

ANDRZEJ KOBIELSKI*, JACEK LECH**, JANUSZ PRUSAK***

KOLEJOWA SIĘĆ TRAKCYJNA POWROTNA A KWESTIA ZAGROŻEŃ PORĄŻENIEM ELEKTRYCZNYM

RAILWAY OVERHEAD LINE RETURN CIRCUIT AND ISSUE OF ELECTRICAL SHOCK HAZARD

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z ochroną przeciwporażeniową człowieka w kolejowych trakcyjnych sieciach powrotnych. Scharakteryzowano skutki oddziaływania prądu stałego na organizm ludzki, omówiono obowiązujące normy i przepisy prawne dotyczące zagrożeń elektrycznych oraz przedstawiono konstrukcję sieci powrotnej. Wskazano także szczególnie niebezpieczne przypadki awarii sieci powrotnej i ich wpływ na kształtowanie się napięć szyna–ziemia pod wpływem obciążenia sieci przez prądy robocze pojazdów trakcyjnych.

Słowa kluczowe: zagrożenia porażeniowe sieci powrotnej

Abstract

Problems related to electrical shock safety on railway traction return circuits are presented in the article. The results of influence of direct current on human body are described, the valid standards and law regulations related to electrical hazards are discussed and a structure of return circuit is presented. Authors denoted particularly dangerous examples of breakdowns of return circuits and their influence on generated voltages rail-earth in the condition of traction system loaded by operating currents of traction vehicles.

Keywords: electrical shock hazards of return circuit

* Dr inż. Andrzej Kobielski, Instytut Pojazdów Szynowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

** Jacek Lech, student, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

*** Dr inż. Janusz Prusak, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

Oznaczenia

g_p	–	konduktancja przejścia [S/km]
I	–	prąd [A]
I_b	–	prądy błędzące [A]
I_s	–	prądy płynące szynami [A]
I_T	–	prąd rażeniowy [A]
L	–	długość odcinka zasilania [km]
PT	–	podstacja trakcyjna
r_p	–	rezystancja przejścia szyn [Ω km]
r_s	–	rezystancja wzdłużna szyn [Ω /km]
R_T	–	rezystancja ciała człowieka [Ω]
sj	–	sieć jezdna
t	–	czas [s]
U_L	–	napięcie bezpieczne [V]
U_s	–	napięcie szyny względem odległej ziemi [V]
U_{ST}	–	napięcie dotykowe spodziewane [V]
U_T	–	napięcie dotykowe rażeniowe [V]
U_{rdd}	–	maksymalne dopuszczalne napięcie dotykowe [V]
x	–	odległość względem początku układu odniesienia [km]
ZN	–	zwiernik napięciowy

1. Kolejowa sieć trakcyjna

1.1. Początki rozwoju trakcji elektrycznej

Za początek rozwoju trakcji elektrycznej uważa się rok 1879, kiedy to Werner von Siemens zbudował pierwszy pociąg elektryczny. Prezentacja lokomotywy wraz z trzema odkrytymi wagonami odbyła się na wystawie rzemiosł w Berlinie. Lokomotywa odbierała prąd z trzeciej szyny umieszczonej na izolatorach, znajdującej się pomiędzy szynami jezdny, które stanowiły sieć powrotną [1].

Z kolejnymi latami rozwoju trakcji elektrycznej wprowadzane lokomotywy o coraz większych mocach z różnymi typami napędów elektrycznych wymagały zastosowania odpowiedniego systemu zasilania prądem elektrycznym. Obecnie w Europie występują cztery podstawowe systemy zasilania trakcji elektrycznej:

- prądem stałym (DC) o napięciu 1500 V – stosowany praktycznie od samych początków trakcji elektrycznej, obecnie już się prawie nie rozwija,
- prądem stałym (DC) o napięciu 3000 V,
- prądem przemiennym (AC) jednofazowym o częstotliwości $16\frac{2}{3}$ Hz, i napięciu 15 kV,
- prądem przemiennym (AC) jednofazowym o częstotliwości 50 Hz i napięciu 25 kV.
- W Polsce elektryfikację kolei zapoczątkowano w roku 1936, a system zasilania prądem stałym o napięciu 3000 V uznano za optymalny na owe czasy. Do dnia dzisiejszego polska kolejowa sieć trakcyjna zasilana jest z tego systemu.

1.2. Zasilanie trakcji elektrycznej prądu stałego

W Polsce podstacje trakcyjne przetwarzają energię elektryczną prądu przemiennego (AC), dostarczoną przez energetykę zawodową na energię prądu stałego (DC). Podstacje zasilane są dwoma niezależnymi liniami SN (średnie napięcie) lub WN (wysokie napięcie) ze stacji transformatorowych energetyki zawodowej (GPZ – Główny Punkt Zasilający). Zasilanie z dwóch linii zapewnia podstacji ciągłość dostaw energii. Prąd przemienny, trójfazowy o częstotliwości 50 Hz i najczęściej o napięciu 15 kV przetwarzany jest przez zespoły prostownikowe na prąd stały (DC) o napięciu 3,3 kV. Napięcie takie stosowane jest na normalnotorowych magistralach i podmiejskich liniach kolejowych. Strona prądu stałego zabezpieczona jest urządzeniami przeciwzwarciovymi. Kable zasilaczy trakcyjnych doprowadzają energię elektryczną z podstacji trakcyjnej bezpośrednio do sieci jezdnej, rozciągającej się wzdłuż kolejowej trasy komunikacyjnej. Prąd z sieci jezdnej zasila silniki trakcyjne pojazdów szynowych i odprowadzany jest do podstacji trakcyjnej kablami powrotnymi połączonymi z torami kolejowymi, czyli z siecią powrotną.

