**mgr inż. Zygmunt Kulhawik**
**„PKP Energetyka" spółka z o.o.**

# System ochrony ziemnozwarciowej i przeciwporażeniowej, ograniczający prądy błądzące w otoczeniu trakcji elektrycznej 3 kV prądu stałego

## Wprowadzenie

Wymagany poziom ochrony przeciwporażeniowej w obwodach zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego uzyskuje się przez szybkie wyłączenie prądu zwarcia przez wyłącznik szybki wyposażony w wyzwalacz pierwotny. Wyłączenie prądu następuje jeżeli wartość prądu zwarcia przewyższa wartość nastawioną na wyzwalaczu pierwotnym wyłącznika szybkiego. Czas wyłączenia prądu zwarcia, przez aktualnie eksploatowane wyłączniki szybkie typu BWS, nie przekracza 30 - 40 ms.

Podczas zwarć doziemnych (większość zwarć), warunkiem wyłączenia prądu zwarcia jest szybkie przekształcenie zwarcia doziemnego w zwarcie międzybiegunowe o dużej wartości oraz ciągłość sieci powrotnej. Należy zauważyć, że sieć szynowa oprócz funkcji przewodnika powrotnego prądu trakcyjnego pełni również funkcję przewodnika dla sygnałów wykorzystywanych w obwodach sterowania ruchem kolejowym (srk). Dlatego też jest ważne, aby powrotne prądy trakcyjne nie zakłócały prawidłowego działania obwodów srk a wymagania dla obwodów srk nie ograniczały drogi dla prądów powrotnych. Ciągłość sieci powrotnej można zapewnić wykonując połączenia poprzeczne i podłużne w sieci szynowej oraz kontrolę ciągłości kabli powrotnych bądź uszyniających.

Prezentowany system ochrony przeciwporażeniowej i ziemnozwarciowej z ogranicznikami niskonapięciowymi zapewnienia wyłączalność zwarć doziemnych (szybkie przekształcenie zwarcia doziemnego w zwarcie międzybiegunowe o dużej wartości prądu), właściwą ochronę przeciwporażeniową oraz w sposób znaczący ogranicza prądy błądzące.

## Ogólne zasady budowy i działania prezentowanego systemu

Prezentowany system składa się z:

- urządzenia ochrony ziemnozwarciowej typu EZZ (TUZZ lub UZZ) zamontowanego w podstacjach trakcyjnych i kabinach sekcyjnych,
- ograniczników niskonapięciowych typu TZD montowanych w systemie uszynienia grupowego oraz innych obiektów wymagających uszynienia,
- testera TCK montowanego w obiektach zasilania, przeznaczonego do monitorowania rezystancji uziomu oraz kontroli ciągłości połączeń i kabli powrotnych lub uszyniających,
- urządzeń kontrolno pomiarowych typu IMR do pomiaru rezystancji uziomów w otoczeniu trakcji elektrycznej 3 kV i typu TOZ do kontroli parametrów ograniczników urządzeniach EZZ, TUZZ i UZZ oraz ograniczników typu TZD montowanych w terenie,

System spełnia następujące wymagania:

- gwarantuje wyłączalność prądów doziemnych w obwodach zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego,
- zapewnia właściwy poziom ochrony przeciwporażeniowej,
- ogranicza prądy błądzące.

