

Środki ochrony przeciwporażeniowej stosowane na obszarach kolejowych, wymagania i badania skuteczności działania

Włodzimierz KRUCZEK¹

Streszczenie

W artykule dokonano przeglądu środków ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej urządzeń niskiego napięcia i powyżej 1 kV, stosowanych na obszarach kolejowych i w bezpośredniej strefie oddziaływania sieci trakcyjnej i pantografu. Opisano zakres badań i wymagania wynikające z norm ochrony przeciwporażeniowej. Przedstawiono możliwości badawcze Zakładu Elektroenergetyki Instytutu Kolejnictwa w zakresie sprawdzania skuteczności działania zastosowanej ochrony przeciwporażeniowej.

Słowa kluczowe: ochrona przeciwporażeniowa, strefa sieci jezdnej i pantografu

1. Wstęp

Ochrona przeciwporażeniowa jest to zespół środków technicznych oraz organizacyjnych i prawnych mających na celu niedopuszczenie do przepływu przez organizm człowieka lub zwierzęcia prądu o wartości groźnej dla życia. Ze względu na zastosowane środki techniczne wyróżnia się:

1. Ochronę przed dotykiem bezpośrednim, zwaną podstawową. Ochrona ta polega na zapewnieniu takich środków technicznych, które uniemożliwią dotknięcie do części czynnych będących w normalnych warunkach pracy pod napięciem. Ochronę tę zapewnia się głównie przez: izolowanie części czynnych i utrudnienie dostępu. Stosowane są również napięcia bezpieczne: SELV (*Safety Extra Low Voltage*) lub PELV (*Protected Extra Low Voltage*), ten środek ochrony przeciwporażeniowej zaliczany jest również do ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej.
2. Ochronę przed dotykiem pośrednim, zwaną dodatkową. Ochrona ta polega na zastosowaniu rozwiązań technicznych gwarantujących takie działanie urządzenia elektrycznego, że części przewodzące dostępne, które w normalnych warunkach pracy nie znajdują się pod napięciem np.: obudowy rozdzielnic, korpusy silników czy w przypadku trakcji elektrycznej słupy trakcyjne, lub pudła wagonów lub elektrycznych pojazdów trakcyjnych, podczas stanów awaryjnych (w przypadku pojedynczego uszkodzenia), czyli np. po uszkodzeniu izolacji i dotknięciu przez człowieka części przewodzącej, nie będą zdolne do porażenia prądem elektrycznym. Każda część przewodząca urządzenia elektrycznego, która może być dotknięta przez człowieka i która w warunkach awaryjnych, może znaleźć się pod napię-

ciem w wyniku uszkodzenia musi podlegać ochronie przeciwporażeniowej dodatkowej.

Niniejszy artykuł stanowi przegląd realizowanych sposobów ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej w różnych systemach sieciowych i energetycznych stosowanych na kolei, sposoby sprawdzenia tej ochrony oraz uwagi na podstawie doświadczeń autora przy jej sprawdzaniu.

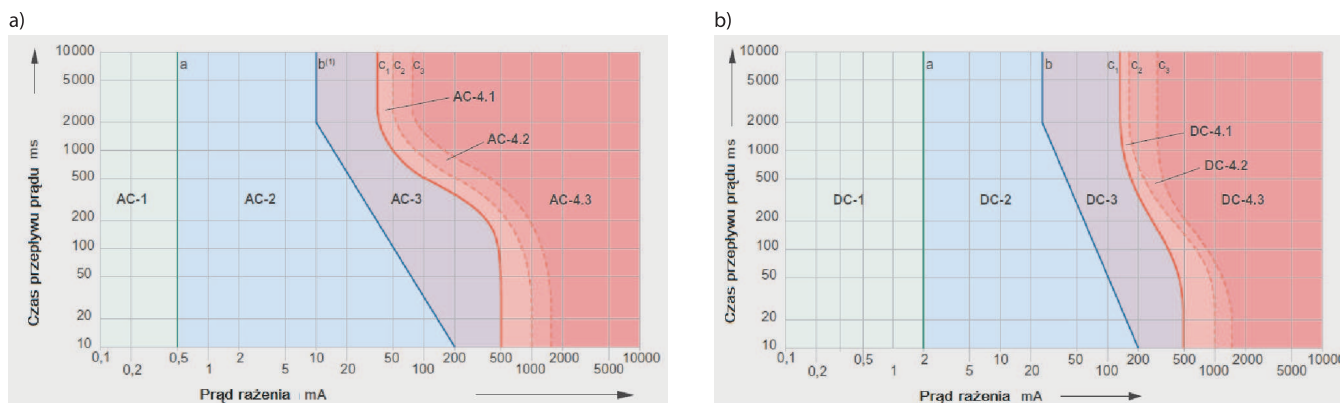
2. Realizacja ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej

Rodzaj zastosowanej ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej zależy od takich czynników, jak:

- rodzaj i poziom napięcia instalacji, w której ochrona jest realizowana,
- rodzaj chronionych urządzeń elektrycznych,
- układ sieci elektrycznej,
- przeznaczenie pomieszczenia, budynku lub innego obiektu, w którym jest zastosowana ochrona przeciwporażeniowa.

Zadaniem projektanta jest zaprojektowanie ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej, skutecznej w każdych warunkach. Mówiąc o skuteczności ochrony przeciwporażeniowej należy odnieść się do skutków przepływu prądu przez organizm ludzki. Skutki te są scharakteryzowane przez dwa podstawowe czynniki: czas rażenia, i prąd rażenia. Strefy czasowo-prądowe skutków fizjologicznych prądów rażeniowych przemennych i stałych według IEC 60479-1 [1] przedstawiono na rysunku 1. Opis skutków rażenia przedstawiono w tablicy 1.

¹ Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Zakład Elektroenergetyki; e-mail: wkruczek@ikolej.pl.



Rys. 1. Strefy czasowo-prądowe skutków fizjologicznych prądów rażeniowych: a) przemiennych, b) stałych IEC 60479-1 [1]

Tablica 1

Fizjologiczne skutki przepływu prądu przemiennego i stałego przez ciało człowieka IEC 60479-1 [1]

Strefy czasowo-prądowe	Fizjologiczne skutki przepływu prądu przemiennego przez ciało człowieka	Strefy czasowo-prądowe	Fizjologiczne skutki przepływu prądu stałego przez ciało człowieka
AC-1	Zwykle brak reakcji.	DC-1	Możliwe uczucie kłucia podczas załączania i przerywania przepływu prądu.
AC-2	Zwykle brak szkodliwych skutków fizjologicznych.	DC-2	Prawdopodobne mimowolne skurcze mięśni, zwłaszcza podczas załączania i przerywania przepływu prądu. Jednak bez żadnych szkodliwych efektów fizjologicznych.
AC-3	<ul style="list-style-type: none"> Zwykle brak uszkodzeń organicznych. Prawdopodobieństwo pojawienia się skurczów mięśni i trudności w oddychaniu przy czasach rażenia dłuższych od 2 s. Odwracalne zakłócenia przy powstawaniu bodźców i pobudzeniu serca. Możliwość powstawania przejściowego migotania przedsionków serca i przejściowego zatrzymania pracy serca (zakłócenia wzrastające wraz ze wzrostem prądu). 	DC-3	Silne reakcje mimowolne mięśni. Powstawanie odwracalnych zaburzeń w sercu, jednak bez uszkodzeń organicznych.
AC-4	<p>Niebezpieczeństwo wystąpienia skutków patofizjologicznych takich, jak:</p> <ul style="list-style-type: none"> zatrzymanie pracy serca, zatrzymanie oddechu, poważne oparzenia (niebezpieczeństwo rośnie wraz ze wzrostem prądu). AC-4.1: Prawdopodobieństwo migotania komór serca wzrasta do 5%. AC-4.2: Prawdopodobieństwo migotania komór serca wzrasta od 50%. AC-4.3: Prawdopodobieństwo migotania komór serca wzrasta powyżej 50%. 	DC-4	<p>Mogą wystąpić skutki patofizjologiczne takie, jak zatrzymanie akcji serca, zatrzymanie oddychania, poparzeń i uszkodzenie komórek. Prawdopodobieństwo wystąpienia migotania komór serca wzrasta wraz z czasem rażenia:</p> <ul style="list-style-type: none"> DC-4.1: Prawdopodobieństwo migotania komór serca wzrasta do 5%. DC-4.2: Prawdopodobieństwo migotania komór serca wzrasta od 50%. DC-4.3: Prawdopodobieństwo migotania komór serca wzrasta powyżej 50%.

