	*** X ¹⁾	*** X ¹⁾	*** X ¹⁾	*** X ¹⁾
Sprawne urządzenie ochronne zapewniające samoczynne wyłączenie zasilania w czasie nie dłuższym niż 0,1s badane przy zwarciu doziemnym przewodu jezdnego	-	X	-	-
Sprawne urządzenie ochronne zapewniające samoczynne wyłączenie zasilania w czasie nie dłuższym niż 0,1s badane przy zwarciu przewodu jezdnego z szynami	-	-	X	-
Brak aktualnych badań czasu działania urządzenia ochronnego lub wartość czasu działania > 0,1s	-	-	-	X

Uwagi: ¹⁾ Zgodnie z zasadami oceny możliwości wystąpienia zróżnicowanych dróg rażenia prądem elektrycznym od urządzeń trakcji elektrycznej dołowej (por. tablica 5.20)

Z wartości zestawionych w tablicy 5.21 wynikają m.in. następujące wnioski:

- podstawą do określenia kryterium czasu samoczynnego wyłączenia zasilania powinny być prądy rażeniowe wstępujące,

- czas działania urządzenia ochronnego zapewniającego samoczynne wyłączenie zasilania w warunkach środowiskowych korzystnych dla człowieka ($\delta \leq 0,4$) nie powinien być dłuższy od 0,1 sekundy; wówczas w warunkach panujących często np. w przekopach (odczucie chłodu, $\delta \leq 0$) będzie występował zapas bezpieczeństwa wyrażający się stosunkiem czasu granicznego t_{rg} do czasu 0,1 s, równym 1,68 do 2,48,
- w warunkach środowiskowych skrajnie niekorzystnych ($\delta \geq 0,8$) czas samoczynnego wyłączenia zasilania nie powinien być dłuższy od ok. 0,08 s.

Propozycje zasad oceny czynników ryzyka charakteryzujących czasy rażenia przedstawiono w tablicy 5.22.

5.9. Możliwość zetknięcia się człowieka z urządzeniami trakcji elektrycznej

Urządzenia trakcji elektrycznej przewodowej (w zakładach górniczych, w których taka trakcja jest stosowana) należą do tej grupy urządzeń, do których osoby wykonujące prace w wyrobiskach lub tylko w tych wyrobiskach znajdujące się albo przemieszczające, mają częsty i stosunkowo łatwy dostęp. Decydują o tym następujące czynniki:

- większość urządzeń elektrycznych związanych z pracą trakcji elektrycznej przewodowej w podziemiach kopalń znajduje się w pomieszczeniach ogólnie dostępnych (tylko nieliczne umieszczone są w pomieszczeniach ruchu elektrycznego),
- sieć trakcyjna z gołym przewodem jezdny charakteryzuje się znaczną rozległością i jest prowadzona w wyrobiskach ogólnie dostępnych,
- dążenie do uzyskania całkowitej niedostępności przewodu jezdnego dla człowieka, napotyka ograniczenia środowiskowe (ograniczone wymiary wyrobisk) i techniczno-ekonomiczne (np. koszty związane z wykonaniem i utrzymaniem osłon na całej długości przewodu jezdnego),
- ograniczone wymiary wyrobisk oraz stosunkowo duże wymiary niektórych urządzeń trakcji elektrycznej (np. lokomotywy elektryczne, stacje zasilające) i innych urządzeń technicznych stwarzają warunki ciasnoty, co przy pewnych rodzajach prac sprzyja możliwości równoczesnego dotknięcia tych urządzeń,
- niektóre urządzenia techniczne nie związane z pracą sieci trakcyjnej (np. rurociągi, elementy obudowy wyrobisk, tam wentylacyjnych) prowadzone są w pobliżu nieosłoniętego przewodu jezdnego,

- składy pociągów stojące w wyrobiskach postrzegane są przez osoby pracujące lub poruszające się w ich pobliżu jako przeszkody, których próba szybkiego pokonania stwarza warunki do dotknięcia przewodu jezdnego.

Konsekwencją częstego i łatwego dostępu do urządzeń elektrycznych, zwłaszcza tak specyficznych, jak urządzenia trakcji elektrycznej przewodowej w podziemiach kopalń, powinny być odpowiednio zastrzeżone zasady bezpiecznej pracy i przebywania w pobliżu tych urządzeń. Istnieją odpowiednie środki techniczne i procedury mające na celu minimalizację czasu znajdowania się przewodu jezdnego pod napięciem i ograniczenie dostępu do tego przewodu (por. rozdz.5.5.1). Okoliczności wypadków (por. rozdz. 5.2 i rys. 5.4) wskazują jednak na to, że procedury zapewniające bezpieczną pracę nie są skutecznie stosowane, a rutyna i brak wyobraźni sprzyjają zwłaszcza dotykowi bezpośredniemu. Analizując protokoły powypadkowe dojść można do wniosku, że nie ma możliwości dokonania ilościowej (obliczeniowej) oceny prawdopodobieństwa zetknięcia się człowieka z urządzeniami trakcji elektrycznej i jako podstawę oszacowania tego prawdopodobieństwa należy przyjąć sposób przedstawiony w tablicy 3.7. Proponowane zasady oceny prawdopodobieństwa zdarzenia polegającego na zetknięciu się człowieka z urządzeniem trakcji elektrycznej przewodowej (por. rys. 5.3 i rys. 5.4, zdarzenie D) pokazano w tablicy 5.23.

Tablica 5.23

Zasady szacowania prawdopodobieństwa zetknięcia się człowieka z urządzeniami trakcji elektrycznej przewodowej P{D}

Zastosowane środki techniczne lub organizacyjne	Prawdopodobieństwo P{D}	
	określenie przewidywanego prawdopodobieństwa	wartość wskaźnika liczbowego prawdopodobieństwa p_D
Rezygnacja z pracy lub przebywania w pobliżu nieosłoniętego przewodu jezdnego lub świadome zastosowanie i przestrzeganie podczas pracy, zwłaszcza w pobliżu nieosłoniętego przewodu jezdnego, wszystkich procedur i zasad bezpiecznej pracy określonych w poprawnym poleceniu wykonania pracy	nieprawdopodobne (niemożliwe)	0
Działanie nie spełniające powyższych wymagań	częste (pewne)	1

Zetknięcie się człowieka z urządzeniem trakcji elektrycznej jest jednym z niezależnych zdarzeń składających się na powstanie obwodu rażeniowego (por. rys. 5.3). Aby doszło do powstania takiego obwodu, niezbędne jest pojawienie się napięcia dotykowego (zdarzenie

UD – rys. 5.3). Tak więc ryzyko porażenia prądem elektrycznym wynikało będzie równocześnie z analizy stanu czynników ryzyka przedstawionych w rozdz. 5.5. Jeżeli jednak na podstawie tablicy 5.23 wskaźnikowi prawdopodobieństwa p_D przypisana zostanie jednoznacznie wartość zero, to pozostałe czynniki ryzyka nie mają praktycznie znaczenia. Wszystkie działania zmierzające do:

- ograniczenia możliwości traktowania napięcia roboczego przewodu jezdnego jako napięcia dotykowego (tablica 5.2),
- ograniczenia występowania napięć dotykowych przekraczających wartości dopuszczalne na częściach przewodzących dostępnych (tablica 5.4),
- ograniczenia wpływu warunków środowiskowych na zmianę rezystancji ciała człowieka (tablica 5.11) i możliwości powstania różnych dróg prądu rażeniowego (tablica 5.20),

należy wówczas traktować jako elementy redundancyjne, zwiększające poziom i świadomość bezpieczeństwa.

5.10. Częstota i czas przebywania człowieka w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej

Zgodnie z rozważaniami z rozdz. 3.3.3, element częstości i czasu przebywania człowieka w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej istotny jest w perspektywie długofalowego zarządzania bezpieczeństwem, okresowej oceny ryzyka oraz jego prognozowania. Wskaźnik liczbowy p_C pozwalający uwzględnić intensywność ekspozycji na zagrożenie obliczyć można ze wzoru (3.4), a jego wartości odpowiadające przyjętym w rozdz. 3.3.3 założeniom odczytać z tablicy 3.8.

Przy ocenie ryzyka towarzyszącego pojedynczej pracy lub konkretnej czynności w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej, wskaźnik p_C należy przyjąć równy jeden, a o ryzyku decydują pozostałe elementy i czynniki.