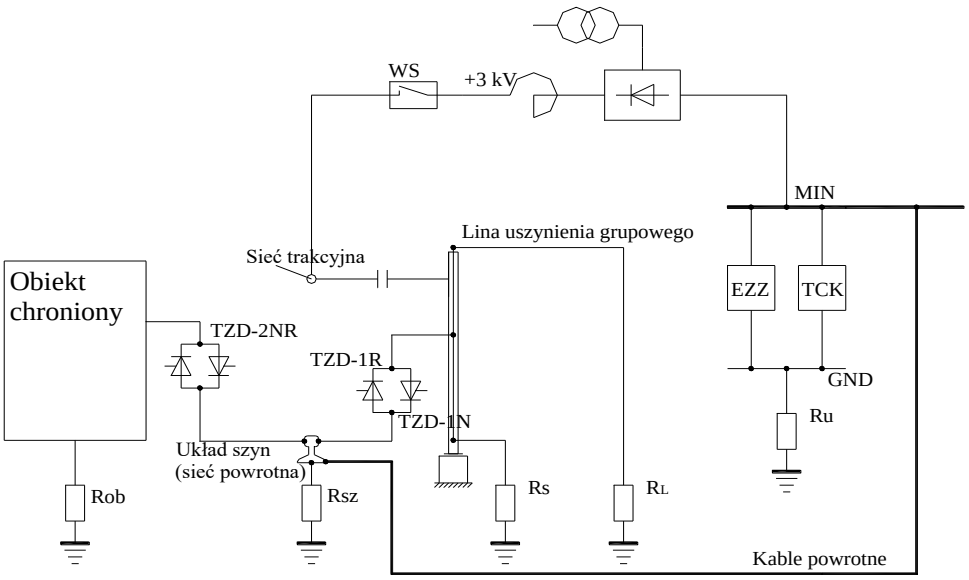
Na rysunku 1 pokazane są urządzenia oraz rezystancje doziemne mające wpływ na działanie systemu. W omawianym układzie sieć powrotna o rezystancji doziemnej ($R_{sz}$) jest odizolowana od rezystancji doziemnych konstrukcji wsporczych sieci trakcyjnej ($R_s$), rezystancji obiektu chronionego ($R_{ob}$) oraz rezystancji uziomu obiektu zasilania ($R_u$). Układ taki gwarantuje, że rezystancja doziemna sieci powrotnej ($R_{sz}$) nie jest bocznikowana przez wymienione rezystancje, a więc jest zależna tylko od konstrukcji i stanu technicznego torów, co ogranicza w zasadniczy sposób prądy błądzące.

W przypadku wystąpienia zwarcia doziemnego, w zależności od miejsca jego wystąpienia, ograniczniki TZD-2NR, TZD-1N lub EZZ przechodzą w stan przewodzenia przekształcając zwarcie doziemne w zwarcie międzybiegunowe, co umożliwia szybkie wyłączenie prądu zwarcia przez wyłączniki szybkie (WS) w obiektach zasilania.
Po wyłączeniu zwarcia przez wyłącznik szybki (WS), ograniczniki przechodzą do stanu normalnego, czyli stanu wysokiej rezystancji między siecią powrotną a uziomem obiektu chronionego. Ograniczniki TZD (stosowane w terenie) mają możliwość samoczynnego wyłączenia się po ich zadziałaniu, dzięki zastosowaniu w podstacjach trakcyjnych urządzenia ochrony ziemnozwarciowej (EZZ, TUZZ) wyposażonej w obwód komutacyjny. Izolowanie od ziemi szyny minusowej podstacji umożliwia zmianę polaryzacji toru kolejowego w zależności od miejsca odbioru prądu. Na załączonych rysunkach pokazane są przykłady przepływu prądu w warunkach awaryjnych (rys.2 i 3) lub pomiarowych (rys.4).