Jak wynika z diagramów przedstawionych na rysunku 1, ochrona przeciwporażeniowa dodatkowa może być osiągnięta przez:

- całkowite zapobieżenie przepływowi prądu przez ciało człowieka spowodowanego uszkodzeniem izolacji podstawowej urządzenia,

- ograniczenie do niegroźnej wartości prądu przepływającego przez ciało człowieka spowodowanego uszkodzeniem izolacji podstawowej urządzenia,
- ograniczenie do niegroźnej wartości czasu trwania przepływu prądu przez ciało człowieka spowodowanego uszkodzeniem izolacji podstawowej urządzenia.

2.1. Środki ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej w sieciach niskiego napięcia

2.1.1. Samoczynne wyłączenia zasilania

Samoczynne wyłączenie zasilania jest najczęściej wykorzystywanym środkiem ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej. W zależności od zastosowanego układu sieciowego samoczynne wyłączenie zasilania w układach sieciowych niskiego napięcia jest realizowane za pomocą aparatów elektrycznych takich, jak bezpieczniki, wyłączniki nadmiarowo-prądowe lub wyłączniki różnicowo-prądowe. Maksymalne czasy wyłączenia, zależne od zastosowanego układu sieciowego, są podane w normie PN-HD 60364-4-41:2009 (tablica 2).

W układzie sieciowym TN-C w urządzeniach do 1 kV samoczynne wyłączenia zasilania może być realizowane dzięki tzw. zerowaniu, które polega na połączeniu wszystkich dostępnych części przewodzących z przewodem ochronno-neutralnym PEN. Na rysunku 2 przedstawiono zasadę zerowania.

Warunek skuteczności ochrony przeciwporażeniowej wyraża się zależnością:

$$I_a \leq \frac{0,8 \cdot U_0}{Z_s} \quad (1)$$

gdzie:

I_a – wartość prądu przetężeniowego w A zapewniająca samoczynne zadziałanie urządzenia w wymaganym czasie (np. dla napięcia w stosunku do ziemi 230 V jest to czas 0,4 s, lub 5 s w obwodach odbiorczych, do których są przyłączane tylko odbiorniki stałe). Prąd ten należy odczytać z charakterystyki czasowo-prądowej zastosowanego aparatu wyłączającego;
 U_0 – napięcie w przewodzie liniowym w stosunku do ziemi w V;
 $0,8$ – współczynnik uwzględniający wzrost rezystancji przewodów powodowany prądem zwarciovym;
 Z_s – impedancja pętli zwarciovowej w Ω , obejmująca źródło zasilania, przewód liniowy do miejsca zwarcia i przewód ochronno-neutralny PEN od miejsca zwarcia do źródła zasilania. Impedancję pętli zwarcia należy zmierzyć i na tej podstawie określić skuteczność ochrony przeciwporażeniowej.

Tablica 2

Maksymalne czasy wyłączenia dla normalnych warunków środowiskowych [10]

System	50 V < $U_0 \leq 120$ V		120 V < $U_0 \leq 230$ V		230 V < $U_0 \leq 400$ V		$U_0 > 400$ V	
	a.c.	a.c.	a.c.	d.c.	a.c.	d.c.	a.c.	d.c.
TT	0,3	– ⁽¹⁾	0,2	0,4	0,07	0,2	0,04	0,1
TN i IT ⁽²⁾	0,8	– ⁽¹⁾	0,4	5	0,2	0,4	0,1	0,1

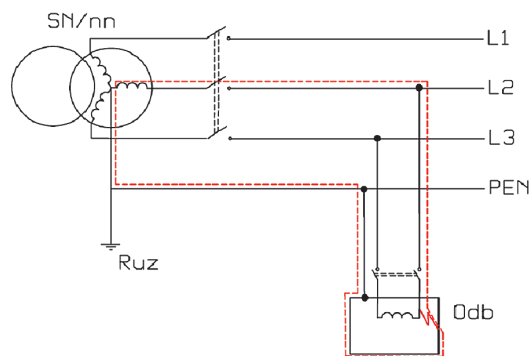
Objaśnienia:

U_0 – nominalne napięcie a.c. lub d.c. przewodu liniowego względem ziemi,

TT – układ sieciowy niskiego napięcia charakteryzujący się bezpośrednim połączeniem punktu neutralnego transformatora SN/nn z ziemią i bezpośrednim połączeniem części przewodzących dostępnych z ziemią,

TN – układ sieciowy niskiego napięcia charakteryzujący się bezpośrednim połączeniem punktu neutralnego transformatora SN/nn z ziemią i bezpośrednim połączeniem części przewodzących dostępnych z uziemionym punktem neutralnym transformatora SN/nn,

IT – układ sieciowy niskiego napięcia charakteryzujący się brakiem bezpośredniego połączenia punktu neutralnego transformatora z ziemią i bezpośrednim połączeniem części przewodzących dostępnych z ziemią, ⁽¹⁾ – wyłączenie może być wymagane z innych przyczyn niż ochrona przeciwporażeniowa, ⁽²⁾ – dla podwójnego zwarcia z ziemią.



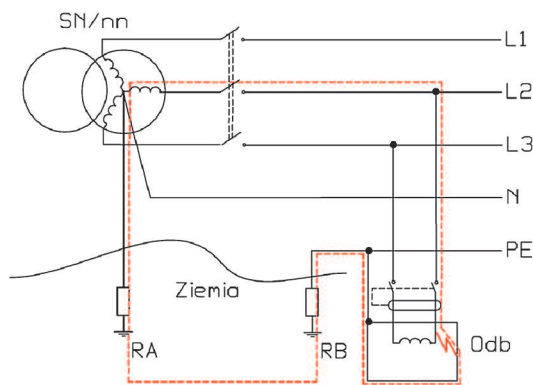
Rys. 2. Zasada zerowania i przepływ prądu zwarciovego podczas uszkodzenia izolacji w układzie sieciowym TN-C [opracowanie własne]

Zgodnie z wymaganiami normy PN-HD 60364-5-54:2011 [11] przewód ochronno-neutralny w układzie sieciowym TN-C powinien mieć minimalny przekrój nie mniejszy od 10 mm² Cu, lub 16 mm² Al. W związku z tym układ sieciowy TN-C może być aktualnie stosowany tylko w sieciach elektroenergetycznych, ze względu na wymagany przekrój przewodu PEN, wyklucza się więc budowę nowych instalacji w budynkach w układzie sieciowym TN-C. Ponadto w układzie sieciowym TN-C nie można stosować wyłączników różnicowo-prądowych jako aparatów samoczynnie wyłączających zasilanie, co również deklasuje ten układ sieciowy w instalacjach odbiorczych niskiego napięcia.

Stosowany obecnie w większości instalacji odbiorczych układ sieciowy TN-S, lub TN-C-S rozdziela funkcję przewodu ochronno-neutralnego na dwa przewody: przewód ochronny PE i przewód neutralny N, umożliwia to stoso-

wanie w tych układach sieciowych wyłączników różnicowo-prądowych (RCD). W układzie sieciowym TN-S, TN-C-S warunek skuteczności ochrony przeciwporażeniowej wyraża się zależnością taką samą jak w układzie sieciowym TN-C z taką różnicą, że przy zastosowaniu wyłącznika RCD, prąd powodujący samoczynne zadziałanie urządzenia zabezpieczającego w wymaganym czasie I_a jest prądem różnicowym zapewniającym zadziałanie wyłącznika RCD.