W obwodzie zasilania sieci trakcyjnej w warunkach PKP wyróżniamy zasadniczo dwie części:

- sieć jezdnią, czyli zespół przewodów podłączonych do bieguna dodatniego źródła prądu, zawieszonych na konstrukcjach wsporczych wzdłuż szlaku kolejowego. Sieć jezdna składa się z liny nośnej oraz przewodu jezdnego,
- sieć powrotną, czyli tory kolejowe z odpowiednimi połączeniami elektrycznymi, podłużnymi i porzecznymi szyn, podłączone do ujemnego bieguna źródła prądu. Do sieci powrotnej dodatkowo zalicza się połączenia z szynami elementów przewodzących, normalnie nieznajdujących się pod napięciem, lecz będących w obszarze sieci trakcyjnej, np. konstrukcje wsporcze. Połączenia te zwane są uszynieniami.

1.3. Kolejowa sieć powrotna

1.3.1. Zadania i przeznaczenie sieci

Zadaniem torów kolejowych jest prowadzenie kół pojazdów szynowych po wyznaczonej drodze komunikacyjnej. W trakcji elektrycznej tory kolejowe są również przewodami odprowadzającymi prądy z silników pojazdów trakcyjnych i prądy zwarciovie do podstacji trakcyjnej. Wykorzystuje się je także jako obwody SRK (sterowania ruchem kolejowym). Urządzenia SRK posługują się szynami jako przewodnikami sygnałów, które usprawniają procesy związane z prowadzeniem ruchu.

Duże natężenie ruchu kolejowego, rozruch ciężkich lokomotyw towarowych o dużych mocach rzędu kilku megawatów, jak również w przypadkach awaryjnych zwarcia sieci jezdnej z powrotną powodują, że torami płyną prądy osiągające wartości mierzone w kiloamperach. Ważne jest więc, aby sieć powrotna zapewniała niskooporowe odprowadzenie prądów do podstacji trakcyjnej, które powinno gwarantować:

- szybką wyłączalność zwarć w przypadkach awaryjnych,
- ograniczenie spadków napięć w sieci szynowej,
- poprawę jakości i pewności zasilania,
- zmniejszenie zjawiska prądów błędzących,
- prawidłowe działanie urządzeń SRK.

Sieć szynową charakteryzują głównie dwa parametry elektryczne: rezystancja wzdłużna szyn $- r_s \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$, rezystancja przejścia szyna–ziemia $- r_p \left[\Omega \text{km} \right]$ lub konduktancja przejścia szyna–ziemia $g_p \left[\frac{\text{S}}{\text{km}} \right]$. Z punktu widzenia ochrony przeciwporażeniowej parametr przewodności wzdłużnej szyn jest szczególnie ważny ze względu na spadki napięć w sieci powrotnej. Tory kolejowe przebiegają w miejscach łatwo dostępnych, a ludzie często znajdują się w ich obszarze i mogą mieć styczność z szynami lub konstrukcjami przewodzącymi połączonymi z siecią powrotną. Spadki napięcia wywołane zwiększoną rezystancją wzdłużną powodują duże różnice potencjałów pomiędzy poszczególnymi punktami sieci szynowej a ziemią. Dlatego sieć powrotna musi zapewniać ciągłość i niskooporowość na drodze prądów powrotnych. Kolejny warunek to odpowiednia izolacja torów od ziemi. Mała rezystancja przejścia niekorzystnie wpływa na zwiększoną upływność roboczych prądów trakcyjnych do ziemi. Zjawisko to nazywane jest prądami błędzącymi. Prądy te są niepożądane ze względu na ich działalność korozyjną. Metalowe konstrukcje inżynierskie, tj. rurociągi, mosty itp., narażone długotrwale na działanie prądów błędzących ulegają wielu awariom z powodu korozji elektrolitycznej.

1.3.2. Konstrukcja elementów sieci szynowej

Na sieć powrotną składają się szyny jezdne, łączniki poprzeczne i podłużne, dławiki torowe, połączenia powrotne łączące szyny z ujemną szyną podstawacji trakcyjnej oraz uszynienia [2].

W Polskich Kolejach Państwowych stosuje się dwa typy konstrukcji torów o tzw. budowie klasycznej oraz bezстыkowej. Różnica polega na tym, iż w połączeniach bezстыkowych zakończenia fabrykacyjne szyn są spawane termitowo lub elektrycznie, a w torach klasycznych stosuje się połączenia lóbkowe oraz dodatkowo montuje się łączniki podłużne w formie przewodu miedzianego o odpowiednim przekroju, zapewniającym przepływ prądu. Łączniki podłużne są lutowane do główki szyny bądź przewlekane przez specjalne otwory znajdujące się na zakończeniach odcinków fabrykacyjnych [3]. Dodatkowo tory kolejowe wyposażone są w połączenia poprzeczne. Zapewniają one ciągłość w przepływie prądu w przypadku pęknięcia szyn oraz powodują, że wypadkowa rezystancja wzdłużna sieci powrotnej zmniejsza się dwukrotnie. Do połączeń poprzecznych zalicza się łączniki międzytokowe, które łączą sąsiednie szyny tego samego toru oraz łączniki międzytorowe, które łączą sąsiednie tory.