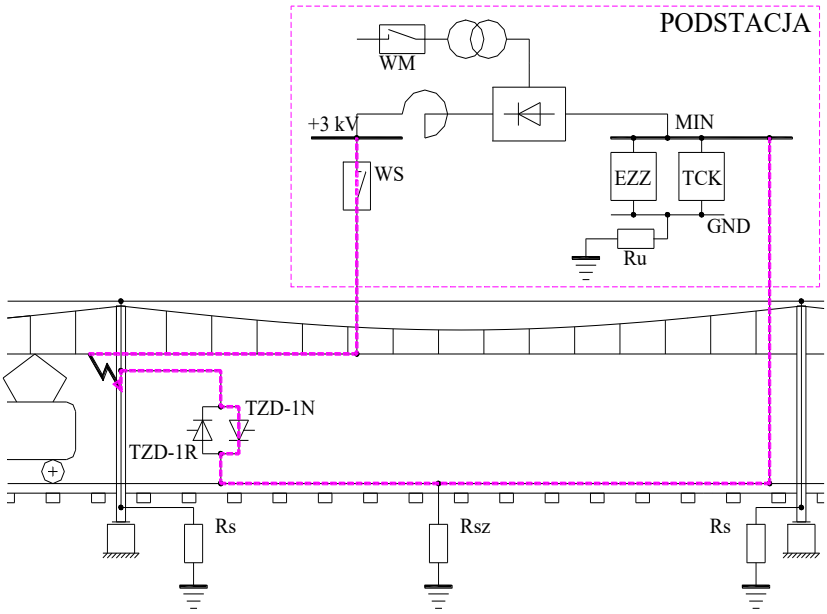
Dla potrzeb kontroli elementów systemu ochrony oraz do pomiaru rezystancji mających wpływ na działanie systemu opracowano specjalistyczne urządzenia pomiarowe.
*Do pomiaru rezystancji $R_L$, $R_s$, $R_{uz}$ i $R_{ob}$* przeznaczony jest przenośny miernik impulsowy typu IMR. Miernik jest przystosowany do wykonywania pomiarów podczas normalnej eksploatacji bez wyłączania napięcia z sieci trakcyjnej. Do pomiaru jako sonda prądowa jest wykorzystywana sieć szynowa o znanej rezystancji ($R_{sz}$) wynoszącej 0,1÷ 0,2 Ω. Miernik może być wykorzystywany do pomiaru rezystancji różnego typu uziomów w otoczeniu torów kolejowych i tramwajowych. *Odmianą „stacjonarną" tego miernika* jest tester ciągłości kabli powrotnych TCK montowany w obiektach zasilania trakcji elektrycznej (podstacje trakcyjne i kabiny sekcyjne). Tester TCK monitoruje rezystancję uziomu danego obiektu, kontrolując jednocześnie ciągłość kabli powrotnych lub uszyniających.
*Do kontroli ograniczników* przeznaczony jest tester typu TOZ przystosowany do pomiarów podstawowych parametrów ogranicznika, bez wyłączania napięcia z sieci trakcyjnej. Tester może być wykorzystany również do kontroli parametrów ogranicznika w urządzeniu ochrony ziemnozwarciowej typu EZZ, TUZZ lub UZZ.

Na sieci PKP wszystkie podstacje trakcyjne i zdecydowana większość kabin sekcyjnych są wyposażone w układ ochrony ziemnozwarciowej typu EZZ, TUZZ lub UZZ. Testery TCK są zainstalowane w kilkudziesięciu obiektach zasilania - jest to obowiązujący aktualnie standard w obiektach nowobudowanych i modernizowanych. Dodatkową zaletą urządzenia typu EZZ oraz testera TCK jest rejestracja zdarzeń, co umożliwia odtworzenie przebiegu zakłóceń w stanach awaryjnych. Ograniczniki TZD w systemie uszynień grupowych są zainstalowane na kilkuset kilometrach zmodernizowanych linii kolejowych (ok. 1000 ograniczników) oraz kilkadziesiąt ograniczników do ochrony innych obiektów takich jak mosty, wiadukty, szafy przytorowe, itp.

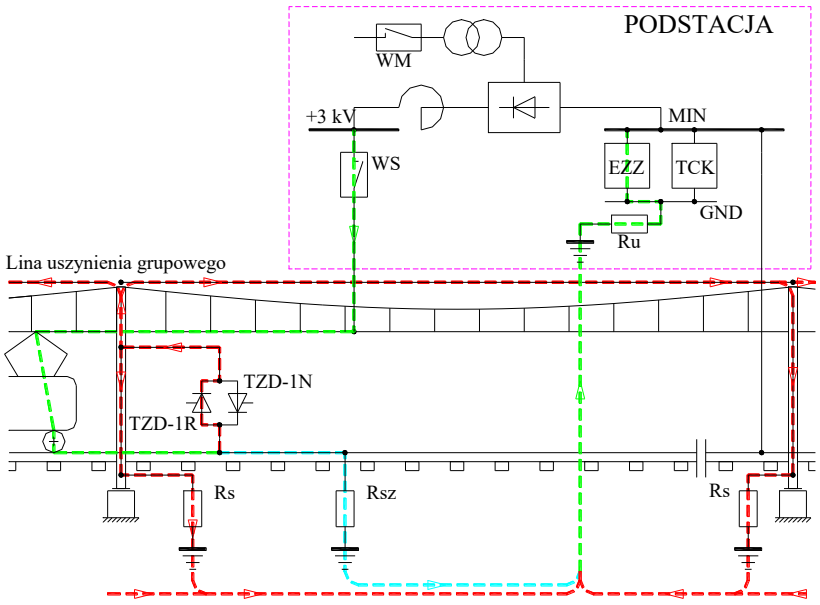
Prezentowany system jest stosowany przede wszystkim w PKP. Podczas badań przeprowadzonych przy wdrażaniu systemu uszynień grupowych w PKP badano wiele typów urządzeń o podobnych parametrach stosowanych w Europie. Uzyskane wyniki rekomendowały do stosowania w PKP ograniczniki tyrystorowe typu TZD.