W układzie sieciowym TT wszystkie części przewodzące dostępne i chronione przez ten sam aparat zabezpieczający, powinny być połączone przewodem ochronnym PE i połączone do wspólnego uziomu. W układzie tym samoczynne wyłączenie zasilania jest realizowane dzięki uziemieniu ochronnemu. Na rysunku 3 przedstawiono zasadę uziemienia odbiornika w układzie sieciowym TT.



Rys. 3. Zasada uziemienia i przepływ prądu zwarcia podczas uszkodzenia izolacji w układzie sieciowym TT [opracowanie własne]

Ochronę przeciwporażeniową w układzie sieciowym TT można uznać za skuteczną, gdy spełniony jest jeden z następujących warunków:

- 1) jeżeli aparatem samoczynnie wyłączającym zasilanie jest wyłącznik RCD:

$$R_A \cdot I_{\Delta n} \leq U_L \quad (2)$$

gdzie:

R_A – suma rezystancji uziomu i przewodu ochronnego łączącego części przewodzące dostępne z uziemieniem,

$I_{\Delta n}$ – znamionowy prąd różnicowy wyłącznika RCD,

U_L – napięcie dotykowe dopuszczalne długotrwale, dla warunków normalnych 50 V,

- 2) jeżeli aparatem samoczynnie wyłączającym zasilanie jest wyłącznik nadmiarowo-prądowy:

$$Z_S \cdot I_a \leq U_0 \quad (3)$$

gdzie:

Z_S – impedancja pętli zwarcia w Ω obejmująca źródło zasilania, przewód liniowy do miejsca zwarcia, przewód ochronny części przewodzących, przewód uziemiający, impedancję uziomu instalacji i źródła zasilania,

I_a – wartość prądu przetężeniowego w A zapewniająca samoczynne zadziałanie urządzenia w wymaganym czasie,

U_0 – napięcie w przewodzie liniowym w stosunku do ziemi w V.

Z przedstawionych zależności wynika, że aparatem zapewniającym samoczynne wyłączenie zasilania może być wyłącznik nadmiarowo-prądowy lub wyłącznik RCD, przy czym uzyskanie odpowiednio małej impedancji uziemienia wymaganej dla wyłącznika nadmiarowo-prądowego często jest bardzo trudne lub nawet niemożliwe zwłaszcza w strefie oddziaływania trakcji elektrycznej. W obszarze takim grunt często jest kamienisty składający się w dużej ilości z podsypki, w związku z tym jedynym rozwiązaniem zapewniającym skuteczność ochrony przeciwporażeniowej jest stosowanie wyłączników różnicowo-prądowych.

Do pomiaru pętli zwarcia w instalacjach niskiego napięcia, testowania wyłączników RCD, pomiaru czasu wyłączenia i prądu różnicowego zalecane jest stosowanie mikroprocesorowych mierników instalacji elektrycznych. Zakład Elektroenergetyki Instytutu Kolejnictwa wykonuje takie pomiary wykorzystując do tego celu mikroprocesorowe mierniki METREL 61557 i METREL 3102.

Podczas sprawdzania skuteczności ochrony przeciwporażeniowej instalacji w obiektach, w których aktualne wymagania nie są spełnione, należy odnieść się do wymagań z czasu wykonywania instalacji. Stosuje się tzw. regułę ochrony zastanej. Jednakże jakkolwiek modernizacja instalacji powinna być tak wykonana, żeby były spełnione aktualnie obowiązujące normy w tym zakresie.

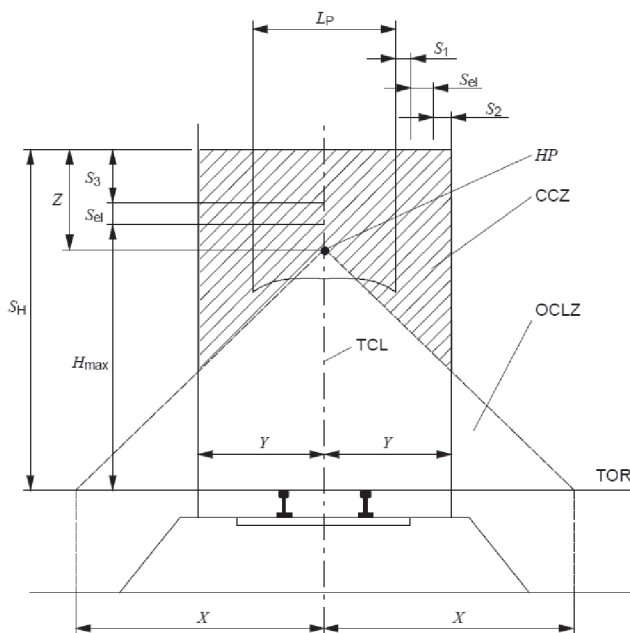
Samoczynne wyłączenia zasilania w instalacjach niskiego napięcia znajdujących się w strefie oddziaływania trakcyjnego

Urządzenia elektryczne pracujące wzdłuż szlaku kolejowego, np. szafy sygnalizacji przejazdowych, kontenery samoczynnej blokady liniowej lub inne urządzenia sterowania ruchem kolejowym często są umieszczone w bezpośredniej strefie oddziaływania trakcji elektrycznej, dlatego stosowane w nich środki ochrony przeciwporażeniowej muszą być tak dobrane, aby zapewniały skuteczny poziom ochrony zagrożeń elektrycznych, pochodzących od systemu zasilania trakcji elektrycznej, jak również od instalacji niskiego napięcia zasilającej te urządzenia. Na rysunku 4 przedstawiono strefę górnej sieci jezdnej i strefę pantografu, zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 50122-1 [4].

Przedstawione na rysunku 4 odległości odnoszą się do sieci trakcyjnej zarządzanej przez PKP PLK [3], według wytycznych normy PN-EN 50122-1 [4], odległość X wynosi 4 m, odległość Y i Z 2 m.

Jeżeli sieć trakcyjna jest wprowadzona do budynku, np. do warsztatu obsługi, należy uwzględnić urządzenia konstrukcyjnie związane siecią trakcyjną, które są pod napięciem oraz zakładając, że budowla ma konstrukcję metalową należy przyjąć, że strefą oddziaływania sieci trakcyjnej i pantografu w takim warsztacie obsługi jest cały budynek.

W strefie oddziaływania sieci trakcyjnej wymaga się zastosowanie odpowiednio dostosowanego układu zasilania instalacji niskiego napięcia.

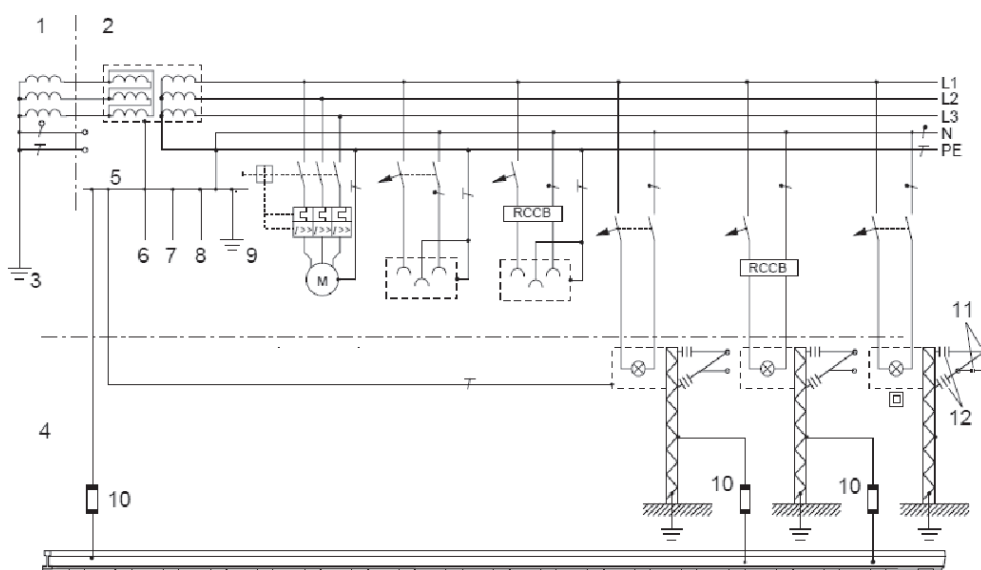


Rys. 4. Strefa górnej sieci jezdnej i strefa pantografu: TOR – poziom główki szyny, HP – najwyższy punkt górnej sieci jezdnej, OCLZ – strefa górnej sieci jezdnej, CCZ – strefa pantografu, TCL – oś toru, X – maksymalny zakres strefy górnej sieci jezdnej w poziomie szyn (w warunkach polskich 5 m według It2) [3], Y – maksymalny zakres strefy pantografu (w warunkach polskich 1,7 m według It2) [3], Z – odległość pomiędzy HP a górną granicą strefy pantografu (w warunkach polskich 0,7 m według It2) [3]