Strefa oddziaływania trakcji elektrycznej to obszar zelektryfikowany, w którym mogą występować zagrożenia pojawienia się niebezpiecznych napięć na częściach przewodzących znajdujących się w tym obszarze. W tym celu stosowane są elektryczne połączenia metalowych konstrukcji przewodzących prąd, normalnie nieznajdujących się pod napięciem, tj. mosty, wiadukty itp., z siecią powrotną za pomocą zwierników napięciowych. Gdy napięcie konstrukcji względem ziemi przekroczy wartość dopuszczalną 120 V, zwiernik powinien przejść ze stanu izolacji w stan przewodzenia i skutecznie obniżyć niebezpieczny potencjał do wartości bezpiecznych. W przypadku konstrukcji wsporczych słupów trakcyjnych stosuje się wspomniane wcześniej uszynienia. Uszynienia spełniają dwa główne zadania [2]:

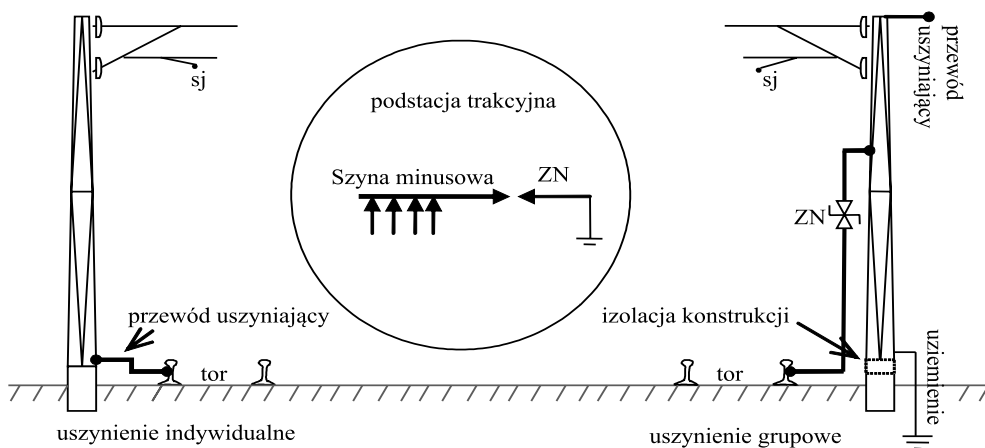
1. Zwierają metalową konstrukcję wsporczą z siecią powrotną (szyny jezdne), co w przypadku awarii izolacji sieci jezdnej powoduje natychmiastowe zadziałanie wyłączników szybkich w podstawacji trakcyjnej i kabine sekcyjnej, przerwanie prądu zwarcia oraz zlikwidowanie niebezpiecznego potencjału z szyn i konstrukcji wsporczej;

2. Stanowią ochronę przeciwporażeniową, uniemożliwiają zbyt długi przepływ prądu zwarciowego, który powoduje utrzymywanie się wysokiego potencjału konstrukcji wsporczej względem ziemi. Dotknięcie takiej konstrukcji groziłoby porażeniem osoby w momencie awarii izolacji.

Uszynienie konstrukcji wsporczych jest podstawowym warunkiem właściwej ochrony przeciwporażeniowej w obwodach tracji elektrycznej. W polskich kolejach wyróżnia się dwa rodzaje stosowanych uszynień:

- indywidualne,
- grupowe.

Uszynienia indywidualne polegają na bezpośrednim połączeniu konstrukcji wsporczej z szynami jezdny. Stalowe pręty spawane lub mocowane na zaciskach tworzą połączenie szyn z konstrukcją wsporczą. Dłuższe uszynienia połączone są za pomocą linii miedzianych dla ograniczenia rezystancji. Obecnie ten typ uszynień nie spełnia warunków obowiązujących norm PN-EN 50122-1 oraz PN-EN 50122-2 m.in. ze względu na zjawisko występowania prądów błędzących [4]. Stosowanie bezpośrednich połączeń elektrycznych uziemionych konstrukcji wsporczych z siecią powrotną jest niedozwolone. Uszynienia grupowe łączą ze sobą określoną liczbę konstrukcji wsporczych za pomocą linki uszyniającej. Najczęściej uszynienia prowadzone są napowietrznie na całej długości szlaku kolejowego. Linka uszyniająca AFL zamontowana jest do wsporników konstrukcji wsporczej za pomocą uchwytych przelotowych. Długość linii uszyniającej z reguły dochodzi do 3000 metrów, a jej zakończenia łączy się z siecią powrotną poprzez zwierniki niskonapięciowe [2].



Rys. 1. Rodzaje uszynień spotykane w polskim systemie zasilania kolei 3000 V DC

Fig. 1. Types of structure bonding system used in polish railway power system 3 kV DC

Podobnie jak w przypadku uszynień grupowych, szyna minusowa podstacji trakcyjnej jest łączona z uziemieniem poprzez zwiernik napięciowy. W normalnych warunkach szyna jest izolowana od ziemi, w momencie pojawienia się niebezpiecznego napięcia następuje połączenie przez zwiernik. Rozwiązanie takie stanowi minimum zapewniające spełnienie wymagań ochrony przed prądami błędzącymi, a jednocześnie zapewnia wyłączalność zwarć oraz ochronę przeciwporażeniową. Urządzenie zwierające znajdujące się w podstacji trak-

cyjnej posiada skomplikowaną konstrukcję i umożliwia oddziaływanie na wyłącznik mocy zespołu podstacji w przypadku utrzymywania się niewyłączalnego przez wyłącznik szybki zwarcia doziemnego [5].