5.11. Zasady oceny ryzyka porażenia prądem elektrycznym od urządzeń trakcji elektrycznej

Zgodnie z rys.5.5, na ryzyko porażenia prądem elektrycznym od urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej składa się sześć niezależnych elementów, z których trzy charakteryzują ciężkość porażenia i trzy – prawdopodobieństwo powstania obwodu rażeniowego. Uwzględniając powiązania logiczne pomiędzy poszczególnymi elementami (rysunki 5.2, 5.3 i 5.4)

prawdopodobieństwo wystąpienia porażenia zagrażającego życiu $P\{PZ\}$ można określić z wyrażenia:

$$P\{PZ\} = P\{S\} \cdot P\{UD\} \cdot P\{D\} \cdot P\{C\} \approx p_S \cdot p_{UD} \cdot p_D \cdot p_C = p_{PZ} \quad (5.66)$$

w którym

$P\{S\}$ – prawdopodobieństwo wystąpienia skutków porażenia zagrażających życiu (wg rys. 5.2, zdarzenie to jest sumą logiczną zdarzeń I oraz T: $S=I+T$),

$P\{UD\}$ – prawdopodobieństwo wystąpienia napięcia dotykowego,

$P\{D\}$ – prawdopodobieństwo zetknięcia się człowieka przebywającego w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej z urządzeniem elektrycznym,

$P\{C\}$ – element uwzględniający częstość i czas przebywania człowieka w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej (intensywność ekspozycji na zagrożenie),

$p_S, p_{UD}, p_D, p_C, p_{PZ}$ – wskaźniki charakteryzujące poszczególne prawdopodobieństwa, obliczane w ramach analizy i oceny czynników ryzyka.

Przy ocenie elementów $P\{S\}$ oraz $P\{D\}$ można wykorzystać metodykę analizy czynników ryzyka przedstawioną w rozdz. 3 i zastosowaną do oceny ryzyka związanego z prądami błądzącymi przy robotach strzelniczych (rozdz. 4).

Prawdopodobieństwo wystąpienia skutków zagrażających życiu określone jest ośmioma czynnikami przedstawionymi w tablicach 5.11, 5.20 i 5.22 i wynika z przystosowanego odpowiednio wzoru (3.2):

$$p_S = \frac{\sum_{i=1}^8 C_{Si}}{32} \Rightarrow P\{S\} \quad (5.67)$$

Prawdopodobieństwo wystąpienia napięcia dotykowego obliczyć można analizując szesnaście czynników przedstawionych w tablicach 5.2, 4.1 i 5.4 ze wzoru (5.23).

Prawdopodobieństwo zetknięcia się człowieka przebywającego w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej z urządzeniem elektrycznym $P\{D\}$ przyjmować może wartości 0 lub 1, zgodnie z zaleceniami zawartymi w tablicy 5.23.

Intensywność ekspozycji na zagrożenie $P\{C\}$ wynika z częstości wykonywania prac lub przebywania w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej. Przy ocenie okresowej ryzyka lub jego prognozowaniu, wskaźnik liczbowy charakteryzujący intensywność ekspozycji p_C wyznaczyć można posługując się wzorem (3.4) i wskazówkami zawartymi w tablicy 3.8. Przy ocenie

doraźnej ryzyka, dotyczącej konkretnej pracy lub czynności, wskaźnik intensywności ekspozycji na zagrożenie należy przyjmować równy jeden.

Zasady oceny ryzyka porażenia prądem elektrycznym zagrażającego życiu, opracowane na podstawie tablicy 3.10, przedstawiono w tablicy 5.24.

W uzasadnionych przypadkach, gdy przewidywana ciężkość skutków porażenia zostanie wiarygodnie oceniona na niższym poziomie (marginalnym lub nieistotnym), można zastosować do oceny ryzyka tablice 3.11 lub 3.12.

Tablica 5.24

Zasady oceny ryzyka porażenia prądem elektrycznym zagrażającego życiu od urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej

Częstość wykonywania prac lub przebywania w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej		Prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia $P\{Z\}$ (wartość umownego wskaźnika charakteryzującego prawdopodobieństwo)				
		nieprawdopodobne ($p_z = 0$)	nikłe ($0 < p_z \leq 0,25$)	okazjonalne ($0,25 < p_z \leq 0,50$)	możliwe ($0,50 < p_z \leq 0,75$)	częste ($0,75 < p_z \leq 1,00$)
Prognozowanie i ocena okresowa ryzyka	prace sporadyczne	BR	Rt	Rt	Rt	Ru
	prace wykonywane rzadko	BR	Rt	Rt	Ru	Ri
	prace wykonywane często	BR	Rt	Ru	Ri	Rnt
Doraźna ocena ryzyka		BR	Rt	Ru	Ri	Rnt

6. ZAKOŃCZENIE I WNIOSKI

Podstawowym założeniem niniejszej pracy było uznanie potrzeby podporządkowania celu naukowego (przeprowadzenie analizy teoretycznej zjawisk w sieci dolnej trakcji elektrycznej przewodowej i wykazanie jej użyteczności w badaniu ryzyka związanego z użytkowaniem elektrycznych urządzeń trakcyjnych) realizacji celu użytecznego, polegającego na opracowaniu możliwie prostej metodyki analizy i oceny tego ryzyka.

Analizę teoretyczną przeprowadzono w związku z tym w zakresie niezbędnym do wyciągnięcia wniosków praktycznych, a w przypadku oceny ryzyka porażenia prądem elektrycznym – kierując się dodatkowo wynikami analizy dokumentacji wypadków [12] zaistniałych w zakładach górniczych.

Istotę zagrożenia przy prowadzeniu robót strzelniczych (możliwość niekontrolowanego odpalenia zapalnika elektrycznego) stanowi powstawanie i rozprzestrzenianie się prądów błądzących. Z kolei u podstaw zagrożenia porażeniowego leży powstawanie i utrzymywanie się w czasie napięć, które mogą być traktowane jako napięcia dotykowe. Obydwa te zjawiska mają bardzo złożoną naturę i charakteryzują się znaczną zmiennością w czasie oraz istotnym udziałem czynników losowych. Ponieważ jednak konsekwencją tych zjawisk mogą być bardzo poważne wypadki zagrażające życiu i zdrowiu ludzi, nie można w pełni zrezygnować z podejścia deterministycznego, wyrażającego się potrzebą dostosowywania środków bezpieczeństwa i profilaktyki do najgorszych możliwych poziomów zagrożeń. Ocena tych zagrożeń, prowadzona w określonym czasie i w określonym miejscu na podstawie samych tylko stosownych pomiarów (choćby nawet bardzo licznych), wykonanych w warunkach rzeczywistych, ma charakter incydentalny i obciążona jest niepewnością. Jednym ze sposobów ograniczenia tej niepewności jest sformułowanie niektórych zasad oceny opartych na rozważaniach teoretycznych.

Na podstawie przeprowadzonych analiz i opracowanej metodyki oceny ryzyka można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Niezbędne w ocenie ryzyka związanego z prądami błądzącymi przy prowadzeniu robót strzelniczych zaszeregowanie poszczególnych czynników ryzyka do odpowiedniego przedziału ich stanu możliwe jest na podstawie analizy teoretycznej zjawisk zachodzących w sieci dolnej. Zasady takiej analizy, z wykorzystaniem wprowadzonych w pracy uogólnionych wzorów w postaci macierzowej, opisujących rozkład potencjałów szyn i sumaryczną wartość powstających prądów błądzących, przedstawiono w rozdziałach 4.3.5, 4.3.6 i 4.3.7.
2. Analiza teoretyczna rozkładu potencjałów szyn w warunkach normalnej pracy i podczas najczęściej spotykanych uszkodzeń sieci dolnej oraz analiza schematów zastępczych obwodów towarzyszących wypadkom porażenia prądem elektrycznym umożliwia ocenę poziomu spo-

dziewanych wartości napięć dotykowych, czy to w przypadku dotyku bezpośredniego (por. rozdz. 5.5.1, 5.5.2 i 5.6.1), czy też dotyku pośredniego (por. rozdz. 5.5.1 i 5.5.2 i 5.6.2), a tym samym stanowi podstawę do oceny ryzyka porażenia prądem elektrycznym. Stanowi to punkt wyjścia do opracowania kryteriów ochrony i oceny czynników ryzyka.