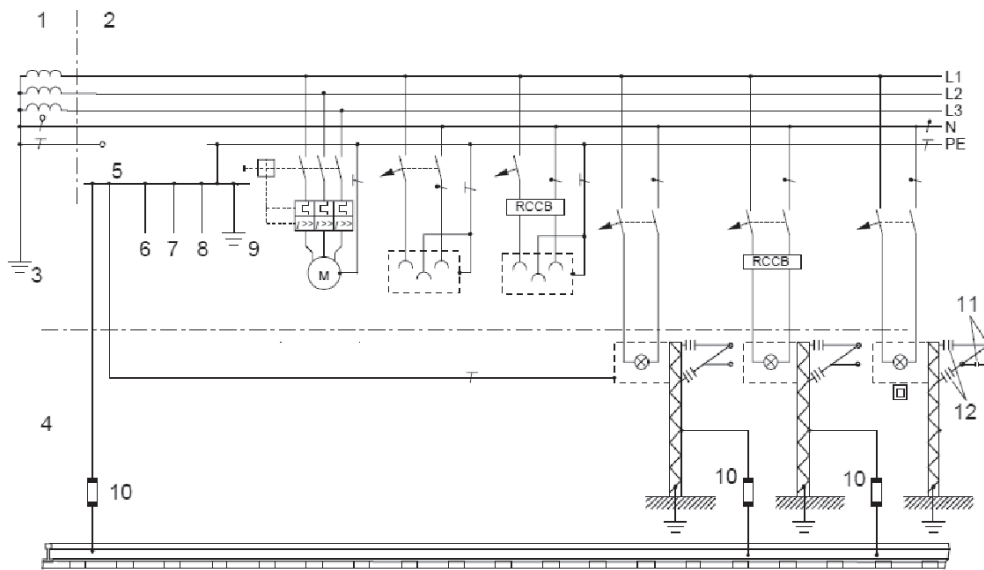
Większość urządzeń elektrycznych umieszczonych wzdłuż zelektryfikowanego szlaku kolejowego zasilana jest

w układzie sieciowym TT, gdyż zasilanie w tym układzie nie wymaga stosowania transformatora ochronnego pomiędzy częścią energetyki zawodowej i częścią kolejową. Natomiast specyfika układu TT wymaga uziemienia części dostępnych mogących znaleźć się pod napięciem (najczęściej metalowych obudów szaf lub kontenerów przytorowych). Od strony systemu zasilania trakcyjnego w normalnych warunkach pracy żadna część szyn jezdnych nie może być połączona bezpośrednio z jakąkolwiek uziemioną konstrukcją. System zasilania trakcyjnego 3 kV DC, wymaga żeby szyny jezdne były izolowane od ziemi. PN-EN 50122-2 [5]. W związku z tym do zapewnienia ochrony przeciwporażeniowej od napięć trakcyjnych wymaga się, żeby konstrukcje metalowe w strefie sieci trakcyjnej nie były uszyniane bezpośrednio lecz przez ograniczniki niskonapięciowe VLD spełniających wymagania normy PN-EN 50526-2:2008 [8]. Przykład zastosowania środków ochrony dostępnych części przewodzących układu zasilania TN-S dla systemu trakcyjnego DC przedstawiono na rysunku 5, natomiast układu zasilania TT na rysunku 6.

Samoczynne wyłączenie zasilania w warunkach kolejowych jest stosowane również w instalacjach pokładowych niskiego napięcia wagonów pasażerskich. Norma PN-EN 50153:2014-11 [6] stawia wymóg zastosowania dodatkowej ochrony przeciwporażeniowej dostępnych dla pasażerów, gniazd 230 V AC przez samoczynne wyłączenia zasilania za pomocą wyłącznika różnicowo-prądowego. Każdy wagon podobnie jak inny obiekt, w którym jest wykonana instalacja elektryczna i istnieje niebezpieczeństwo porażenia musi być sprawdzony pod względem skuteczności zastosowanej ochrony przeciwporażeniowej.



Rys. 5. Przykład zastosowanych środków ochronnych dla układu TN w zastosowaniu dla kolejowego systemu trakcyjnego DC PN-EN 50122-1[4]: 1) sieć elektroenergetyczna, 2) sieć kolejowa, 3) uziemienie po stronie energetyki zawodowej, 4) strefa sieci trakcyjnej i odbieraka, 5) zbiorcza szyna wyrównawcza, 6) instalacja wodna i gazowa, 7) ogrzewanie, 8) zabezpieczenie odgromowe, 9) uziemienie po stronie konstrukcji kolejowej, 10) ogranicznik niskonapięciowy VLD, 11) pierwsza izolacja, 12) druga izolacja [opracowanie własne]



Rys. 6. Przykład zastosowanych środków ochronnych dla układu TT w zastosowaniu dla kolejowego systemu trakcyjnego DC PN-EN 50122-1 [1]: 1) sieć elektroenergetyczna, 2) sieć kolejowa, 3) uziemienie po stronie energetyki zawodowej, 4) strefa sieci jezdnej i odbieraka, 5) zbiorcza szyna wyrównawcza, 6) instalacja wodna i gazowa, 7) ogrzewanie, 8) zabezpieczenie odgromowe, 9) uziemienie po stronie konstrukcji kolejowej, 10) ogranicznik niskonapięciowy VLD-F, 11) pierwsza izolacja, 12) druga izolacja [opracowanie własne]

2.1.2. Izolacja podwójna lub wzmocniona

Ten środek dodatkowej ochrony przeciwporażeniowej polega na zastosowaniu izolacji podwójnej lub wzmocnionej pomiędzy częściami czynnymi a częściami dostępnymi. Stosuje się ją do urządzeń zmiennoprądowych i stałoprądowych niezależnie od wysokości napięcia zasilania. Do części przewodzących dostępnych objętych izolacją podwójną lub wzmocnioną nie można przyłączać przewodów ochronnych i uziemiających. Urządzenia takie powinny być oznaczone symbolem \square i uznaje się za spełniające wymagania dodatkowej ochrony przeciwporażeniowej jeżeli są wykonane zgodnie z wymaganiami właściwych norm. Urządzenia z izolacją podwójną lub wzmocnioną są urządzeniami klasy ochronności II. Ta klasa ochronności stosowana jest przede wszystkim w wszelkiego rodzaju elektroinstalacjach. Ma zastosowanie również w oświetleniu zewnętrznym. W warunkach kolejowych ten środek ochrony dodatkowej powinien być stosowany głównie w oświetleniu lub monitoringu terenów kolejowych z masztów.

W oświetleniu zewnętrznym przy zastosowaniu słupów nieprzewodzących, nie wymaga się stosowania ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej. Przy zastosowaniu słupów przewodzących, II klasę ochronności można uzyskać przez zastosowanie złączy izolowanych w komorze słupa, zastosowanie opraw oświetleniowych wykonanych w II klasie ochronności i prowadzeniu przewodów we wnęce słupa i wysięgnika w giętkiej rurze ochronnej na całej długości. Taki słupek oświetleniowy zgodnie z PN-HD 60364-7-714:2012 [12] należy traktować jako całe urządzenie równorzędne klasy ochronności II. W takim przypadku do słupa nie można przyłączać przewodu

ochronnego i nie ma potrzeby takiego słupa uziemiać, co wydatnie obniża koszty.