**Rys. 1. Rozmieszczenie urządzeń i rezystancji mających wpływ na działanie systemu.**
EZZ - urządzenie ochrony ziemnozwarciowej w obiekcie zasilania, TCK - tester ciągłości kabli powrotnych, TZD-1N, TZD-1R - zwierniki stanowiące układ zwiernika dwukierunkowego, TZD-2NR - zwiernik dwukierunkowy w jednej obudowie, $R_u$ - rezystancja doziemna obiektu zasilania, Rs – rezystancja doziemna konstrukcji wsporczej, $R_L$ - wypadkowa rezystancja doziemna liny uszynienia grupowego (Rs/n), $R_{sz}$ - rezystancja doziemna sieci powrotnej (układu szyn), $R_{ob}$ - rezystancja doziemna obiektu chronionego.

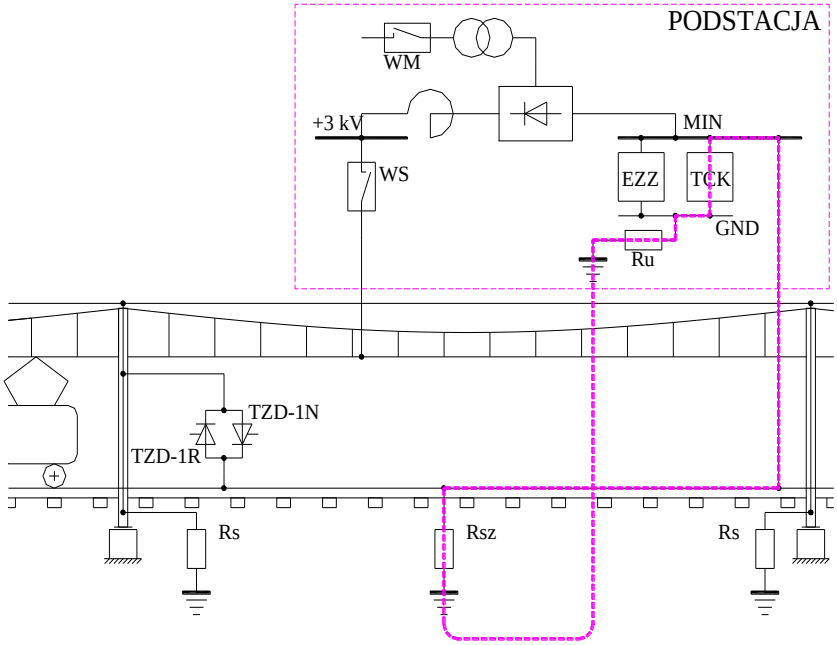



**Rys. 2. Rozpływ prądu zwarciowego podczas zwarcia doziemnego w sieci trakcyjnej.**
Na rysunku pokazany jest tor prądowy podczas przebicia izolacji głównej sieci trakcyjnej. Analogiczny obwód zwarciowy powstaje przy opadnięciu sieci trakcyjnej na obiekt chroniony lub przy zwarciu doziemnym w obiekcie zasilania (rys. 1). Zwierniki TZD-2NR, TZD-1N i EZZ są przystosowane do przewodzenia prądu zwarcia do momentu jego wyłączenia przez wyłączniki szybkie lub wyłączniki mocy.