3. Z zasad techniki wykonywania robót strzelniczych [10, 76], a także ze wstępnej analizy zaistniałych wypadków porażenia prądem elektrycznym (rozd. 5.2) wynika wniosek, że próba zastosowania ogólnie znanych metod oceny ryzyka napotyka trudności. Specyfika warunków środowiskowych i zachowań ludzkich w tychże warunkach wskazuje na potrzebę opracowania metod i kryteriów oceny uwzględniających tę odrębność.
4. Uwzględniając fakt, że w bezpiecznym wykonywaniu robót strzelniczych bardzo istotną rolę odgrywa tzw. czynnik ludzki, przedstawiono w pracy sposób oceny prawdopodobieństwa przedostania się prądów błądzących do obwodu strzałowego (rozd. 4.5) i prawdopodobieństwa ograniczenia względnych wartości prądu błądzącego w obwodzie strzałowym (rozd. 4.6) w kategoriach: pewne – niemożliwe. Natomiast zasady oceny ryzyka związanego z prądami błądzącymi opracowano wariantowo (rozd. 3.3.5, 4.6 i 4.7), w zależności od tego, czy istnieją racjonalne przesłanki do przyjęcia ciężkości skutków jako katastrofalnych (krytycznych) bądź też jako marginalnych.
5. Specyfika warunków środowiskowych w zakładach górniczych wymaga również specjalnego podejścia do czynników składających się na ryzyko porażenia prądem elektrycznym od urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej. W pierwszej kolejności należy uwzględnić wpływ warunków środowiskowych (głównie klimatycznych) na rezystancję ciała człowieka. Opierając się na wynikach znanych z literatury badań [2, 41] zaproponowano w pracy model rezystancji ciała dostosowany do warunków podziemi kopalń i opracowano wzorowane na raporcie IEC 479 [73] tablice spodziewanych wartości tej rezystancji (rozd. 5.6.3.1). W tablicach 5.5 do 5.7 wprowadzono czynnik uwzględniający wpływ środowiska ocenianego za pomocą wskaźnika dyskomfortu cieplnego [13] lub za pomocą tradycyjnego wskaźnika opartego na pomiarach katatermometrycznych (tablice 5.8 do 5.10).
6. Znajomość zmian rezystancji ciała umożliwiła z kolei opracowanie metodyki prognozowania wzrostu ryzyka porażenia prądem elektrycznym w warunkach dyskomfortu cieplnego (por. rozdz. 5.6.3.2). Korzystając dodatkowo z analizy napięć dotykowych (rozd. 5.5.2), sformułowano kryteria dopuszczalnych czasów rażenia (rozd. 5.8), których nie było dotychczas w ustaleniach normalizacyjno-przepisowych [73].
7. Jednym z następstw charakterystycznych właściwości warunków środowiskowych i ergonomicznych w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej jest możliwość występowania

zróznicowanych dróg przepływu ewentualnego prądu rażeniowego. W pracy przedstawiono wynikające z analizy teoretycznej zasady oceny skutków porażenia prądem elektrycznym płynącym wzdłuż różnych dróg (rozdz. 5.7.2) i przystosowano je do potrzeb praktycznej oceny ryzyka.

Pierwsze dwa wnioski potwierdzają pierwszą tezę pracy. Pozostałe stanowią argumenty dowodzące tezy drugiej.

Udowodnione tezy i zrealizowane cele pracy pozwalają w podsumowaniu stwierdzić, że przedstawiona analiza czynników ryzyka i metodyka oceny ryzyka odnoszącego się do dwóch najważniejszych zagrożeń związanych z użytkowaniem urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej w zakładach górniczych (możliwość niekontrolowanego odpalenia zapalnika elektrycznego pod wpływem prądów błądzących i zagrożenie porażeniowe) może być przydatna przy opracowywaniu dokumentu bezpieczeństwa oraz w planowaniu i realizacji działań organizacyjnych i technicznych włączonych do zarządzania bezpieczeństwem. W uzasadnionych przypadkach jako jeden ze sposobów ograniczenia ryzyka należy uwzględnić możliwość monitorowania zagrożeń stwarzanych przez prądy błądzące [33].

Opracowaną dla prądów stałych (d.c.) metodykę uwzględniania wpływu warunków środowiskowych na wzrost ryzyka porażenia prądem elektrycznym (por. rozdz. 5.6.3.2) można w sposób prosty dostosować do przypadków rażenia prądem przemiennym (a.c.). Wystarczy w tym celu posłużyć się wykresem $t_r = f(I_r)$ dla prądów przemiennych i opracować model impedancji ciała w różnych warunkach środowiskowych wg zasad przedstawionych w rozdz. 5.6.3.1. Pomocne w tym może być komputerowe wspomaganie oceny ryzyka [18, 19], a także skorzystanie z możliwości, jakie dają systemy ekspertowe oceny bezpieczeństwa [30, 39, 49, 62].

Przedstawione w pracy metody i zaproponowane zasady oceny poszczególnych czynników ryzyka powinny podlegać w przyszłości okresowej aktualizacji biorącej za podstawę wyniki analizy zaistniałych wypadków. W odniesieniu do wypadków porażenia prądem elektrycznym analiza taka, prowadzona wg obowiązujących obecnie zasad, nie pozwala w pełni uwzględniać wszystkich aspektów ryzyka, zwłaszcza związanych ze specyfiką warunków środowiskowych i ergonomicznych. Dlatego też w załączniku do pracy przedstawiono opracowane podstawy bazy danych [22] o wypadkach porażen prądem elektrycznym, zawierającej te wszystkie elementy, których uwzględnienie pozwoli w szerszym zakresie przeprowadzić okresową aktualizację zawartych w pracy propozycji.

PROPOZYCJA ZASAD TWORZENIA BAZY DANYCH O WYPADKACH ELEKTRYCZNYCH W ZAKŁADACH GÓRNICZYCH

Podstawą opracowania zasad i wstępnej wersji bazy danych [30] była analiza dokumentacji powypadkowych przechowywanych w archiwum Wyższego Urzędu Górniczego [12]. Łącznie przeprowadzono szczegółową analizę ok. 200 dokumentacji wypadków (w tym 21 dotyczących trakcji elektrycznej przewodowej, przedstawionych w rozdz. 5) z lat: 1980, 1988-1990 i 1991-1997, z różnych zakładów górniczych. Dokumentacje te są zróznicowane pod względem objętości i szczegółowości, jednak praktycznie zawsze zawierają oprócz danych personalnych osób poszkodowanych następujące elementy:

- orzeczenie komisji powołanej przez OUG (obejmujące m.in.: szczegółowy opis miejsca wypadku wraz z rysunkami i odtworzenie jego przebiegu, określenie przyczyn wypadku i osób odpowiedzialnych, zarządzenie powypadkowe, wykaz przepisów, których przekroczenie doprowadziło do wypadku),
- protokoły przesłuchań osób poszkodowanych (w miarę możliwości), świadków i osób służbowo związanych z sytuacją wypadkową,
- wyniki badań i sprawdzeń, których wykonanie zarządziła komisja powypadkowa,
- wyniki badań lekarskich osób poszkodowanych (w razie wypadków śmiertelnych – sekcji zwłok), orzeczenie o ciężkości wypadku i o czasie trwania leczenia (zwolnienia lekarskiego).

W obszernej literaturze [11, 12, 22, 50, 75 i wiele innych] zwraca się uwagę na różne specjalistyczne aspekty wypadków porażenia i oparzenia prądem i łukiem elektrycznym, akcentując równocześnie niedostatek informacji o wypadkach [11, 22] oraz potrzebę opracowania metodyki badania wypadków i wypadkowości [11, 50, 75]. Potwierdzenie takiego stanowiska wynika również z analizy przeprowadzonej w ramach niniejszej pracy. Uwzględniając rozpatrywane w rozdz. 5 czynniki ryzyka, powiązane z oddziaływaniem warunków środowiskowych i ergonomicznych, stwierdzić można niedostatek danych opisujących okoliczności wypadku pod kątem oceny i prognozowania ryzyka. Wynika stąd potrzeba poszerzenia zbioru danych, które gromadzone powinny być w dokumentacjach powypadkowych.

Gromadzenie informacji o okolicznościach prowadzących do wypadków elektrycznych i skutkach tych wypadków powinno być pomocne w realizacji co najmniej trzech zasadniczych celów:

- poznanie przyczyn wypadku i ustalenie zaleceń mających w przyszłości ograniczyć możliwość zaistnienia wypadków podobnych (aspekt organizacyjny),
- ocenę istniejących środków ochrony przeciwporażeniowej (aspekt techniczny),
- poszerzenie wiedzy, z której wynikną wnioski odnośnie do poprawności zasad i techniki ochrony przeciwporażeniowej (aspekt naukowy).