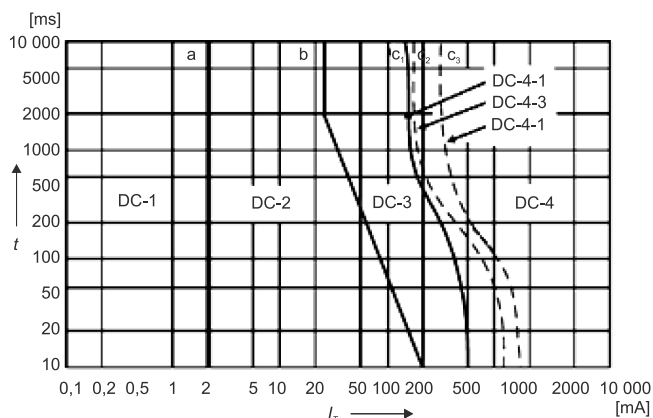
2. Dopuszczalne bezpieczne poziomy napięcie w sieci powrotnej

2.1. Skutki porażenia człowieka prądem stałym

Skutki bezpośredniego oddziaływania prądu stałego na organizm ludzki, będące podstawą w kryteriach oceny zagrożenia porażeniowego zostały ogłoszone przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną (IEC – *International Electrotechnical Commission*) w raporcie technicznym typu 2-IEC/TR2 604791-1 [6]. Według IEC skutki fizjologiczne rażenia prądem przepływającym określoną drogą w ciele człowieka zależą od:

- wartości prądu rażeniowego,
- zwrotu przepływu prądu rażeniowego,
- czasu przepływu prądu.

Rysunek 2 (z publikacji IEC) przedstawia strefy czasowo-prądowe skutków działania prądu stałego DC na organizm człowieka. Prąd rażeniowy I_T przepływa na drodze lewa ręka–stopy.



Rys. 2. Strefy czasowo-prądowe skutków działania prądów stałych na organizm człowieka [6]

Fig. 2. Time-current zones of results of effect of direct current on human body [6]

Próg odczuwania i reakcji na prąd stały dla człowieka wynosi około 2 mA. Przekroczenie tej wartości prądu rażeniowego (strefa DC-2) objawia się tylko lekkimi skurczami mięśni przy załączaniu i wyłączaniu prądu. Długotrwałe rażenie prądem w strefie DC-3 pomiędzy krzywymi b oraz c ma już istotny wpływ na zdrowie człowieka. W strefie DC-3 występują reakcje mięśniowe, które mogą przejściowo lub trwale szkodzić zdrowiu osoby rażonej. Skurcz mięśni może być tak silny, że niemożliwe jest otwarcie dłoni [7]. Wartość progowa prądu samouwolnienia mięśni się w zakresie od 25 do 75 mA. Powyżej tej wartości zwiększa się prawdopodobieństwo, że osoba rażona nie jest w stanie uwolnić się od obwodu rażeniowego. Długotrwałe rażenie prądem w tej strefie może spowodować termiczne zmiany w organizmie. Dla większych natężeń prądu rażeniowego, poza krzywą c_1 powiększa się

prawdopodobieństwo migotania komór serca, co może prowadzić do zatrzymania jego akcji i śmierci człowieka. Duże prądy rażeniowe powodują głębokie oparzenia ciała.

Aby określić zagrożenie spowodowane przepływem prądu rażeniowego I_T , należy opierać się na kryteriach dopuszczalnych napięć dotykowych spodziewanych lub dotykowych rażeniowych.

Napięcie dotykowe spodziewane U_{ST} jest to największa wartość napięcia dotykowego w urządzeniach lub w instalacji elektrycznej w razie uszkodzenia izolacji, gdy wartość impedancji w miejscu zwarcia jest pomijalna.

Napięcie dotykowe rażeniowe U_T to spadek napięcia wzdłuż drogi przepływu prądu przez ciało człowieka.

Człowiek w czasie rażenia prądem stanowi część obwodu elektrycznego. Znając rezystancję ciała ludzkiego R_T przy porażeniu prądem stałym i napięcie dotykowe rażeniowe U_T , możemy wyznaczyć prąd przepływający I_T i ocenić, jakie skutki spowoduje. Wartość rezystancji ciała zmienia się w zależności od przyłożonego napięcia, wilgotności skóry, powierzchni dotyku oraz drogi przepływu prądu [8].

Tabela 1

Rezystancja ciała ludzkiego R_T przy przepływie prądu stałego na drodze ręka–ręka i przy dużej powierzchni dotyku [8]

Napięcie dotykowe rażeniowe [V]	Wartości, których nie przekracza rezystancja człowieka [Ω] odpowiedniej części populacji (na drodze ręka–ręka)		
	5% populacji	50% populacji	95% populacji
25	2200	3875	8800
50	1750	2990	5300
75	1510	2470	4000
100	1340	2070	3400
125	1230	1750	3000
220	1000	1350	2125
700	750	1100	1550
1000	700	1050	1500

Rezystancja człowieka posiada inną wartość na drodze przepływu prądu ręka–ręka i ręka–stopy. Rezystancja R_T na drodze ręka–obie stopy wynosi 75% rezystancji na drodze ręka–ręka [8].

Ważny jest również kierunek prądu. Z punktu widzenia zagrożenia porażeniem bardziej niebezpieczny jest prąd wstępujący (od nóg do rąk); podobne skutki patofizjologiczne występują przy wartościach prądu od 1,05 do 4,4 razy mniejszych niż przy prądzie zstępującym (od rąk do nóg), zależnie od tego, o jakie efekty i czas rażenia chodzi [9].