**Rys. 3. Rozpływ prądu zwarciowego w przypadku przerwy w sieci powrotnej.**

Na rysunku pokazany jest główny tor prądowy w przypadku powstania przerwy w sieci szynowej. Część prądu powrotnego wypływa bezpośrednio z sieci szynowej do ziemi, a część przez zwiernik TZD-1R i rezystancje konstrukcji wsporczych $R_s$ (wypadkowa rezystancja - $R_L$) i wraca do szyny minusowej podstacji przez zwiernik urządzenia EZZ. W przypadku przekroczenia wartości prądu nastawionej na urządzeniu ochrony ziemnozwarciowej następuje wyłączenie podstacji trakcyjnej. Zwiernik TZD-1R jest przystosowany do obciążalności długotrwałej.




**Rys. 4. Kontrola rezystancji uziomu i kabli powrotnych.**

Na rysunku pokazany jest obwód prądowy podczas kontroli ciągłości kabli powrotnych przez urządzenie TCK. Obwód zamyka się przez rezystancję uziomu ($R_u$), wypadkową rezystancję przejścia szyny-ziemia ($R_{sz}$) i kable powrotne. Zmiana parametrów rezystancji do wartości dopuszczalnej jest sygnalizowana, natomiast wzrost rezystancji powyżej nastawionego progu lub przerwa w kablach powrotnych skutkuje wyłączeniem obiektu z ruchu.

## Urządzenia ochrony ziemnozwarciowej w obiektach zasilania

Podstacje trakcyjne i kabiny sekcyjne wyposażone są w urządzenie ochrony ziemnozwarciowej typu EZZ, TUZZ lub UZZ. Podstawowym elementem tych urządzeń jest ogranicznik niskonapięciowy przewodzący prąd w obu kierunkach. Tyrystory główne przystosowane są do przewodzenia prądu zwarcia w obwodzie 3 kV i są spolaryzowane od ziemi do szyny minusowej. Tyrystory spolaryzowane odwrotnie przystosowane są do przewodzenia części prądu płynącego od szyny minusowej do ziemi w warunkach zakłóceniowych w sieci powrotnej (przerwa w torach) lub pracy kabinowej podstacji trakcyjnej. W podstacjach trakcyjnych zasilanych bezpośrednio napięciem znamionowym 110 kV, ogranicznik przystosowany jest do przewodzenia części prądu zwarcia doziemnego w obwodzie 110 kV.

Ogranicznik jest wyzwalany napięciem pojawiającym się na jego zaciskach zewnętrznych i nie wymaga dodatkowego zasilania. Poziom napięcia wyzwalającego ogranicznik jest niższy od dopuszczalnych napięć rażeniowych, czyli zachowane są warunki ochrony przeciwporażeniowej. Urządzenie ochrony ziemnozwarciowej kontroluje w sposób ciągły prąd w obwodzie ogranicznika, przekroczenie wartości progowej (600 A w podstacji trakcyjnej i 300 A w kabinie sekcyjnej) powoduje wyłączenie danego obiektu z ruchu. Urządzenie ochrony ziemnozwarciowej wyposażone jest standardowo w obwód komutacyjny o zdolności wyłączania prądu do 100 A. W EZZ montowanych w podstacjach trakcyjnych zdolność komutacyjna może być podwyższona do 300 A.

W przypadku powstania zwarcia doziemnego w obiekcie zasilania lub w kablu zasilacza, ogranicznik urządzenia EZZ (TUZZ, UZZ) przechodzi w stan przewodzenia przekształcając zwarcie doziemne w zwarcie międzybiegunowe o dużej wartości prądu, co umożliwia szybkie wyłączenie zwarcia przez odpowiedni wyłącznik szybki. Jeżeli z różnych przyczyn nie nastąpi wyłączenie zwarcia przez wyłącznik szybki, urządzenie EZZ generuje z opóźnieniem. 200 ms sygnał, który przez automatykę podstacji trakcyjnej powoduje wyłączenie wszystkich wyłączników szybkich zasilaczy i wyłączników mocy zespołów (w kabinach sekcyjnych wyłączenie jest natychmiastowe).