Poniżej przedstawiono propozycję zbioru informacji, w oparciu o które przeprowadzać można analizę wypadków, ze szczególnym uwzględnieniem wypadków porażenia prądem elektrycznym w warunkach podziemi kopalń. Zbiór podzielono wstępnie na 14 grup, uwzględniając nie tylko sieci trakcyjne. Poszczególne grupy (oznaczone dużymi literami alfabetu), ważniejsze elementy składowe tych grup oraz proponowane zakresy informacji w większości elementów składowych przedstawiono w tablicy Z1.

Tablica Z1

Ważniejsze składniki zbioru informacji tworzących bazę danych o wypadkach elektrycznych w zakładach górniczych

1	2	3	4
A	Dane dotyczące poszkodowanego	A.1 Płeć	kobieta, mężczyzna
		A.2 Wiek	(w latach)
		A.3 Staż pracy	(w latach)
		A.4 Stanowisko (zawód)	elektryk, nieelektryk
		A.5 Wykształcenie techniczne	wyższe, średnie, zawodowe, brak wykształcenia technicznego
		A.6 Posiadane uprawnienia do wykonywania czynności, przy których doszło do wypadku	uprawnienia zakładowe, uprawnienia URE, brak uprawnień,
B	Dane dotyczące miejsca wypadku	B.1 Rodzaj zakładu górniczego	podziemny, odkrywkowy, otworowy
		B.2 Nazwa zakładu górniczego	
		B.3 Lokalizacja wstępna wypadku	powierzchnia, dół
		B.4 Miejsce wypadku	ściana, chodnik, wnęka transformatorowa, warsztat, rozdzielnia, maszyna górnicza, itp.
C	Dane dotyczące czasu zaistnienia wypadku	C.1 Data wypadku	dzień, miesiąc, rok
		C.2 Godzina wypadku	godzina, minuty
		C.3 Czas pracy przed wypadkiem	kolejna godzina pracy poszkodowanego od początku zmiany
D	Dane dotyczące sposobu kontaktu z urządzeniem elektrycznym	D.1 Rodzaj urazu	rażenie prądem, oparzenie łukiem, skojarzone rażenie i oparzenie
		D.2 Dotyk	bezpośredni, pośredni, brak dotyku urządzenia elektrycznego
E	Dane dotyczące sieci zasilającej i urządzenia, przy którym zaistniał wypadek	E.1 Sieć	prądu przemiennego 50 Hz, prądu stałego, zasilana z przemienika częstotliwości, trójfazowej elektrycznej przewodowej, inna sieć
		E.2 Wartość napięcia znamionowego	
		E.3 Układ sieci (instalacji) nn	IT, TN-C, TN-S, TN-C-S, TT
		E.4 Układ sieci SN lub WN	sieć o: izolowanym, uziemionym bezpośrednio, uziemionym przez rezystor punkcie neutralnym transformatora, kompensowana
		E.5 Urządzenie	pole rozdzielcze SN, przewoźna stacja transformatorowa (strona SN, strona nn), rozdzielnica, łącznik manewrowy, kabel, mufta, lampa, przewód jezdny, łącznik sekcyjny itp.

cd. tablicy Z1

1	2	3	4
F	Cechy klimatu w miejscu wypadku rzutujące na rezystancję ciała	F.1 Liczba katatopni wilgotnych (wskaźnik dyskomfortu cieplnego)	wg książki wentylacji, z pomiarów po wypadku, wg oceny przybliżonej
		F.2 Oddziaływanie kryptoklimatu wnętrza osłony urządzenia (np. ognioszczelnej)	oceniane wg czasu zaistnienia wypadku od otwarcia pokrywy osłony nagrzanego urządzenia
G	Dane charakteryzujące obwód rażeniowy	G.1 Wartość napięcia dotykowego	obliczona, zmierzona
		G.2 Droga rażenia	jedna z 18 najbardziej prawdopodobnych dróg określona na podstawie znamion prądowych lub z wywiadu
		G.3 Wartość rezystancji ciała wzdłuż drogi rażenia	oszacowana na podstawie F, G.1, G.2
		G.4 Kierunek przepływu prądu rażeniowego stałego	wstępujący, zstępujący, poprzeczny (ręka – ręka)
		G.5 Częstotliwość i rodzaj prądu rażeniowego	50 Hz, inna częstotliwość, prąd przemienny odkształcony, prąd stały tętniący
		G.6 Wartość prądu rażeniowego	obliczona lub zmierzona w obwodzie modelowym
		G.7 Czas rażenia	oszacowany na podstawie L.1 i L.2
H	Skutki wypadku	H.1 Skutki na podstawie badań lekarskich	krótki opis
		H.2 Odczucia opisane przez poszkodowanego	krótki opis
		H.3 Spodziewane skutki na podstawie G.6 i G.7 (wg IEC-479)	zaliczenie do stref 1, 2, 3, 4
		H.4 Skutki wg kryteriów stosowanych przy ocenie ryzyka	nieznaczne, małe, krytyczne, katastrofalne
		H.5 Skutki wg kryterium czasu trwania leczenia (zwolnienia od pracy)	do 1 dnia, do 7 dni, do 14 dni, do 1 miesiąca, do 16 tygodni, trwale inwalidztwo, śmierć
		H.6 Skutki wg podziału na kategorie wypadków	lekkie, ciężkie, śmiertelne

cd. tablicy Z1

1	2	3	4
I	Dane o środkach organizacyjnych mających zapewnić bezpieczną pracę	I.1 Praca wykonywana na polecenie	pisemne, ustne, bez polecenia
		I.2 Ocena polecenia pisemnego	sporządzone: zgodnie z zasadami, niezgodnie z zasadami
		I.3 Przygotowanie miejsca pracy i narzędzi	m.in. uwzględnienie zagrożeń elektrycznych dla nieelektryków wykonujących prace w pobliżu urządzeń elektrycznych
		I.4 Ocena przebiegu wykonywania pracy	czynności: koordynującego, nadzorującego, dopuszczającego, kierującego zespołem poszkodowanego, osób dozoru wydających polecenie pracy itp.
		I.5 Ocena polecenia ustnego	
		I.6 Pouczenie o stopniu ryzyka	przekazanie informacji o zagrożeniach i wcześniejszych wypadkach, brak pouczenia
		I.7 Nadzór podczas wykonywania pracy	nadzór bezpośredni, nadzór czasowy lub „zdalny”(np. telefoniczny), brak nadzoru
J	Środki ochrony przeciwporażeniowej zastosowane w urządzeniu (w sieci), w którym zaistniał wypadek	J.1 Zasady (przepisy, normy) wg których realizowana była ochrona przeciwporażeniowa	
		J.2 Środki ochrony przed dotykiem bezpośrednim	wymienić zastosowane
		J.3 Środki ochrony przy dotyku pośrednim	wymienić zastosowane
		J.4 Środki równoczesnej ochrony przed dotykiem bezpośrednim i przy dotyku pośrednim	wymienić zastosowane
		J.5 Środki ochrony przy dotyku bezpośrednim	wymienić zastosowane
K	Przyczyny wypadku	K.1 Brak zadziałania i/lub niewłaściwe działanie środka ochronnego (zabezpieczenia)	
		K.2 Błędne działanie człowieka	wynikające: z braku kwalifikacji, z działania w stresie, z rutyny
		K.3 Użycie niewłaściwych narzędzi	
		K.4 Praca pod napięciem	świadoma, nieświadoma
		K.5 Świadomość zagrożenia u poszkodowanego	

cd. tablicy Z1

1	2	3	4
L	Informacja o działaniu urządzeń ochronnych i zabezpieczeń oraz wyniki ich badań	L.1 Zadziałanie zabezpieczeń w sieciach nn	nadmiarowoprądowe, upływo-we, różnicowoprądowe, brak zadziałania, brak informacji
		L.2 Zadziałanie zabezpieczeń w sieciach SN i WN	nadmiarowoprądowe, ziemnozwarciowe, brak zadziałania, brak informacji
		L.3 Wyniki powypadkowych badań urządzeń ochronnych (zabezpieczeń), które nie zadziałały	
		L.4 Wyniki badań powypadkowych systemu uziemiających przewodów ochronnych i/lub uszynienia	
M	Wyszczególnienie przepisów, które zostały przekroczone		
N	Słowa i hasła kluczowe charakteryzujące sam wypadek		

Przedstawiona wstępna propozycja bazy danych¹ stanowić powinna podstawę do wersji kolejnych, wzbogacanych w miarę uzyskiwania innych danych o wypadkach. Warunkiem możliwości rozbudowywania bazy danych jest dostęp do danych uznanych za niezbędne. Wymaga to jednak zmian w sposobie przeprowadzania postępowania powypadkowego. Celowe byłoby opracowanie jednolitego dla wszystkich komisji powypadkowych schematu dokumentowania prac, np. w formie ankiety – formularza, zawierającego pytania i uwagi umożliwiające zebranie wszystkich informacji ułatwiających analizę wypadków elektrycznych i analizę ryzyka porażenia prądem elektrycznym.