Warunki środowiskowe mają decydujący wpływ na wybór dopuszczalnych wartości napięcia, które uznawane jest za napięcie bezpieczne. Napięcie bezpieczne U_L definiowane jest jako największa wartość napięcia roboczego lub dotykowego, którego długotrwałe utrzymywanie się nie stanowi zagrożenia dla życia i zdrowia człowieka w danych warunkach otoczenia. Dla prądu stałego za bezpieczne uważa się napięcie dotykowe o wartości 120 V, a w warunkach zwiększonego zagrożenia czynnikami środowiskowymi dopuszcza się na-

pięcie do 60 V. Warunki zwiększonego zagrożenia czynnikami środowiskowymi występują wtedy, gdy rezystancja ciała ludzkiego względem ziemi jest mniejsza od 1000Ω [7]. Do środowisk zwiększonego zagrożenia zaliczają się tereny otwarte, a istotny wpływ na zmniejszenie oporności ciała ludzkiego ma wysoka temperatura oraz duża wilgotność powietrza.

Aktualnie obowiązujące przepisy ochrony przeciwporażeniowej (norma PN-IEC 60364) przyjmują, że napięcie jest bezpieczne, jeśli nie przekracza wartości podanych w tabeli 2.

Tabela 2

Wartości napięć bezpiecznych [11]

Rodzaj prądu	Napięcie bezpieczne U_L (V) w warunkach		
	normalnych	szczególnych	ekstremalnego zagrożenia
Prąd przemienny	50	25	12
Prąd stały	120	60	30

2.2. Wymagania stawiane ochronie przeciwporażeniowej zawarte w normie PN-EN 50122-1

Norma europejska PN-EN 50122-1 została wprowadzona do stosowania w PKP w 2002 r. Zawiera ona wymogi stawiane środkom ochrony bezpieczeństwa elektrycznego w instalacjach stałych, powiązanych z systemami trakcji AC oraz DC, jak i również innych instalacji narażonych na oddziaływania systemu trakcji elektrycznej. Podstawowe zagadnienia związane z bezpieczeństwem elektrycznym w systemie trakcji 3 kV DC zawierają rozdziały 5 i 7 [10].

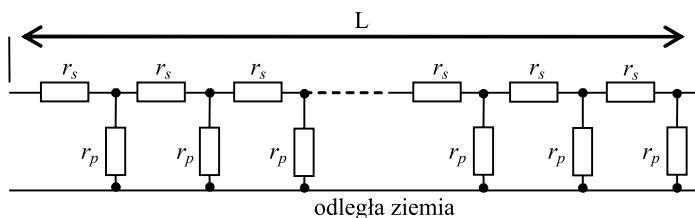
Postanowienia zawarte w rozdziale 5 dotyczą ochrony przy dotyku pośrednim, gdzie niebezpieczny potencjał może zostać przeniesiony na dostępne części przewodzące normalnie nieznajdujące się pod napięciem. Taka sytuacja może zająć wskutek zerwania górnej sieci jezdnej oraz zerwania lub wykolejenia pantografu. Zalecane jest izolowanie konstrukcji wsporczych, a następnie ich bezpośrednie łączenie z obwodem powrotnym, czyli zastosowanie uszynień. Części przewodzące nieizolowane od ziemi powinny być połączone z ziemią i stanowić połączenie z obwodem powrotnym tylko w momencie pojawienia się niebezpiecznego napięcia (awarii), tak by umożliwić przerwanie prądu. Zastosowanie zwierników napięciowych spełnia te wymogi. Zwierniki w normalnych warunkach pracy, przy niskim napięciu szyny – uszynienia konstrukcji tworzą przerwę izolacyjną. W przypadku pojawienia się niebezpiecznego napięcia na uszynionej konstrukcji w stosunku do szyn, zwiernik zamyka obwód, uszyniając konstrukcję.

Przedstawione w rozdziale 7 zakresy największych dopuszczalnych napięć dotykowych/dostępnych zostały podzielone na trzy grupy czasowe ze względu na czas przepływu prądu. Największe dopuszczalne napięcia dotykowe pojawiające się w momencie awarii przy krótkich czasach przepływu prądu rażeniowego $0 < t < 0,5$ s powinny być uwzględniane w urządzeniach ochronnych i wyłącznikach. Przy ciągłym przepływie prądu, a więc w normalnych warunkach pracy, napięcie dostępne nie może przekraczać dopuszczalnych wartości 120 V lub 60 V w zależności od czynników środowiskowych.

3. Ocena zagrożeń elektrycznych dla wybranych przypadków ruchowych pojazdów trakcyjnych

3.1. Rozkład potencjału i rozptył prądu w szynach

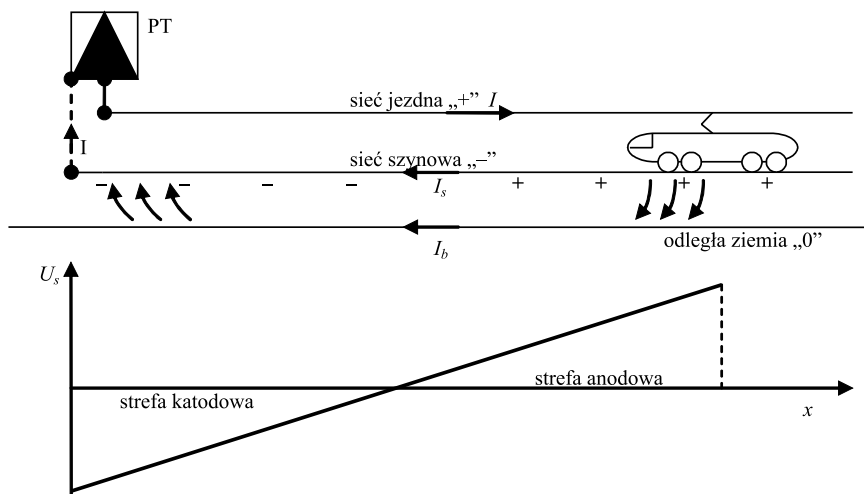
Obwód szynowy można przedstawić w postaci nieskończonej ilości elementarnych rezystancji wzdłużnych szyn r_s posiadających połączenie z ziemią za pomocą równomiernie rozłożonych rezystancji przejścia szyna–ziemia r_p (rys. 3).