Zastosowanie urządzenia ochrony ziemnozwarciowej wyposażonego w obwód komutacyjny zapewnia, że szyna minusowa podstacji jest uziemiona tylko w sytuacjach awaryjnych. Po wyłączeniu prądu zwarcia przez wyłącznik szybki, układ komutacyjny odłącza szynę minusową od ziemi. Skutkuje to tym, że szyny kolejowe w każdym punkcie drogi kolejowej mogą zmieniać swoją biegunowość względem ziemi odniesienia, w zależności od miejsca odbioru prądu przez pojazdy trakcyjne. Sytuacja taka oznacza, że ograniczniki TZD stosowane w terenie wzdłuż linii kolejowej nie muszą być wyposażane w obwody komutacyjne. Zasilanie obwodu komutacyjnego ogranicznika, zainstalowanego w terenie byłoby trudne do wykonania.

## Tester ciągłości kabli powrotnych

Równolegle do urządzenia EZZ montowany jest tester ciągłości kabli powrotnych typu TCK. Podczas pomiaru wykonywanego automatycznie, mierzona jest suma rezystancji, tj. rezystancji przejścia szyny - ziemia ($R_{sz}$), rezystancji uziomu obiektu zasilania ($R_u$) oraz rezystancji kabli powrotnych (uszyniających). Tester posiada dwie nastawy progowe o wartościach 2Ω i 4Ω. Przekroczenie pierwszego progu uruchamia sygnalizację a przekroczenie drugiego powoduje wyłączenie obiektu z ruchu.

Tester przystosowany jest do współpracy z urządzeniem ochrony ziemnozwarciowej. Podczas doziemienia bieguna ujemnego przez urządzenie ochrony ziemnozwarciowej tester

nie wykonuje pomiaru i jest w stanie oczekiwania. Stan taki występuje również w czasie gdy napięcie między biegunem ujemnym a ziemią przekracza 40 V. W przypadku przekroczenia wartości pierwszego progu (2Ω) urządzenie sygnalizuje ten stan i wraca do normalnego cyklu pracy. Po przekroczeniu wartości drugiego progu (4Ω) co jest równoznaczne z przerwaniem kabli powrotnych bądź uszyniających, następuje wygenerowanie impulsu na wyłączenie obiektu z ruchu i blokada testera. Blokada testera uniemożliwia automatyczne załączenie wyłączonych urządzeń i wymaga ręcznego odblokowania po sprawdzeniu obwodu.

**Urządzenia ochrony ziemnozwarciowej w terenie**

Do ochrony urządzeń w terenie stosowane są ograniczniki niskonapięciowe typu TZD. W układzie uszynień grupowych są stosowane ograniczniki typu TZD-1N i TZD-1R. Ograniczniki te połączone równolegle stanowią ogranicznik dwukierunkowy, gdzie TZD-1N przystosowany jest do przewodzenia prądu zwarcia a TZD-1R do przewodzenia części prądu obciążenia w warunkach awaryjnych (np. przerwa w sieci powrotnej). W przypadku powstania zwarcia doziemnego w sieci trakcyjnej (np. uszkodzenie się izolacji głównej), ogranicznik TZD-1N przechodzi w stan przewodzenia przekształcając zwarcie doziemne w zwarcie międzybiegunowe o dużej wartości prądu, co umożliwia wyłączenie prądu zwarcia przez wyłączniki szybkie w sąsiednich obiektach zasilania.

W przypadku powstania przerwy w sieci powrotnej (przerwa na połączeniach dławika torowego, wymiana szyn, rozjazdów bez połączeń obejściowych, itp.) następuje wzrost potencjału szyn względem ziemi, co powoduje zadziałanie ogranicznika TZD-1R. Część prądu trakcyjnego płynie przez ten ogranicznik i wypadkową rezystancję liny uszynienia grupowego ($R_L$) do ziemi, i wraca do podstacji trakcyjnej, co przeważnie powoduje zadziałanie ogranicznika w urządzeniu EZZ. W przypadku dużej wartości prądu (powyżej progu nastawienia EZZ) nastąpi wyłączenie podstacji trakcyjnej z ruchu. Zjawisko takie może wystąpić w szczególności na liniach jednotorowych lub przy braku łączników międzytorowych.

Po wyłączeniu prądu zwarcia ograniczniki przechodzi do stanu pierwotnego czyli stanu dużej rezystancji. W PKP ze względów oszczędnościowych, na podstawie prowadzonych przez CNTK badań [3], [4], dopuszczone jest na jednej sekcji uszynienia grupowego zastosowanie jednego ogranicznika dwukierunkowego (równoległe połączenie TZD-1N i TZD-1R) a z drugiej strony tylko ogranicznika jednokierunkowego typu TZD-1N.