¹ Wersje wstępna, utworzona z wykorzystaniem programu MS Access 7, przedstawiono w opracowaniu [28].

LITERATURA

1. Antoni H., Biegelmeier G., Kieback D.: Konventionelle Grenzwerte mit vertretbarem Risiko für das Auftreten von Herzkammer flimmern bei elektrischen Durchströmungen mit Wechselstrom 50/60 Hz bzw. Gleichstrom. Schriftenreihe der Stiftung Elektroschutz, Bericht nr 3, Wien 2001.
2. Bahl H., Biegelmeier G., Hirtler R.: Körperimpedanzen des Menschen bei trockenen, wassermassen und salznassen Berührungsflächen verschiedener Größe. Schriftenreihe der Stiftung Elektroschutz, Bericht nr 2, Wien 2001.
3. Biegelmeier G.: Schutz gegen elektrischen Schlag – Beurteilung der Grenzkrisen – Wertigkeitsvergleiche. Schriftenreihe der Stiftung Elektroschutz, Bericht nr 4, Wien 2001.
4. Biegelmeier G., Mörx A.: Ganzheitsbetrachtungen und Grundregeln für den Schutz gegen elektrischen Schlag in Niederspannungsanlagen. Materiały XIII Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej: „Bezpieczeństwo elektryczne ELSAF 2001”. Wrocław, 12-14 września 2001.
5. Boron W., Gawor P., Mazur M.: Aktualne problemy bezpiecznej eksploatacji górniczych sieci elektroenergetycznych. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 1998, nr 10.
6. Boron W., Gawor P., Mazur M.: Wybrane problemy bezpieczeństwa eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych w zakładach górniczych. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 2001 nr 9.
7. Bugesz J.: Zagrożenia przy stosowaniu środków strzałowych w górnictwie podziemnym. Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie 1969, nr 1.
8. Cholewa A., Gawor P.: Ochrona przeciwporażeniowa w sieciach kopalnianych w ujęciu przepisów. Materiały XI Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Bezpieczeństwo elektryczne”, Wrocław 1997.
9. Cichowski E.: Zagrożenia pyłowe w górnictwie węgla kamiennego – model celowej techniki bezpieczeństwa. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo, z. 211, Gliwice 1993.
10. Cybulski W., Krzystalik P.: Strzelanie elektryczne w górnictwie. Wyd. „Śląsk”, Katowice 1970.
11. Danielski L.: Śmiertelne wypadki porażen prądem elektrycznym w Polsce w latach 1990-95. Materiały XI Międzynarodowej Konferencji „Bezpieczeństwo elektryczne”, Wrocław 1997.
12. Dokumentacje wypadków elektrycznych w zakładach górniczych w latach 1980, 1988 – 1997. Archiwum Wyższego Urzędu Górniczego.
13. Drenda J.: Dyskomfort cieplny w środowiskach pracy kopalń głębokich. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo, z. 213, Gliwice 1993.
14. Dworok R.: Bezpieczeństwo zapalników elektrycznych wobec nadajników fal elektromagnetycznych wysokiej częstotliwości. Materiały Konferencji „Materiały wybuchowe i technika strzelnicza. Aktualny stan i perspektywy rozwoju”. Ustroń-Jaszowiec 1996.
15. Dworok R.: Ryzyko niezamierzonego zainicjowania zapalników elektrycznych od linii przesyłowych wysokiego napięcia. Materiały Konferencji „Materiały wybuchowe i technika strzelnicza. Aktualny stan i perspektywy rozwoju”. Ustroń-Jaszowiec 1996.
16. Frycz A.: Klimatyzacja kopalń. Wyd. „Śląsk”, Katowice 1981.
17. Gawor P., Błaż J.: Prądy błędzące w wyrobiskach podziemnych spowodowane zelektryfikowaną trakcją na powierzchni. Przegląd Górnicy 1973, nr 12.
18. Gawor P., Boron S.: Komputerowe wspomaganie oceny ryzyka wypadków porażen prądem elektrycznym w niskonapięciowych sieciach zakładów górniczych. Materiały XII Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Bezpieczeństwo elektryczne”, Wrocław 1999.
19. Gawor P., Cholewa A., Boron S.: Zwalczanie zagrożeń od prądów błędzących w zakładach górniczych – analiza i ocena ryzyka zagrożeń stwarzanych przez prądy błędzące. Raport merytoryczny z realizacji pracy BK-218/RG1/99 (nie publikowany) Prace Katedry Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
20. Gawor P.: Analiza rozkładu potencjałów i prądu w szynach trakcji elektrycznej dołowej z lokalnym uziemieniem szyn. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo z. 184, Gliwice 1990.
21. Gawor P.: Badania źródeł prądów błędzących i ich wpływ na zagrożenia w kopalniach ROW. Praca doktorska (niepublikowana), Gliwice 1976.
22. Gawor P.: Baza danych o wypadkach elektrycznych w zakładach górniczych. Materiały XII Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Bezpieczeństwo elektryczne”, Wrocław 1999.
23. Gawor P.: Elementy ryzyka wypadków elektrycznych w warunkach kopalnianych. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 1998, nr 6.
24. Gawor P.: Ergonomics aspects of electric shock risk in the conditions of an underground mine. Archives of Mining Sciences 47, 1 (2002).
25. Gawor P.: Możliwości automatycznej kontroli stanu sieci dolnej kopalnianej trakcji elektrycznej jako przyczyny prądów błędzących. Materiały XI Krajowej Konferencji Automatyki. Białystok-Białowieża 1991.
26. Gawor P., Krasucki F.: Shot Firing Danger caused by Stray Currents with pulsing character. XIX International Conference of Research Institutes in Safety in Mines. Katowice 1981.
27. Gawor P.: Napięcia dotykowe przy rażeniach od urządzeń trakcji elektrycznej w kopalniach. Materiały X Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach elektrycznych”. Wrocław 1995.
28. Gawor P., Neuwert J., Szepe H.: O możliwości występowania i mierzenia prądów błędzących impulsowych. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Seria Górnictwo, z.82, Gliwice 1979.
29. Gawor P.: Opracowanie bazy danych o wypadkach elektrycznych w zakładach górniczych. Raport merytoryczny z realizacji pracy BW-487/RG-1/98/3 9 (nie publikowany) Prace Katedry Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
30. Gawor P.: O potrzebie i zasadach tworzenia ekspertowych systemów oceny bezpieczeństwa użytkownika energii elektrycznej w zakładach górniczych. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 1997, nr 6-7.
31. Gawor P.: O potrzebie normalizacyjnego uregulowania zasad zwalczania zagrożenia od prądów błędzących przy robotach strzelniczych. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie 1997, nr 8.
32. Gawor P.: Ocena stanu sieci szynowej trakcji elektrycznej dołowej jako przyczyny prądów błędzących. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo, z. 133, Gliwice 1985.
33. Gawor P.: Potrzeby i możliwości monitorowania zagrożeń stwarzanych przez prądy błędzące w zakładach górniczych. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 1999, nr 4-5.