Rys. 3. Elektryczny schemat zastępczy odcinka obwodu sieci szynowej o długości L

Fig. 3. Electrical equivalent scheme of section of return circuit L length

W miejscu, w którym prąd pobierany przez pociąg wpływa do szyn, tworzy się strefa anodowa. Szyny posiadają dodatni potencjał względem ziemi. Część prądu wskutek braku idealnej izolacji toru wpływa do ziemi i wraca z powrotem do szyn w miejscu przyłączenia kabli powrotnych. Prąd przepływający z ziemi do szyn powoduje, że tor posiada potencjał ujemny, a ziemia dodatni i jest to strefa katodowa (rys. 4).



Rys. 4. Uproszczony schemat sieci szynowej przy zasilaniu pojedynczego odbioru jednostronnie z podstacji trakcyjnej

Fig. 4. Simplified scheme of return circuit while powering a single load by traction substation operating in a single-side mode

Przebieg potencjału szyn względem ziemi dla wyidealizowanego przypadku z jednakowymi wartościami rezystancji przejścia i rezystancji wzdłużnych z odbiorem na końcu odcinka zasilania tworzy prostą. Szyny posiadają zerowy potencjał w środku odcinka zasilania, wartości napięć w miejscu odbioru i przyłączenia kabli powrotnych są sobie równe i różnią się znakami.

3.2. Awarie sieci powrotnych i ich wpływ na pojawiające się zagrożenia porażeniowe człowieka

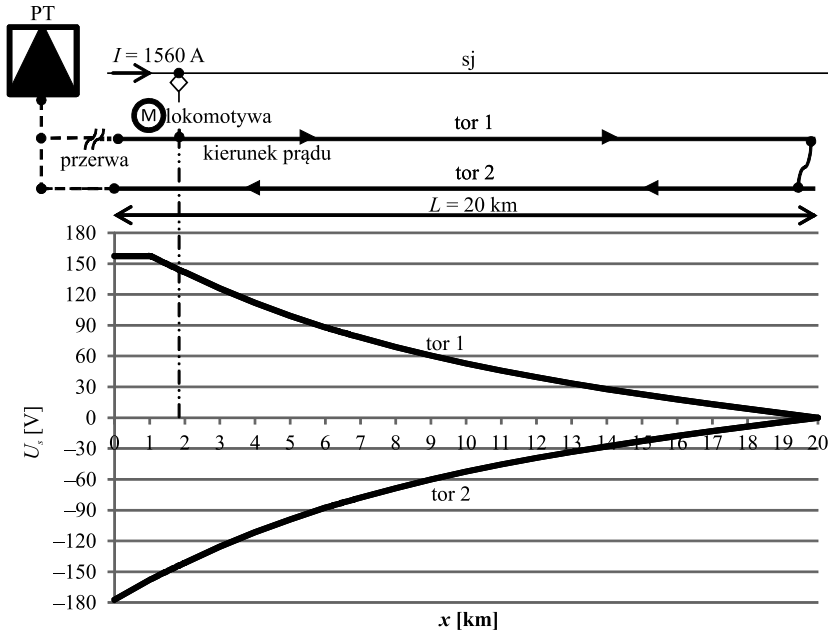
Sieć szynowa jest narażona na wiele uszkodzeń, które mogą w znaczący sposób pogorszyć jej parametry przewodności wzdłużnej. Obluzowanie się lub oderwanie łączników podłużnych, pęknięcia szyn, kradzieże dławików torowych na złączach izolowanych toru, brak połączeń obejściowych w czasie wykonywania prac naprawczych nawierzchni torowej, mogą spowodować brak ciągłości w obwodzie powrotnym. Skutkuje to pojawieniem się dużego napięcia szyny względem ziemi w momencie przejazdu lub rozruchu elektrycznego pojazdu trakcyjnego, co wiąże się ze zwiększonym zagrożeniem porażeniowym. Bardzo ważną rolę spełniają połączenia poprzeczne montowane w kolejowych sieciach powrotnych, które zmniejszają do minimum możliwość wystąpienia napięć rażeniowych.