W odniesieniu do innych obiektów wymagających uszynienia zasada działania jest analogiczna. Opadnięcie sieci trakcyjnej na obiekt chroniony (np. szafa przytorowa, most) lub dotknięcie (np. kładka dla pieszych, wiadukt) powoduje zadziałanie ogranicznika TZD i szybkie wyłączenie prądu zwarcia. Dla obiektów których rezystancja względem ziemi jest większa niż 2 Ω należy stosować ogranicznik dwukierunkowy typu TZD-2NR. W przypadku gdy rezystancja ta jest mniejsza niż 2Ω należy stosować zestaw dwóch ograniczników, tj. TZD-1N i TZD-1R połączonych równolegle.

Podstawowym warunkiem prawidłowego działania systemu ochrony ziemnozwarciowej jest zachowanie ciągłości sieci powrotnej.

**Rezystancja przejścia szyny – ziemia**

Jednostkowa rezystancja przejścia szyny - ziemia, waha się w szerokich granicach i zależy od wielu czynników, w tym: stanu technicznego toru, warunków atmosferycznych, sposobu uszyniania konstrukcji wsporczych sieci jezdnej itp. Norma [6] wymaga, aby rezystancja przejścia szyny – ziemia wynosiła nie mniej niż 2 Ωkm (0,5 S/km). W warunkach

PKP, dla systemu uszynień indywidualnych, jednostkowa rezystancja przejścia szyna - ziemia dla jednego toru zawiera się najczęściej w granicach 0,2 – 0,5 Ωkm [1]. Stosowane powszechnie w PKP uszynienia indywidualne konstrukcji wsporczych sieci trakcyjnej powodują, że niezależnie od stanu technicznego toru, jednostkowa rezystancja przejścia szyny-ziemia jest znacznie mniejsza od 2 Ωkm, co oznacza, że wymagania normy [6] nie są spełnione. Rezystancja doziemna metalowej konstrukcji wsporczej sieci jezdnej w fundamencie tradycyjnym wynosi od 20 Ω do 50 Ω, konstrukcji wsporczej betonowej ok. kilkuset Ω, a fundamentu palowego od 5 Ω do 20 Ω - są to wartości najczęściej występujące. Uprzednio obowiązująca norma PN-92/E-05024 dopuszczała bezpośrednie uszynianie konstrukcji, jeżeli ich rezystancja doziemna była większa od 20 Ω. Norma ta nie stawiała wymagań odnośnie jednostkowej rezystancji przejścia szyny-ziemia.

Mała rezystancja przejścia szyny - ziemia jest zjawiskiem niepożądanym ze względu na wzrost prądów błądzących, które płynąc ziemią powodują elektrokorozję podziemnych konstrukcji przewodzących, co w konsekwencji może doprowadzić do różnego typu awarii. Przez odpowiednie zaprojektowanie, wykonanie i eksploatację sieci powrotnej można jednak bardzo znacznie zmniejszyć odgałęzienie prądów z szyn do ziemi, a przez to ograniczyć niebezpieczeństwo korozji elektrolitycznej, zachowując jednocześnie wymagania ochrony przeciwporażeniowej.

Po zastosowaniu systemu uszynień grupowych w układzie otwartym, jednostkowa rezystancja przejścia szyny-ziemia jest znacznie większa i zawiera się w granicach 2 –10 Ωkm. Dla torów nowych rezystancja ta osiąga wartości kilkudziesięciu Ωkm, jednak w ciągu krótkiego czasu (ok. 1 miesiąca) zbliża się do wartości eksploatacyjnych 2 –10 Ωkm. Utrzymanie możliwie dużej rezystancji przejścia szyn do ziemi oznacza również stosowanie odpowiednich rozwiązań technicznych w odniesieniu do innych konstrukcji przewodzących, takich jak mosty, wiadukty, kładki dla pieszych, szafy z aparaturą zabezpieczenia ruchu kolejowego, semafory i inne.