34. Gawor P.: Prądy błędzące w kopalniach wywołane pracą trakcji elektrycznej przewodowej. Seminarium elektryfikacji i automatyzacji kopalń. Praca zbiorowa pod red. F. Krasuckiego. Gliwice 1983.
35. Gawor P.: Wymagania norm i przepisów w zakresie ochrony przeciwporażeniowej w pomieszczeniach lub ich strefach zagrożonych wybuchem. Materiały III Konferencji Naukowo-Techniczne: „Sposoby zabezpieczania obiektów w strefach zagrożonych pożarem i wybuchem”, ZONA '99. Międzyzdroje, 27-30 września 1999.
36. Gawor P.: Wpływ rezystancji złącza podłużnego szyn trakcji elektrycznej na powstawanie prądów błędzących. Zesz. Nauk Politechniki Śląskiej, seria Elektryka, z. 78, Gliwice 1982.
37. Gawor P.: Zagrożenie porażeniowe od kopalnianych urządzeń prądu stałego - napięcia dotykowe przy rażeniach od urządzeń trakcji elektrycznej w kopalniach. Raport merytoryczny z realizacji pracy BW-450/RG1/95/1 (nie publikowany). Prace Katedry Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 1995.
38. Gawor P.: Zagrożenie porażeniowe od kopalnianych urządzeń prądu stałego – badania napięć dotykowych i warunków środowiskowych w miejscach szczególnego zagrożenia przy dotyku pośrednim. Raport merytoryczny z realizacji pracy BW-409/RG1/96 (nie publikowany) Prace Katedry Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 1996.
39. Gierasimiuk J., Pawłowska Z., Zawieska M.: Ryzyko zawodowe - koncepcja skomputeryzowanego systemu eksperckiego. Bezpieczeństwo Pracy 1997, nr 3.
40. Gierlotka S.: Klimatyczne warunki pracy w kopalniach węgla i ich wpływ na możliwość rażenia prądem elektrycznym pracownika dołowego kopalni. Bezpieczeństwo Pracy 2002, nr 1.
41. Gierlotka S.: Wpływ uciążliwości ergonomicznych występujących w kopalniach węgla kamiennego na impedancję elektryczną ciała człowieka. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo, z. 225, Gliwice 2002.
42. Goworkow W.A.: Pola elektryczne i magnetyczne. WNT, Warszawa 1962.
43. Guderska H., Guderski R.: Ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach elektrycznych prądu stałego. Materiały VII Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach elektrycznych. Problemy normalizacji, projektowania i eksploatacji”. Łódź, maj 1989.
44. Gwóźdź B., Gabrys J.: Sposoby ochrony pracującego człowieka przed przegrzaniem miejscowym i ogólnym. Ergonomia 1997, t. 20, nr 1, wyd. PAN.
45. Gwóźdź B.: Skutki przegrzania organizmu ludzkiego. Ergonomia 1997, t. 20, nr 1, wyd. PAN.
46. Jabłoński W.: O celowości zmian i ujednoczenia niektórych polskich terminów i ich oznaczeń dotyczących zagrożenia porażeniowego ze stosowanymi w IEC i CENELEC. Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych. 2001, nr 42.
47. Jaźwiński J., Ważyńska-Fiok K.: Bezpieczeństwo systemów. PWN, Warszawa 1993.
48. Kabziński A.: Kierunki rozwoju techniki strzelniczej w aspekcie występujących zagrożeń. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie 2003, nr 2.
49. Korniluk W., Busłowski A., Romaniuk J.: Projekt systemu eksperckiego dotyczącego ochrony przeciwporażeniowej w urządzeniach elektroenergetycznych niskiego napięcia. Materiały IX Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach elektrycznych”. Łódź 1993.
50. Korniluk W., Lejdy B., Sobolewski R.A.: Problemy zarządzania bezpieczeństwem porażeniowym użytkowników urządzeń elektrycznych niskiego napięcia. Materiały XI Międzynarodowej Konferencji N-T „Bezpieczeństwo elektryczne”. Wrocław 1997.

51. Korniluk W., Sobolewski R.: Metoda oceny ryzyka zawodowego związanego z porażeniem prądem elektrycznym niskiego napięcia. Podstawowe założenia i algorytm. Materiały XIII Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Bezpieczeństwo elektryczne”. Wrocław 2001.
52. Korniluk W., Sobolewski R.: Metoda oceny ryzyka zawodowego związanego z porażeniem prądem elektrycznym niskiego napięcia. Modele matematyczne ryzyka. Materiały XIII Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Bezpieczeństwo elektryczne”. Wrocław 2001.
53. Korniluk W.: Probabilistyczne metody oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w urządzeniach elektrycznych niskiego napięcia Rozprawy Naukowe nr 17. Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 1993.
54. Krakowski M.: Obwody ziemnopowrotne. WNT, Warszawa 1979.
55. Krasucki F.: Deterministyczne i probabilistyczne modele zagrożeń elektrycznych. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo, z. 125, Gliwice 1984.
56. Krasucki F.: Zagrożenia elektryczne w górnictwie. Wyd. „Śląsk”, Katowice 1984.
57. Krzemień S.: Koncepcja zintegrowanego systemu zarządzania bezpieczeństwem w kopalni. Konferencja Naukowo-Techniczne „Zarządzanie bezpieczeństwem w państwie i przedsiębiorstwie”. GIG, CIOP, Ustroń 1996.
58. Krzemień S., Mocek P.: Określenie ryzyka zawodowego charakteryzującego potencjalne zagrożenie powstałe w wyrobiskach podziemnych w wyniku oddziaływania pyłu węglowego na organizm ludzki. KOMAG, Seria Konferencje, Katowice 1999.
59. Kupfer J.: Hearth in the way of electric current – the practical consequences. Materiały XIII Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej: „Bezpieczeństwo elektryczne ELSAF 2001”. Wrocław, 12-14 września 2001.
60. Manojlov W., Je.: Osnowy elektrobezopasnosti. Energoatomizdat, Leningrad 1991.
61. Markiewicz H.: Bezpieczeństwo w elektroenergetyce. WNT, Warszawa 1999.
62. Markiewicz H.: Podstawowe kryteria wymiarowania środków ochrony przeciwporażeniowej w urządzeniach prądu stałego. Materiały IX Międzynarodowej Konferencji „Ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach elektrycznych”. Łódź 1993.
63. Masny J.: Ogólny model matematyczny procesów diagnostycznych systemów bezpieczeństwa elektrycznego. Materiały X Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach elektrycznych”. Wrocław 1995.
64. Miedziński B., Okraszewski Z., Szkółka S., Szymański A.: Prądy błędzące i sposób pracy punktu neutralnego sieci kopalnianej średniego napięcia. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 2001, nr 4.
65. Mocek P.: „Grosz” – Górnictwo system oceny ryzyka zdrowotnego. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie 2003, nr 8.
66. Musiał E., Jabłoński W.: Warunki techniczne jakim powinny odpowiadać urządzenia elektroenergetyczne niskiego napięcia w zakresie ochrony przeciwporażeniowej – nowelizacja projektu. Biuletyn SEP Informator o Normach i Przepisach Elektrycznych 1999, nr 24.
67. Nawrat S.: Wpływ cieplnych warunków pracy na wypadkowość w kopalni podziemnej w świetle badań. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie 2003, nr 2.
68. Niczyporuk Z.: Kształtowanie bezpieczeństwa na przykładzie eksploatacji zmechanizowanych kompleksów ścianowych w kopalniach węgla kamiennego. Prace Naukowe GIG, nr 81, Katowice 1996.
69. Ollendorff F.: Erdströme. Birkhäuser Verlag, Basel 1969.

70. Pawłowska Z.: Harmonizacja statystyk w zakresie wypadków przy pracy w krajach europejskich. *Bezpieczeństwo Pracy* 2002, nr 10.
71. Pawłowska Z., Pietrzak L., Kowalewski S.: Ryzyko zawodowe - zasady analizy i oceny. *Bezpieczeństwo Pracy* 1996, nr 5.
72. Pawłowska Z.: Ryzyko zawodowe – zasady oceny. *Bezpieczeństwo Pracy* 1996 nr 6.
73. Raport Techniczny IEC nr 479-1. Skutki działania prądu na ludzi i zwierzęta domowe. Część 1: Aspekty ogólne. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 1999.
74. Rosmus P., Sobala J.: System zarządzania bezpieczeństwem pracy w zakładach górniczych. cz.I do VIII. *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie* 1996, nr 2 do 9.
75. Saferna J.: Analiza wypadków porażen prądem elektrycznym jako podstawa oceny środków ochrony przeciwporażeniowej. Materiały Konferencji N-T „Ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach elektrycznych o napięciu do 1 kV, Problemy normalizacji i jakości”. Łódź 1987.
76. Sobala J., Sobala J.: Ocena bezpieczeństwa oraz ryzyka zapłonu metanu i/lub pyłu węglowego przez roboty strzałowe. Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej: „Materiały wybuchowe i technika strzelnicza. Aktualny stan i perspektywy rozwoju.” Ustroń-Jaszowiec, 12-13 grudnia 1996.
77. Strizewskij I. W.: Teoria i rasczot drienażnoj i katodnoj zaszczity ot korrozii błūdajuszczimi tokami. Moskwa 1963.
78. Strizewskij I.W., Tomlianowicz D.K.: Błūdajuszczije toki i mietody zaszczity ot korozii. Moskwa 1957.
79. Studenski R.: Organizacja bezpiecznej pracy w przedsiębiorstwie. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1996.
80. Szczucki F., Rydzy F.: Zabezpieczenie przed rażeniem elektrycznym od sieci trakcyjnej w podziemiach kopalń. *Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie* 1970, nr 8.
81. Szymański A., Miedziński B., Okraszewski Z., Wnorowski C.: Wyznaczanie rozptyłu prądów błūdzących na obszarze odkrywki kopalni węgla brunatnego. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa* 2003, nr 7.
82. Teresiak Z.: Modelowe opory ciała ludzkiego w technice ochrony przeciwporażeniowej. *Zesz. Nauk. Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 1968, nr 196.
83. Wasilewski S.: Zagrożenia naturalne w polskim górnictwie węglowym w świetle wypadków i katastrof w latach 1960-1994, cz.I i II. *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie* 1997, nr 1 i 2.
84. Zięblińska B.: Etyczne aspekty ryzyka w badaniach i innowacjach technicznych. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa* 1998, nr 6.