W warunkach kolejowych z nieznanymi przyczynami w oświetleniu terenów kolejowych zgodnie z art. 3 [2] tego środka ochrony przeciwporażeniowej nie przewidziano.

2.1.3. Separacja elektryczna

Przy tym środku ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej, ochrona jest zapewniona przez odseparowanie obwodu, urządzenia chronionego od innych obwodów i od ziemi. Odseparowanie uzyskuje się przez zastosowanie transformatora separacyjnego lub źródła zapewniającego taki poziom bezpieczeństwa, jaki zapewnia transformator separacyjny, np. przetwornica z uzwojeniami zapewniającymi równoważną izolację. Separowany obwód powinien być zasilany napięciem nie większym jak 500 V. Części czynne urządzenia elektrycznego chronionego przez separację nie mogą być połączone z żadnym punktem innego obwodu, ziemią i przewodem ochronnym. Separację elektryczną zaleca się stosować do jednego odbiornika. Przy większej liczbie odbiorników konieczne jest zastosowanie izolowanych, nieuziemionych przewodów wyrównawczych, łączących dostępne części przewodzące.

W warunkach kolejowych, ochrona przeciwporażeniowa przez separację elektryczną jest stosowana w przekładnikowniach, w układach zasilania systemów sterowania ruchem kolejowym. Może być również stosowana w tabory kolejowym przy zasilaniu pojedynczych gniazd 230 V, niedostępnych dla podróżnych, np. w kabinach maszynisty.

Kontrola stanu ochrony za pomocą separacji ochronnej pojedynczego obwodu zasilającego jeden odbiornik, pole-

ga na sprawdzeniu ciągłości elektrycznej obwodu separowanego oraz na pomiarze rezystancji izolacji pomiędzy:

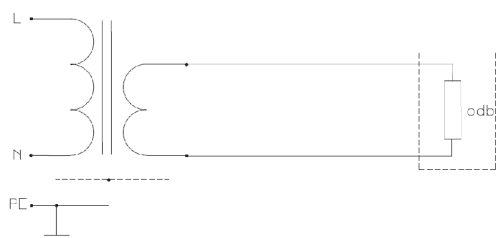
- częściami czynnymi obwodu separowanego a częściami czynnymi innych obwodów,
 - częściami czynnymi obwodu separowanego a ziemią.
- Wartość rezystancji izolacji powinna przekraczać 1 MΩ.

2.1.4. Zastosowanie niskiego napięcia SELV lub PELV

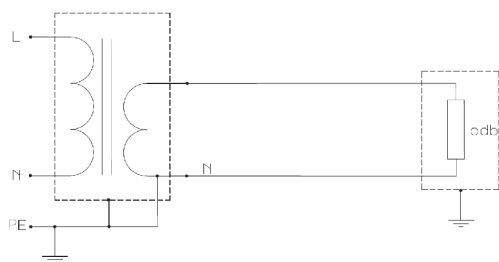
SELV (obwód o napięciu znamionowym bardzo niskim), PELV (obwód o napięciu znamionowym bardzo niskim, z uziemieniem roboczym). Te środki ochrony zaliczane są do ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej i podstawowej. Ochrona polega na:

- 1) ograniczeniu napięcia do górnej granicy zakresu I, to jest 50 V AC lub 120 V DC;
- 2) separacji ochronnej obwodu SELV lub PELV od wszystkich pozostałych obwodów.

Zasadę ochrony przeciwporażeniowej przy zastosowaniu bardzo niskiego napięcia SELV przedstawiono na rysunku 7, przy zastosowaniu bardzo niskiego napięcia z uziemieniem roboczym PELV przedstawiono na rysunku 8. Zastosowany transformator musi spełniać wymagania normy PN-EN 61558-2-6:2009 [9].



Rys. 7. Zasada ochrony przeciwporażeniowej przy zastosowaniu SELV [opracowanie własne]



Rys. 8. Zasada ochrony przeciwporażeniowej przy zastosowaniu PELV [opracowanie własne]

W warunkach kolejowych ochrona przeciwporażeniowa przez zastosowanie obwodów SELV, PELV jest przede wszystkim stosowana w sygnalizatorach przejazdowych, napędach rogatkowych.

Sprawdzenie skuteczności ochrony obwodu SELV polega na sprawdzeniu ciągłości przewodów i sprawdzeniu separacji części czynnych obwodu SELV od części czynnych innych obwodów i od ziemi, przez pomiar rezystancji izola-

cji pomiędzy częściami czynnymi obwodu SELV a częściami czynnymi innych obwodów i częściami czynnymi obwodu SELV a ziemią.

Sprawdzenie skuteczności ochrony obwodu PELV polega na sprawdzeniu ciągłości przewodów i sprawdzeniu separacji części czynnych obwodu PELV od części czynnych innych obwodów, przez pomiar rezystancji izolacji pomiędzy częściami czynnymi obwodu PELV a częściami czynnymi innych obwodów.

Napięcie pomiarowe powinno wynosić 250 V DC a wartość rezystancji izolacji powinna być większa od 0,5 MΩ.

2.2. Środki ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej dla urządzeń o napięciu wyższym od 1 kV

W ochronie przeciwporażeniowej dodatkowej urządzeń o napięciu wyższym od 1 kV, punktem wyjścia są również pierwotne kryteria bezpieczeństwa przedstawione na rysunku 1. Na przykład w instalacji niskiego napięcia, które w stosunku do ziemi wynosi 230 V, człowiek będzie poddany rażeniu przyjmując rezystancję ciała człowieka na poziomie 1000 Ω, przez rażonego popłynie prąd rażenia rzędu 230 mA. Jest to strefa AC-3 na rysunku 1a). Jeżeli samoczynne wyłączenie napięcia nastąpi szybko, np. przez wyłącznik różnicowo-prądowy w czasie do 200 ms, osobie rażonej nic złego nie powinno się stać. Inaczej wygląda sprawa z napięciami powyżej 1 kV. Na przykład, jeżeli człowiek zostanie poddany rażeniu od napięcia trakcyjnego 3 kV DC przyjmując rezystancję ciała człowieka na poziomie 1000 Ω, przez rażonego popłynie prąd rażenia rzędu 3 A. Jest to strefa DC-4.3 na rysunku 1b). Nawet najszybsze wyłączenie zasilania w czasie do 10 ms niewiele pomoże osobie rażonej takim napięciem, a prawdopodobieństwo migotania komór serca wzrośnie powyżej 50%. Dlatego ochrona przeciwporażeniowa dodatkowa urządzeń instalacji o napięciu wyższym od 1 kV jest uzyskiwana przez ograniczenie napięć rażeniowych do bezpiecznego poziomu. W instalacjach i urządzeniach AC jest to uziemienie ochronne, w systemach zasilania trakcyjnego DC jest to uszynienie.