Dla przykładu w przypadku przerwy w danym torze w pobliżu podstacji trakcyjnej i braku połączeń międzytorowych, prąd popłynie w kierunku sąsiedniej podstacji, a następnie wróci do podstacji zasilającej torem powrotnym. Droga prądu powrotnego może wynieść nawet 40 kilometrów. Łatwo zauważyć, że dla tak długiego odcinka wypadkowa rezystancja wzdłużna szyn jest duża [4]. W miejscu poboru prądu przez pojazd trakcyjny napięcie szyn względem ziemi może osiągać wartości rzędu kilkuset woltów. Stwarza to poważne zagrożenie porażeniowe. Podstacje trakcyjne wyposaża się w systemy ochrony ziemnozwarciowej, które monitorują napięcie pomiędzy ujemną szyną zbiorczą a ziemią. Przekroczenie różnicy potencjału 120 V skutkuje zadziałaniem wyłączników szybkich i wyłączeniem zasilania odcinka kolejowego. Również w takich przypadkach na wielkość napięć szyn względem ziemi ma duży wpływ rezystancja przejścia szyna–ziemia r_p . Z porażeniowego punktu widzenia najlepiej jest, aby rezystancja przejścia była jak najmniejsza, gdyż większa część prądu roboczego może popłynąć ziemią i zmniejszyć zagrożenie elektryczne do wartości bezpiecznych. Jest to niestety niezgodne z ochroną przed prądami błędzącymi, gdzie wymagana jest możliwie duża rezystancja przejścia w celu zmniejszenia udziału prądów płynących ziemią w stosunku do prądów płynących szynami. System uszynień grupowych, który obecnie wypiera indywidualny system uszynień (niezgodny z obowiązującymi normami), działa na zasadzie doziemiania odcinka szynowego. Mała rezystancja przejścia korzystnie wpływa na zmniejszenie niebezpiecznego potencjału szyn względem ziemi.

Szczególnie niebezpieczne jest pojawienie się przerwy dwustronnej w obwodzie powrotnym. Mogłoby się wydawać, że na takim odcinku silniki pojazdów trakcyjnych są pozbawione zasilania ze względu na obustronną przerwę w szynach – przewodzie odprowadzającym prąd. Jednak prądy mogą swobodnie przepływać ziemią, zwłaszcza jeżeli rezystancja przejścia r_p jest mała i nie powoduje, że urządzenia ochrony podnapięciowej instalowane w pojazdach trakcyjnych odłączą pojazd od zasilania z powodu spadku napięcia zasilającego poniżej wartości 2100 V. W takim przypadku szyny, które nie posiadają ciągłości z szynowym obwodem powrotnym, osiągną niebezpieczne napięcia względem ziemi. Również uszynienia indywidualne będą stwarzać dodatkowe zagrożenie. Wysokie napięcia szyn zostanie wyniesione na konstrukcje wsporcze sieci jezdnej znajdujące się w pewnej odległości od torów.

Wykresy przedstawione na kolejnych rysunkach (rys. 5, rys. 7) przedstawiają rozkład i wartości napięć pod wpływem obciążenia prądami roboczymi dla różnych sytuacji awaryjnych sieci powrotnej.

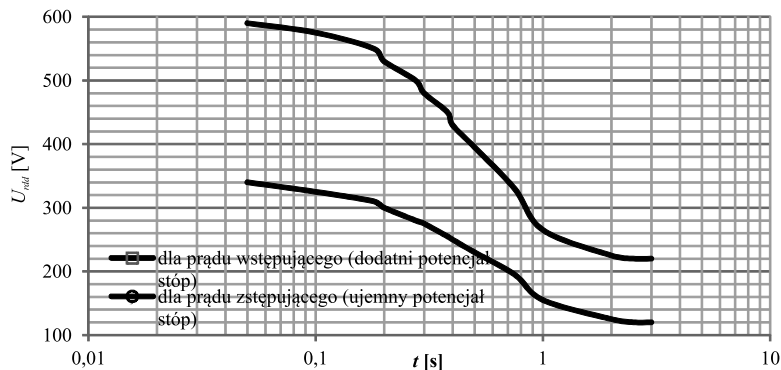
1. Linia dwutorowa zasilana jednostronnie o długości $L = 20$ km pozbawiona połączeń międzytorowych na znacznym odcinku torowiska z zerwanymi kablami powrotnymi z toru 1.



Rys. 5. Rozkład potencjału szyn U_s względem ziemi

Fig. 5. Rail voltage distribution U_s in relation to far-earth

W przypadku niezadziałania ochrony ziemnozwarciowej zainstalowanej w podstacji trakcyjnej, w opisanym powyżej stanie awaryjnym sieci powrotnej napięcia rażeniowe mają daleki zasięg. Brak podstawowych połączeń elektrycznych sieci powrotnej skutkuje pojawianiem się niebezpiecznych potencjałów wywołanych przepływem dużych prądów, zwłaszcza w trakcie rozruchu ciężkich lokomotyw towarowych. Człowiek znajdujący się na torach, który nie ma jakiegokolwiek kontaktu wzrokowego z pojawiającym się pociągiem i myśli, że jest bezpieczny, może zostać śmiertelnie porażony prądem podczas dotyku szyny bądź też konstrukcji wsporczej uszynionej bezpośrednio z torami. W zależności od tego, na którym torze będzie znajdowała się osoba, droga przepływu prądu rażeniowego może być inna. Dla toru 1 napięcia szyn względem ziemi, osiągają dodatnie wartości i przepływ prądu rażeniowego może zachodzić na drodze noga–noga lub ręka–noga. Na torze 2 szyna posiada potencjał ujemny względem ziemi a więc przepływ prądu rażeniowego zachodzi od stóp poprzez ręce lub poprzez nogi. Prąd wstępujący z porażeniowego punktu widzenia jest bardziej niebezpieczny dla człowieka, jak to już wcześniej zaznaczono.