Rozporządzenia, normy, przepisy

85. PN-EN 1050:1999 Maszyny. Bezpieczeństwo – Zasady oceny ryzyka.
86. PN-EN 292-1:2000 Bezpieczeństwo maszyn – Pojęcia podstawowe, ogólne zasady projektowania (konstruowania). Część 1: Podstawowa terminologia, metodologia.
87. PN-EN 292-2:2000 Bezpieczeństwo maszyn – Pojęcia podstawowe, ogólne zasady projektowania (konstruowania). Część 2: Zasady i wymagania techniczne.
88. PN-EN 61508-1:2000(U) Bezpieczeństwo funkcjonalne elektrycznych / elektronicznych / programowalnych systemów związanych z bezpieczeństwem – Wymagania ogólne.
89. PN-G-02700-1:1999 Ochrona pracy w górnictwie – Zwalczanie zagrożenia stwarzanego przez prądy błūdzące w zakładach górniczych – Wymagania ogólne.

90. PN-G-02700-2:2000 Ochrona pracy w górnictwie – Zwalczanie zagrożenia stwarzanego przez prądy błūdzące w zakładach górniczych – Ograniczanie powstawania i rozprzestrzeniania się prądów błūdzących.
91. PN-G-02700-3:2000 Ochrona pracy w górnictwie – Zwalczanie zagrożenia stwarzanego przez prądy błūdzące w zakładach górniczych – Pomiary prądów błūdzących i ocena zagrożenia w miejscach prowadzenia robót strzelniczych i składowania środków strzałowych.
92. PN-G-42041:1997 Środki ochronne i zabezpieczające w elektroenergetyce kopalniowej – System uziemiających przewodów ochronnych – Wymagania.
93. PN-G-50090:1997 Ochrona pracy w górnictwie – Sieć elektryczna trakcji przewodowej – Wymagania.
94. PN-IEC 1025:1994 Analiza drzew niezdatności (FTA)
95. PN-IEC 60050-826 Międzynarodowy słownik terminologiczny elektryki. Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych.
96. PN-IEC 60300-3-9:1999 Zarządzanie niezawodnością – Przewodnik zastosowań – Analiza ryzyka w systemach technicznych.
97. PN-IEC 60364-3 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych – Ustalenie ogólnych charakterystyk.
98. PN-IEC 60364-4-41:2000 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych – Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przeciwporażeniowa.
99. PN-N-18001:1999 Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higiena pracy – Wymagania.
100. PN-N-18002:2000 Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higiena pracy – Ogólne wytyczne do oceny ryzyka zawodowego.
101. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 17 czerwca 2002 r. w sprawie nabywania, przechowywania i używania środków strzałowych w zakładach górniczych. *Dz. U.* 2002, nr 92, poz. 818.
102. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych. *Dz. U.* 2002, nr 139, poz. 1169.
103. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy. *Dz. U.* 1997, nr 129, poz. 844.
104. Rozporządzenie Ministra Przemysłu z 8 października 1990 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać urządzenia elektroenergetyczne w zakresie ochrony przeciwporażeniowej. *Dz. U.* 1990, nr 81, poz. 473.
105. Rozporządzenie Ministra Przemysłu i Handlu z dnia 14 kwietnia 1995 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych. *Dz. U.* 1995, nr 67, poz.342.
106. Załącznik nr 2: „*Dokument bezpieczeństwa*”, do Rozporządzenia Ministra Gospodarki w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych. z 28 czerwca 2002 r. *Dz. U.* 2002, nr 139, poz. 1169.
107. Załącznik nr 21: „*Instalowanie, eksploatacja, organizacja i wykonywanie prac oraz kontrola urządzeń elektroenergetycznych*”, do Rozporządzenia Ministra Przemysłu i Handlu z dnia 14 kwietnia 1995 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, pro-

wadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych. Dz. U. 1995, nr 67, poz. 342.

108. Załącznik nr 4: „Szczegółowe zasady prowadzenia ruchu w wyrobiskach”, do Rozporządzenia Ministra Gospodarki w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych. z 28 czerwca 2002 r. Dz. U. 2002, nr 139, poz. 1169.

ANALIZA I OCENA RYZYKA ZWIĄZANEGO Z UŻYTKOWANIEM SIECI TRAKCJI ELEKTRYCZNEJ PRZEWODOWEJ W ZAKŁADACH GÓRNICZYCH

Streszczenie

W pracy przeprowadzono analizę dwóch najistotniejszych zagrożeń związanych z użytkowaniem trakcji elektrycznej przewodowej w zakładach górniczych, tzn. zagrożenia przy robotach strzelniczych (możliwość niekontrolowanego odpalenia zapalnika elektrycznego), wynikającego z występowania prądów błądzących oraz zagrożenia porażeniowego dotyczącego osób przebywających w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej przewodowej. Rozważania przeprowadzono pod kątem potrzeby i możliwości opracowania prostych procedur analizy i oceny ryzyka związanego z użytkowaniem trakcji elektrycznej, jako niezbędnego składnika zarządzania bezpieczeństwem w zakładach górniczych.

Większy nacisk położono na zagrożenie porażeniowe, gdyż ciągle jeszcze trakcja elektryczna przewodowa należy do najistotniejszych przyczyn porażień. Jednocześnie brakuje jednoznacznych i łatwych do stosowania zasad ochrony przeciwporażeniowej w sieciach trakcyjnych oraz metod ilościowej oceny stopnia zagrożenia (ryzyka) związanego z przebywaniem w pobliżu urządzeń sieci trakcyjnej. Szczegółowa analiza zebranych w ramach pracy dostępnych informacji o wypadkach elektrycznych zaistniałych w ciągu dziesięciu lat (rozdz. 5.2 i 5.6) pozwoliła ukierunkować analizę teoretyczną i podjąć próbę przystosowania znanych z literatury wyników badań do warunków panujących w zakładach górniczych.

W pracy zaproponowano oryginalną metodę analizy i oceny ryzyka opartą na szczegółowym badaniu elementów i czynników ryzyka, wynikających ze sporządzonych drzew niezdatności (FTA) prowadzących do obydwu zagrożeń. Metoda ta pozwala w prosty sposób przyporządkować każdemu z wielu czynników ryzyka ilościowy wskaźnik charakteryzujący stan tego czynnika. Wyróżniono cztery możliwe stany czynników ryzyka:

- najlepszy możliwy,
- technicznie i/lub ekonomicznie uzasadniony,
- najgorszy dopuszczalny,
- niedopuszczalnie zły.

Na podstawie łącznej oceny wszystkich analizowanych czynników określić można wskaźniki charakteryzujące prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia i prawdopodobieństwo wystąpienia ciężkości skutków w odniesieniu do każdego z zagrożeń. Osobno sformułowano zasady doraźnej oceny ryzyka (odniesionego do pojedynczego zdarzenia, niezależnie od liczby i częstości ich zaistnienia) oraz oceny okresowej (lub perspektywicznej).

Wobec braku możliwości statystycznej oceny okoliczności prowadzących do wypadków (zbyt mała ilość udokumentowanych zdarzeń) za podstawę do oceny ekstremalnych wartości wielkości lub stanów okoliczności prowadzących do zagrożenia przyjęto analizę teoretyczną zjawisk występujących w sieci trakcyjnej dolnej, traktowanej jako obwód ziemnopowrotny. Wprowadzone w pracy uogólnione wzory w postaci macierzowej, opisujące rozkład potencjałów szyn, pozwalają w stosunkowo prosty sposób (np. z wykorzystaniem wspomaganie komputerowego) obliczać m.in. spodziewane wartości napięć dotykowych i sumaryczne wartości powstających prądów błędzących zarówno w stanach roboczych właściwych, jak i przy zakłóceniach w sieci trakcyjnej.

W pracy przedstawiono sposób oceny prawdopodobieństwa przedostania się prądów błędzących do obwodów strzałowych i prawdopodobieństwa ograniczenia względnych wartości prądu błędzącego w obwodzie strzałowym w kategoriach: pewne – niemożliwe. Zasady oceny ryzyka związanego z prądami błędzącymi opracowano wariantowo w zależności od tego, czy istnieją racjonalne przesłanki do przyjęcia ciężkości skutków na określonym poziomie.