2.2.1. Uziemienie w instalacjach, urządzeniach powyżej 1 kV AC

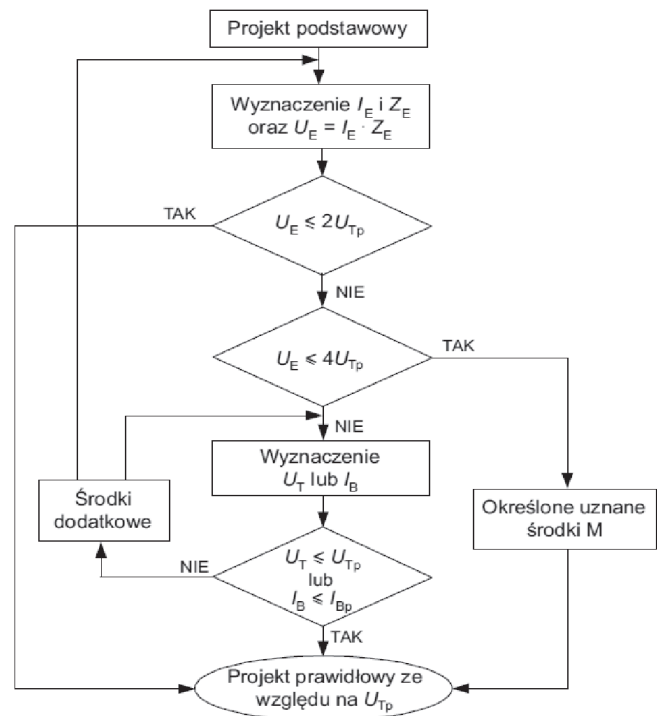
Ograniczenie napięć rażeniowych dotykowych w urządzeniach pracujących na napięcie powyżej 1 kV w systemach prądu zmiennego jest uzyskiwane poprzez uziemienie ochronne. Uziemienie to powinno być o takim ułożeniu, konfiguracji i rezystancji, aby spodziewane napięcie dotykowe rażenia nie przekraczało wartości dopuszczalnych, a przez to ewentualny prąd rażeniowy nie był groźny dla życia i zdrowia człowieka. Inne środki są stosowane tylko w pewnych przypadkach jako środki uzupełniające do uziemienia ochronnego. Każde urządzenie elektroenergetyczne pracujące na napięcie powyżej 1 kV AC powinno być połączone z uziomem lub z głównym przewodem uziemiającym za pomocą oddzielnego przewodu uziemiającego. Nie dopuszcza się szeregowego łączenia uziemiających urządzeń.

Sprawdzenie skuteczności ochrony przeciwporażeniowej poprzez uziemienie polega na sprawdzeniu ciągłości połączeń przewodów uziemiających z uziemem, pomiarze rezystancji uziemienia i pomiarze dotykowych napięć rażenia. Uziemienie powinno być tak wykonane, aby w miejscach, w których często mogą przebywać ludzie i występuje zagrożenie porażeniowe, nie były przekroczone dopuszczalne napięcia dotykowe rażeniowe i napięcia krokowe rażeniowe.

Pomiary rezystancji uziemienia i napięć dotykowych powinny być wykonane przy wymuszeniu prądu uziomowego nie mniejszego niż 20% największej wartości spodziewanego prądu jednofazowego zwarcia z ziemią i nie mniejszej od 30 A. Dopuszcza się inne metody pomiarowe (na przykład prądem o częstotliwości różnej od 50 Hz, wtedy prąd pomiarowy może mieć mniejszą wartość, jednak taki pomiar musi zapewnić nie mniejszą dokładność).

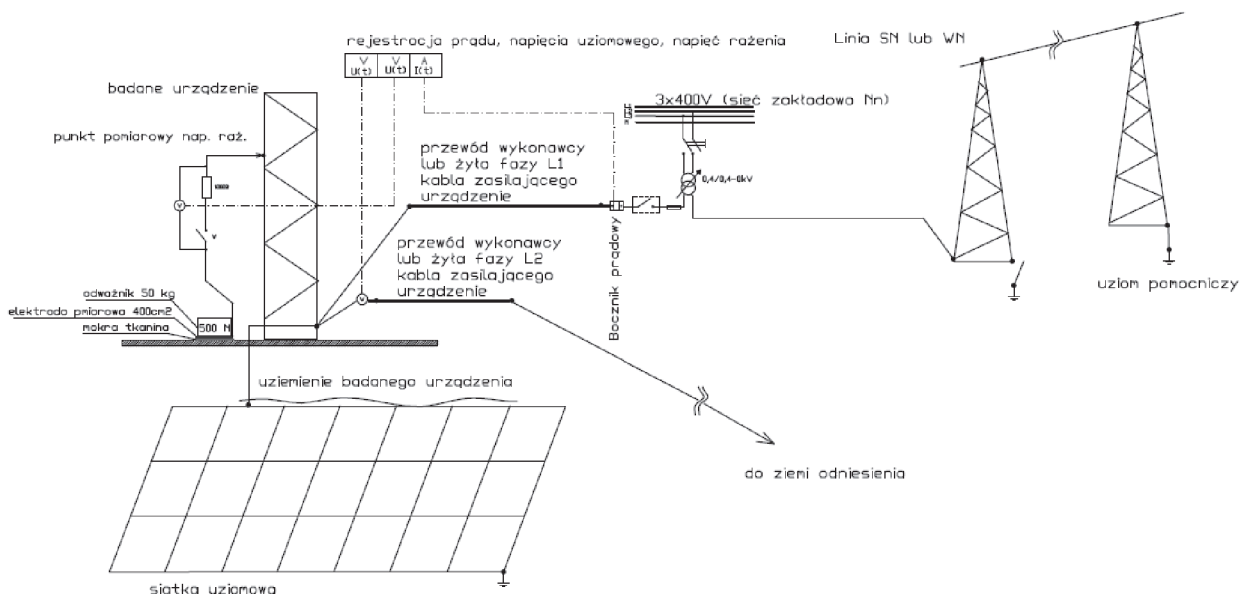
Ocena instalacji uziemiającej ze względu na dopuszczalne napięcia uziomowe, dotykowe rażeniowe powinna być dokonana zgodnie z [7], według algorytmu przedstawionego na rysunku 9.

Ponieważ urządzenia energetyczne o napięciu pracy powyżej 1 kV przeważnie znajdują się w obiektach energetycznych o rozległych układach uziomowych, wymaga się stosowania specjalnych metod pomiarowych. Należy zachować znaczne odległości sondy prądowej i sondy napięciowej od uziomu badanego. Potrzebne prądy pomiarowe przekraczają wartości, które pozwalają zyskać uniwersalne mierniki rezystancji uziemienia. Pomiary wykonywane przez Zakład Elektroenergetyki Instytutu Kolejnictwa są prowadzone zgodnie z [7] tzw. metodą techniczną sztucznego zwarcia, w której prąd zwarcia doziemnego jest wymuszany przy pomocy transformatora zasilanego z sieci 3×400 V. Ogólny układ pomiarowy przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 9. Procedura sprawdzenia instalacji uziemiającej ze względu na dopuszczalne napięcie uziomowe i napięcie dotykowe [7]:
 Z_E – impedancja uziemienia, I_E – prąd uziomowy, U_E – napięcie uziomowe, U_{Tp} – napięcie dotykowe rażenia dopuszczalne, U_T – napięcie dotykowe rażenia zmierzone, I_B – prąd rażenia, I_{Bp} – prąd rażenia dopuszczalny

Zmierzone wartości napięć dotykowych rażenia przy pomiarowym prądzie uziomowym przelicza się na rzeczywiste napięcia dotykowe rażenia, które wystąpią przy prze-



Rys. 10. Podstawowy układ pomiarowy stosowany w Zakładzie Elektroenergetyki Instytutu Kolejnictwa [opracowanie własne]

plywie rzeczywistego prądu w badanym systemie energetycznym według zależności:

$$U_{TR} \text{ od } I_E = U_{TRM} \cdot \frac{I_E}{I_M} \quad (4)$$

gdzie:

U_{TR} – napięcie dotykowe rażenia rzeczywiste mogące wystąpić na badanym urządzeniu,

I_E – rzeczywisty prąd zwarcia przez ziemię w danym układzie energetycznym,

U_{TRM} – zmierzone napięcie dotykowe rażenia,

I_M – pomiarowy prąd uziomowy.

Porównanie otrzymanych wyników z dopuszczalnymi podanymi w funkcji czasu trwania (tablica 3), pozwala ocenić skuteczność badanej ochrony przeciwporażeniowej.