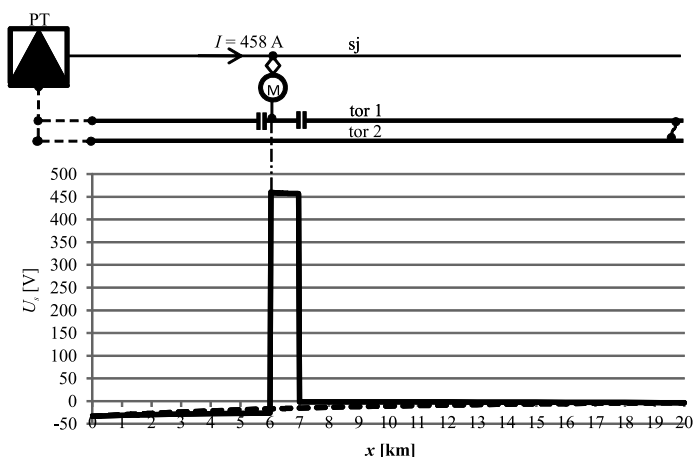


Rys. 6. Maksymalne dopuszczalne napięcie dotykowe U_{rdd} prądu stałego w funkcji czasu [8]

Fig. 6. Maximum admissible tactile voltage U_{rdd} of direct current in a function of time [8]

2. Linia dwutorowa zasilana jednostronnie o długości $L = 20$ km pozbawiona połączeń międzytorowych na znacznym odcinku torowiska z przerwą obustronną w torze 1.

Odcinek z obustronna przerwą (rys. 7) w momencie pojawienia się na nim ruszającego pociągu osiąga dodatnie wartości napięć względem ziemi, podczas gdy na pozostałej części sieci torowej napięcia utrzymują się na poziomie nieistwarzającym zagrożenia porażeniowego. W przypadku zastosowania uszynień indywidualnych zainstalowana ochrona ziemnozwarciowa w podstacji trakcyjnej może nie zadziałać, a wysokie wartości potencjału szyn zostają przenoszone na konstrukcje wsporcze i utrzymują się w czasie przejazdu pociągu. Osoba znajdująca się na zerwanym odcinku toru 1 lub dotykająca konstrukcji wsporczej w pobliżu tego odcinka jest narażona na porażenie prądem o bardzo dużym napięciu, znacznie przekraczającym wartości dopuszczalne.



Rys. 7. Rozkład potencjału szyn U_s względem ziemi (linia ciągła tor 1; linia przerywana tor 2)

Fig. 7. Rail voltage distribution U_s in relation to far-earth (solid line – track 1; dashed line – track 2)

4. Wnioski

Na podstawie wykonanej symulacji komputerowej z uwzględnieniem rzeczywistych parametrów sieci powrotnej oraz możliwych sytuacji awaryjnych torowiska kolejowego można wskazać miejsca szczególnych zagrożeń związanych z porażeniem elektrycznym dla osób, które mogą się w tych miejscach znaleźć.

Sieć szynowa przebiega w miejscach łatwo dostępnych dla ludzi. Jest ona częścią systemu zasilania trakcji kolejowej, i dlatego nie powinna powodować jakichkolwiek zagrożeń elektrycznych. Z tego względu, jak wykazała powyższa analiza, ważne jest zachowanie ciągłości obwodu powrotnego oraz niskiej rezystancji wzdłużnej na drodze prądów roboczych. Zastosowanie dodatkowych połączeń poprzecznych w torach zmniejsza wypadkową rezystancję sieci, a tym samym zmniejsza występowanie napięć zagrażających życiu człowieka w razie awarii.

Przestrzeganie obowiązujących przepisów dotyczących stanu technicznego torowisk dla linii zelektryfikowanych wydaje się (na chwilę obecną) wystarczającym warunkiem zapewniającym ich bezpieczną eksploatację w sensie zagrożeń elektrycznych. Uzasadnione jest zatem dokonywanie regularnych przeglądów sieci powrotnej w celu monitorowania stanu technicznego torowisk zarówno pod względem mechanicznym, jak i elektrycznym.

Literatura

- [1] Strojny J. (red.), Chrabąszcz I., Prusak J., Drapik S., *Trakcja elektryczna prądu stałego. Układy zasilania*, Dodatek do miesięcznika INPE, listopad 2009.
- [2] Głowacki K., Onderka E., *Sieci trakcyjne*, Emtrak, 2002.
- [3] Dziuba W., *Sieci powrotne i prądy błędzące*, Instytut Elektrotechniki, Warszawa 1995.
- [4] Kulhawik Z., *Budowa i utrzymanie sieci powrotnej w świetle norm europejskich*, Technika Transportu Szynowego 2005, nr 1-2, 74-77.
- [5] Mierzejewski L., Szelaż A., *Sieci powrotne zelektryfikowanego szynowego transportu miejskiego*, Technika Transportu Szynowego, 2005, nr 11, 56-65.
- [6] IEC/TR2 604791-1:1993 Effects of current on human beings and live Stock – Part 1: General aspects.
- [7] Gierlotka S., *Skutki rażenia prądem stałym*, Bezpieczeństwo Pracy, 2006, nr 9, 31-32.
- [8] Jabłoński W., *Podstawy ochrony przeciwporażeniowej w kolejowych sieciach trakcyjnych*, Wiadomości Elektrotechniczne 2009, nr 10, 41-46.
- [9] Musiał E., *Ochrona przeciwporażeniowa w obwodach prądu stałego*, Katedra Elektroenergetyki, Politechnika Gdańsk.
- [10] PN-EN 50122-1:2003 Zastosowanie kolejowe – Urządzenia stacjonarne – Część 1: Środki ochrony dotyczące bezpieczeństwa elektrycznego i uziemień.
- [11] Strzałka J., *Podstawowe wiadomości z zakresu bezpiecznej eksploatacji instalacji i urządzeń elektroenergetycznych*, Konspekt, Kraków 2008.