Analizując zagrożenie porażeniowe w specyficznych warunkach środowiskowych i ergonomicznych w pobliżu urządzeń trakcji elektrycznej w zakładach górniczych, zaproponowano w pracy model rezystancji ciała człowieka dostosowany do warunków podziemi kopalń i opracowano wzorowane na raporcie IEC 479 tablice (rozdz. 5.6.3.1) spodziewanych wartości tej rezystancji. W tablicach tych wprowadzono dodatkowy czynnik uwzględniający wpływ środowiska ocenianego za pomocą wskaźnika dyskomfortu cieplnego lub za pomocą tradycyjnego wskaźnika opartego na pomiarach katatermometrycznych. Znajomość zmian rezystancji ciała umożliwiła opracowanie metodyki prognozowania wzrostu ryzyka porażenia prądem elektrycznym w warunkach dyskomfortu cieplnego (rozdz. 5.6.3.2). Korzystając dodatkowo z analizy napięć dotykowych, sformułowano kryteria dopuszczalnych czasów rażenia (rozdz. 5.8), których nie było dotychczas w ustaleniach normalizacyjno-przepisowych. Przedstawiono również zasady oceny skutków porażenia prądem elektrycznym płynącym wzdłuż różnych dróg (rozdz. 5.7.2) i przystosowano je do potrzeb praktycznej oceny ryzyka.

W załączniku przedstawiono opracowane podstawy bazy danych o wypadkach porażenia prądem elektrycznym. Zawierają one te wszystkie elementy, których uwzględnienie pozwoli w szerszym zakresie przeprowadzać okresową aktualizację zawartych w pracy propozycji.

ANALYSIS AND ASSESSMENT OF RISK INVOLVED IN THE OPERATION OF WIRED ELECTRIC TRACTION SYSTEM IN MINES

Summary

The scope of the paper is the analysis of two most essential hazards involved in the operation of wired electric traction in mines: the blasting works hazard (possibility of uncontrolled ignition of electric fuse) resulting from stray currents, and electric shock hazard to people in the vicinity of wired electric traction. The discussion is focused on the need and possibility of designing simple procedures of analyzing and assessing the risks involved in the operation of electric traction, which is an indispensable elements of safety management in coal mines.

More emphasis is put on the electric shock hazard, because wired electric traction still constitutes the main cause of electric shocks. At the same time, definite and easily applicable principles of shock protection for electric tractions and methods of a quantitative assessment of the risk involved in human presence in the vicinity of electric traction equipment are insufficient. Detailed examination of the data on electricity related accidents that happened in coal mines during the period of ten years (see Chapters 5.2 and 5.6) facilitated the focus on the theoretical analysis and on an attempt at implementing the published research results to the conditions prevailing in coal mines.

The author's own method presented in the paper enables the analysis and assessment of risk on the bases of detailed examination of risk elements and factors, derived from the FTA (fault trees analysis) and leading to both of the above mentioned hazards. The method makes it possible to assign a quantitative ratio to numerous risk elements. Four potential states of the risk factors have been differentiated:

- best possible;
- technically/economically feasible;
- worst acceptable;
- unacceptably bad.

On the grounds of general assessment of all the analyzed factors it is possible to determine the ratios describing the frequency of the occurrence of hazards and probability of the gravity of consequences in relation to each hazard. The principles of a short-term assessment of risk (in relation to a single incident, irrespective of the number and frequency of the occurrence) have been formulated separately from the principles of periodic (long-term) assessment.

In the absence of a possibility of the statistical assessment of the circumstances leading to accidents (insufficient number of well documented incidents), the assessment of the extreme

values or conditions leading to hazards have been based on the theoretical analysis of the phenomena occurring in the lower traction system treated as the earth-return circuit. The generalized mathematical equations in the matrix form that describe the distribution of the rails potentials facilitate uncomplicated calculations (computer-aided) of the expected values of touch voltages and total values of the stray currents under operation conditions as well as under fault conditions of the electric traction.

The discussed method assesses the probability of stray currents penetration to blast circuits and the probability of reducing the relative values of the stray current in the blast circuit to the categories of: certain – impossible. The principles of the assessment of the risk involved in stray currents were formulated for various options, depending on the presence of rational premises for the assumption of the gravity of circumstances on a given level.

Following the analysis of shock hazards under specific environmental and ergonomic conditions in the vicinity of electric traction equipment in coal mines, a model of human body resistance adjusted to the underground mining conditions was developed together with the tables of the expected values of the resistance, in consistence with the IEC 479 report (see Chapter 5.6.3.1). The tables contain an additional factor accounting for the impact from the work environment measured by means of the thermal discomfort coefficient or by traditional Kata-thermometer readings. The determination of the changes in the resistance of human body led to the design of the methodology of forecasting the increase of the risk of electric shock under the thermal discomfort condition (see Chapter 5.6.3.2) Furthermore, making use of the analysis of touch voltages, it was possible to establish allowable shock duration criteria (Chapter 5.8), which to date have not been included in the standards and regulations in force.

The principles estimating the consequences of shock by electric current running along various paths were also discussed (Chapter 5.7.2) and next adjusted for the practical purposes of risk assessment.

The attachment contains the presentation of the database on electric shock accidents. They include all the elements for further consideration in a comprehensive and periodic update of the discussed proposals.

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice; tel. (0-32) 237-13-81
<http://wydawnictwo.polsl.pl>

Sprzedaż i Marketing
tel. (0-32) 237-18-48
wydawnictwo_mark@polsl.pl

Nakł. 100+50	Ark. wyd. 13	Ark. druk. 12,625	Papier offset. 70x100,80g
Oddano do druku 12.05.2005 r.	Podpisano do druku 12.05.2005 r.		Druk ukończ. w maju 2005r.

Wydrukowano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach, ul. Kujawska 1
zam. 229/05

Książki Wydawnictwa można nabyć w księgarniach

GLIWICE

- ◆ Punkt Sprzedaży – ul. Akademicka 2 (237-17-87)
- ◆ „FORMAT” – Akademicka 5 (architektura i budownictwo)
- ◆ „LAMBDA” – ul. Akademicka 2 (237-21-40)
- ◆ Punkt Sprzedaży – ul. Akademicka 16 (automatyka, elektronika, informatyka)
- ◆ „ŻAK” – ul. Kaszubska

RYBNIK

- ◆ „ORBITA” – ul. Rynek 12
- ◆ „NEMEZIS” – ul. Hallera 26

CZĘSTOCHOWA

- ◆ „AKADEMICKA” – Al. Armii Krajowej 46 (fax. 32-254-70)

ŁÓDŹ

- „POLITECHNIKA 100” – ul. Żeromskiego 116 PŁ.
- Hurtownia „BIBLIOPIL” – ul. Jędrówizna 9a (042) 679-26-77

KATOWICE

- ◆ Punkt Sprzedaży – ul. Krasińskiego 8
- ◆ Hurtownia „DIK” – ul. Duleby 7 (032) 204-82-30
- ◆ Hurtownia „JERZY” – ul. Słoneczna 24 (258-99-58)

TYCHY

- ◆ „I Ja Tours” - ul. Piłsudskiego 10 (217-00-91 w.130)

ZABRZE

- ◆ Punkt Sprzedaży – ul. Roosevelta 26

KRAKÓW

- ◆ Techniczna – ul. Podwale 4 (012) 422-48-09
- ◆ Punkt Sprzedaży WND – AGH, Al. Mickiewicza 30

GDAŃSK

- ◆ EKO-BIS – ul. Dyrekcyjna 6 (058) 305-28-53

WARSZAWA

- ◆ Studencka – Pl. Politechniki 1 (022) 628-77-58
- ◆ Techniczna - ul. Kaliskiego 15 (022) 666-98-02
- ◆ Techniczna – ul. Świętokrzyska 14
- ◆ MDM – ul. Piękna 31

BIAŁYSTOK

- ◆ Dom Książki (Księgarnia 84) – ul. Wiejska 45 c

POZNAŃ

- ◆ Księgarnia „POLITECHNIK” – ul. Piotrowo 3 (061) 665-23-24
- ◆ Księgarnia Techniczna – ul. Półwiejska 28 (061) 659-00-38

NOWY SĄCZ

- ◆ Księgarnia „ATOM” – ul. Hoffmanowej 3 (018) 446-08-72

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej

P3351/05/264

Druk: Drukarnia Gilwice, ul. Zwycięstwa 27, tel. 230 49 90