Tablica 3

Dopuszczalne napięcie dotykowe w funkcji czasu trwania [7]

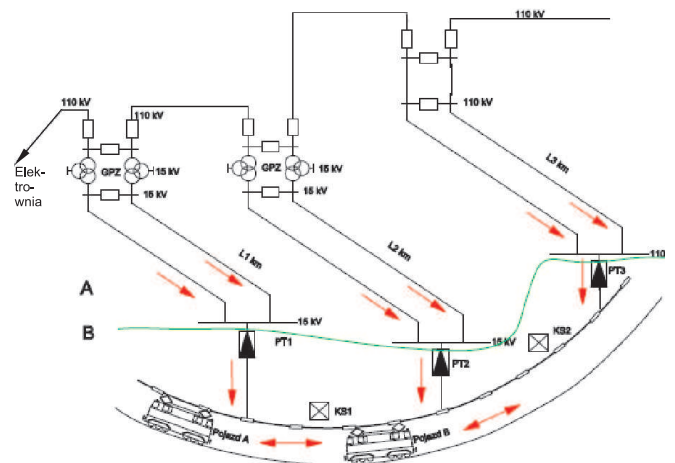
T [s]	U_{Tp} [V]
0,05	716
0,1	654
0,2	537
0,5	220
1	117
2	96
5	86
10	85

Na rysunku 11 przedstawiono przykładowe napięcia dotykowe rażenia zarejestrowane podczas pomiaru na rozdzielni 15 kV AC.

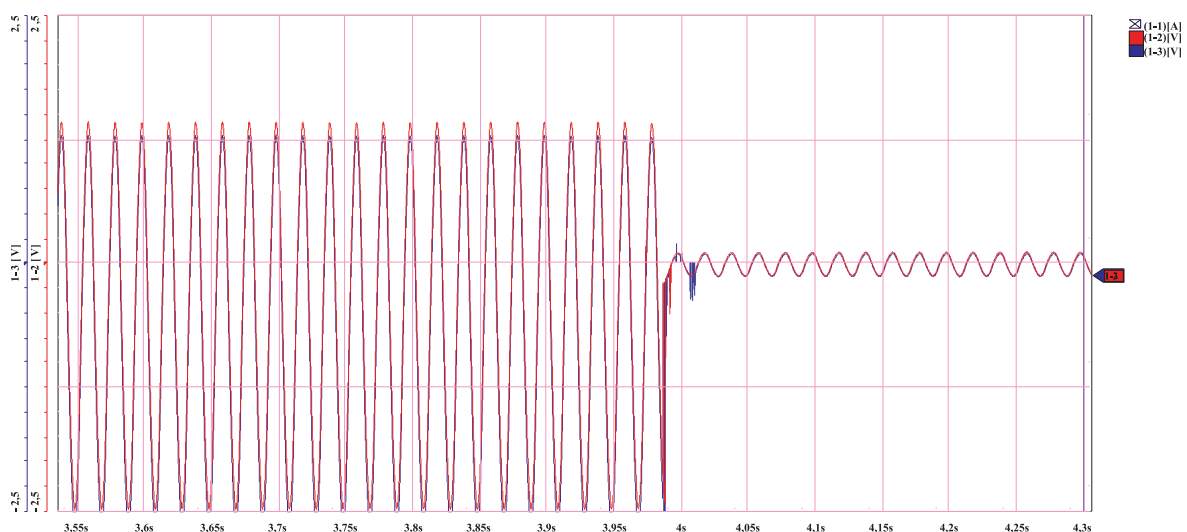
2.2.2. Ochrona przeciwporażeniowa dodatkowa w systemie zasilania trakcyjnego 3 kV DC

W obiektach energetycznych zasilających system trakcyjny 3 kV DC, a pracujących po stronie napięcia zmiennego, ochrona przeciwporażeniowa jest zapewniana poprzez uziemienie ochronne. W obiektach energetycznych pracujących po stronie 3 kV DC ochrona przeciwporażeniowa jest zapewniana przez uszynienie.

Na rysunku 12 przedstawiono schematycznie system zasilania trakcyjnego 3 kV prądu stałego z podziałem obiektów energetycznych na AC i DC.



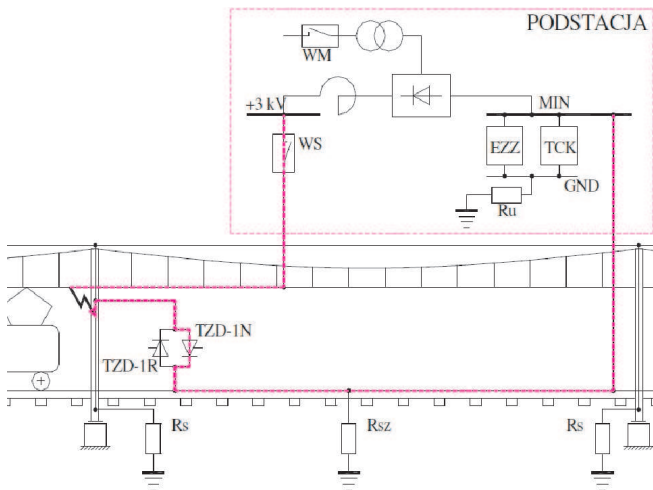
Rys. 12. System zasilania trakcyjnego 3 kV prądu stałego: A – część, w której ochrona przeciwporażeniowa jest uzyskiwana przez uziemienie ochronne, B – część, w której ochrona przeciwporażeniowa uzyskiwana jest przez uszynienie [opracowanie własne]



Rys. 11. Napięcie dotykowe: pierwsza część przebiegu oraz napięcia dotykowe rażenia; druga część przebiegu – napięcia zarejestrowane podczas badania skuteczności ochrony przeciwporażeniowej rozdzielni 15 kV AC (oscylogram z sprawdzenia skuteczności ochrony przeciwporażeniowej rozdzielni 15 kV) [opracowanie własne]

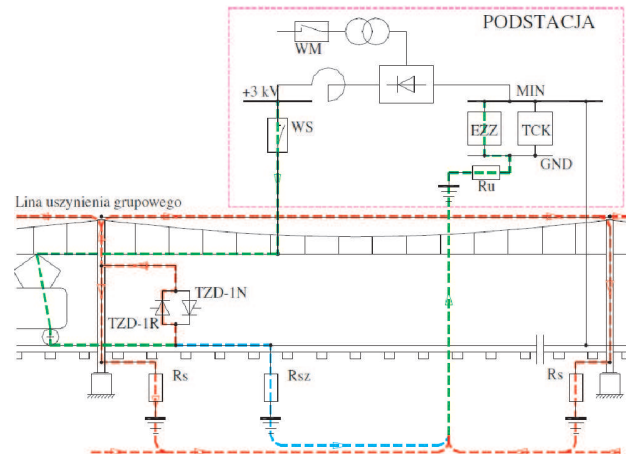
System trakcji elektrycznej prądu stałego 3 kV ma oba bieguny izolowane od ziemi. Biegun dodatni łączy się z siecią trakcyjną górną i wymaga pełnej izolacji na poziomie 3 kV. Biegun ujemny jest połączony z szynami toru kolejowego stanowiącego sieć powrotną. Wymaga się, żeby biegun ujemny i kable powrotne również były izolowane od ziemi na poziomie 0,6 kV. Tory kolejowe w systemie zasilania trakcyjnego DC są izolowane od ziemi, poprzez ułożenie ich na podkładach znajdujących się na warstwie tłuczni. Stosowane są izolacyjne przekładki pomiędzy szynami a podkładem. Pomimo stosowanych rozwiązań mających na celu dobre odizolowanie bieguna minusowego od ziemi, rezystancja doziemna jednego kilometra toru w dobrym stanie wynosi około 1 Ω . Normy i przepisy wymagają, aby konduktancja 1 km toru nie była wyższa od 2,5 S/km PN-EN 50122-2:2011 [5].

Wymagany poziom ochrony przeciwporażeniowej w obwodach zasilania trakcji elektrycznej DC uzyskuje się przez uszynienie bezpośrednie lub w tzw. systemie otwartym wszystkich urządzeń znajdujących się w strefie oddziaływania sieci trakcyjnej. Uszynienie ogranicza napięcie dotykowe rażenia do poziomu bezpiecznego, natomiast wyłączenie zasilania następuje przez wyłącznik szybki prądu stałego wyposażony w wyzwacz nadprądowy. Na rysunku 13 przedstawiono system ochrony przeciwporażeniowej i ziemnozwarciowej w systemie otwartym, stosowany obecnie na PKP PLK.



Rys. 13. Ochrona przeciwporażeniowa w systemie otwartym stosowana obecnie na liniach zelektryfikowanych w PKP PLK. Linią różową zaznaczono przepływ prądu zwarciego w przypadku uszkodzenia izolacji na słupie trakcyjnym [13]

Do szczególnie niebezpiecznej sytuacji może dojść w przypadku powstania przerwy w sieci powrotnej, na przykład przy pęknięciu szyny. W takim wypadku prąd zwarcowy jest zbyt mały do zadziałania wyzwacza nadprądowego wyłącznika szybkiego. Zwarcie doziemne jest wyłączane przy pomocy tzw. urządzeń ochrony ziemnozwarciowej EZZ, TUZZ lub UZZ. Taką sytuację przedstawiono na rysunku 14.



Rys. 14. Rozpływ prądu zwarciego w przypadku powstania przerwy w sieci powrotnej. Linią czerwoną zaznaczono przepływ prądu zwarciego w przypadku powstania przerwy w sieci powrotnej [13]

Przy powstaniu przerwy w sieci powrotnej duże znaczenie na zadziałanie ochrony ziemnozwarciowej ma wartość rezystancji uziemienia słupa trakcyjnego R_s oraz rezystancji uziemienia podstacji trakcyjnej R_u .

Ocenę ochrony przeciwporażeniowej w systemie zasilania trakcyjnego 3 kV DC wykonuje się podczas prób zwarciovych wykonywanych na najbardziej niekorzystnym odcinku zasilania. Należy sprawdzić w warunkach rzeczywistych, wyłączalność prądów zwarciovych, należy zmierzyć rzeczywisty prąd zwarcia i sprawdzić czy pojawiające się napięcia rażenia na sieci powrotnej, na metalowych częściach wagonu i metalowych częściach konstrukcyjnych (dostępnych dla obsługi i podróżnych znajdujących się w pobliżu toru nie przekraczają dopuszczalnych wartości podanych w PN-EN 50122-1 [4].

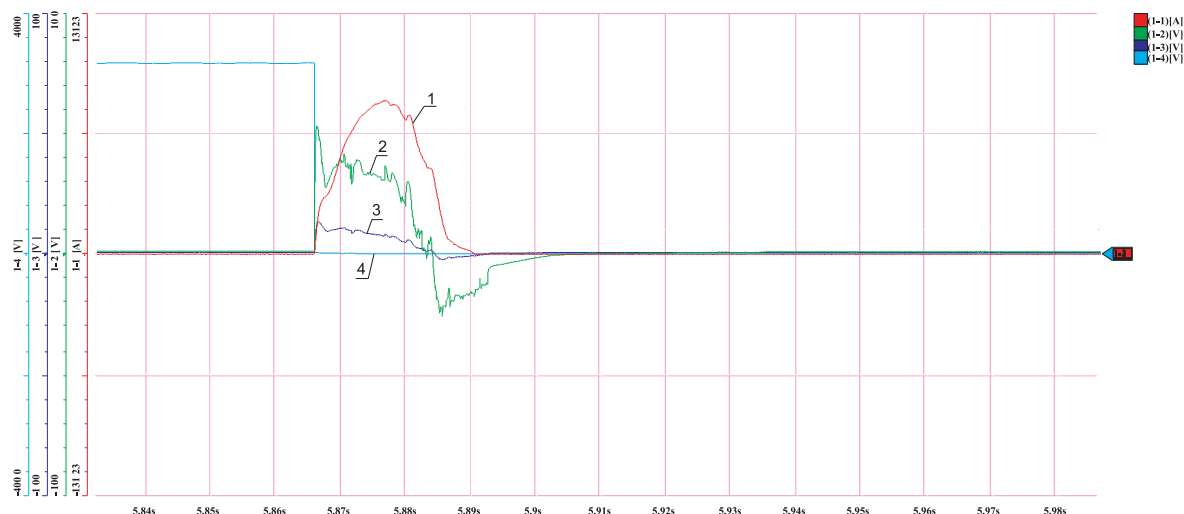
Zakład Elektroenergetyki Instytutu Kolejnictwa wykonuje takie próby zwarciovych wykorzystując komputerowo sterowany wyłącznik zwarciovych oraz wielokanałowy system pomiaru napięć rażenia oparty na rejestratorze Hioki MR 8875. Na rysunku 15 przedstawiono napięcia dotykowe i przykładowy prąd zwarciovych podczas sprawdzania ochrony przeciwporażeniowej nowo oddanego odcinka zasilania trakcyjnego.

Otrzymane wyniki pomiarów napięć dotykowych należy porównać z dopuszczalnymi wartościami podanymi w PN-EN 50122-1 [4] tablica 4 i na tej podstawie ocenić skuteczność ochrony przeciwporażeniowej.

Tablica 4

Dopuszczalne napięcie dotykowe w funkcji czasu trwania

t [s]	U_t [V]
0,02	870
0,05	735
0,1	625
0,2	520
0,3	460
0,4	420
0,5	385
0,6	360
< 0,7	350



Rys. 15. Przebieg prądu zwarcowego i napięć rażenia dla przykładowego odcinka zasilania: 1 – przebieg prądu zwarcowego, 2 – napięcie rażenia na dostępnej części konstrukcji wsporczej wiaty przystanku, 3 – napięcie rażenia na szynie, 4 – napięcie sieci trakcyjnej, (oscylogram ze sprawdzenia skuteczności ochrony przeciwporażeniowej sieci powrotnej) [opracowanie własne]

Bibliografia

1. IEC 60479-1: Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects.
2. Instrukcja eksploatacji urządzeń oświetlenia zewnętrznego terenów kolejowych let 3 – Załącznik do Zarządzenia nr 31/2015 Zarządu Spółki PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 24 czerwca 2015 r.
3. Instrukcja Utrzymania Sieci Trakcyjnej let2. Załącznik do Zarządzenia nr 3/2014 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 28 stycznia 2014 r.
4. PN-EN 50122-1:2011: Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacyjne – Bezpieczeństwo elektryczne, uziemianie i sieć powrotna – Część 1: Środki ochrony przed porażeniem elektrycznym.
5. PN-EN 50122-2:2011: Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacyjne – Bezpieczeństwo elektryczne, uziemianie i sieć powrotna – Część 2: Środki ochrony przed skutkami prądów błędnych powodowanych przez systemy trakcji prądu stałego.
6. PN-EN 50153:2014-11: Zastosowania kolejowe – Tabor – Środki ochrony przed zagrożeniami elektrycznymi.
7. PN-EN 50522:2011: Uziemienie instalacji elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV.
8. PN-EN 50526-2:2008: Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacyjne – Ograniczniki przepięć prądu stałego i urządzenia ograniczające napięcie. Część 2: Urządzenia ograniczające napięcie.
9. PN-EN 61558-2-6:2009: Bezpieczeństwo użytkowania transformatorów, zasilaczy, dławików i podobnych urządzeń o napięciach zasilających do 1100 V – Część 2-6: Wymagania szczegółowe i badania dotyczące transformatorów bezpieczeństwa i zasilaczy z transformatorami bezpieczeństwa.
10. PN-HD 60364-4-41:2009: Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przed porażeniem elektrycznym.
11. PN-HD 60364-5-54:2011: Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 5-54: Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego – Układy uziemiające i przewody ochronne.
12. PN-HD 60364-7-714:2012: Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 7-714: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji – Instalacje oświetlenia zewnętrznego.
13. System ochrony ziemnozwarciowej i przeciwporażeniowej, ograniczający prądy błędne w otoczeniu trakcji elektrycznej 3 kV prądu stałego [dostępny] <http://www.kolen.pl/sites/default/files/pliki/sys.pdf>, [dostęp 28.07.2016].