Zgodnie z normą [6], żadna część trakcyjnego obwodu powrotnego nie powinna mieć bezpośrednich przewodzących połączeń z instalacjami, urządzeniami, częściami konstrukcji lub budowli, które nie są izolowane od ziemi. Jeżeli natomiast połączenie z obwodem powrotnym jest nieuniknione ze względu na ochronę przed porażeniem elektrycznym, to należy zastosować środki ograniczające skutki oddziaływania prądów błądzących. Rozwiązaniem takim jest system uszynień w układzie otwartym z ogranicznikami niskonapięciowymi.

Niezależnie od stanu technicznego torów i sposobu uszynień konstrukcji wsporczych sieci trakcyjnej, wypadkowa rezystancja sieci szynowej względem ziemi jest bardzo mała. Wykonane obliczenia dla jednego toru z szynami S60 o długości 40 km, w zależności od jednostkowej rezystancji szyny-ziemia, dały następujące wyniki:

- 0,31 Ω - dla jednostkowej rezystancji szyny-ziemia wynoszącej 10 Ωkm,
- 0,18 Ω dla jednostkowej rezystancji szyny-ziemia wynoszącej 5 Ωkm,
- 0,1 Ω dla jednostkowej rezystancji szyny-ziemia wynoszącej 2 Ωkm,
- 0,06 Ω dla uszynień indywidualnych; rezystancja ta tylko w niewielkim stopniu zależy od stanu technicznego toru.

Dla linii dwutorowej z połączeniami międzytorowymi rezystancja ta będzie prawie dwukrotnie mniejsza.

Tak mała rezystancja sieci powrotnej względem ziemi jest ostatnio wykorzystywania do pomiaru rezystancji uziomów konstrukcji i budowli zlokalizowanych w pobliżu torów kolejowych przy zastosowaniu metody pojedynczego impulsu (pomiar ciągły mógłby wprowadzać zakłócenia w obwodach srk). Metoda ta mogłaby być wykorzystywana również do pomiarów jednostkowej rezystancji przejścia szyny-ziemia.

**Rezystancja wzdłużna szyn**

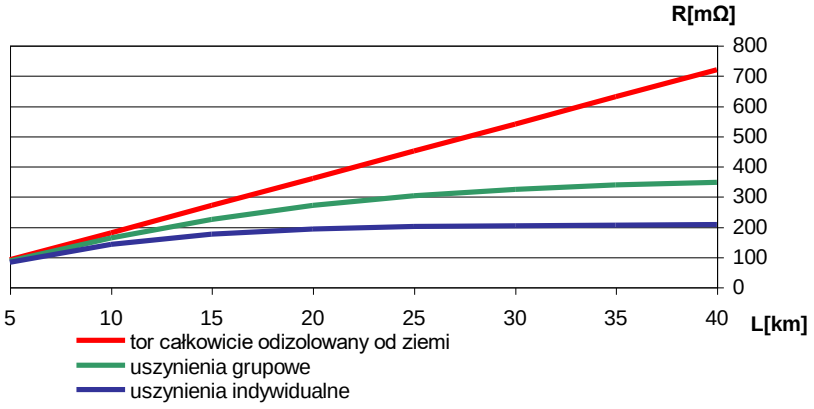
Spadek napięcia na rezystancji wzdłużnej sieci szynowej, wywołany przepływem prądów obciążeniowych i zwarciowych, jest źródłem prądów błądzących i stanowi o poziomie zagrożenia porażeniowego. Dla uzyskania odpowiednio małej rezystancji sieci szynowej należy stosować łączniki podłużne oraz poprzeczne międzytokowe i międzytorowe. Sieć szynowa na skutek narażeń mechanicznych powodowanych przez jeżdżące pojazdy oraz maszyny torowe ulega uszkodzeniom, prowadzącym do wzrostu jej rezystancji. Należy tu wymienić zużycie i pęknięcia szyn, obluzowanie połączeń lub odpadniecie łączników podłużnych, czy też dewastacja lub kradzież dławików torowych na złączach izolowanych. Stosowanie połączeń międzytorowych zapewnia ciągłość sieci szynowej i ma szczególne znaczenie w sytuacjach awaryjnych (np. uszkodzenie lub kradzież dławika w jednym z torów, wymiana rozjazdu lub szyn bez wykonania połączeń obejściowych). W przypadku przerwy w danym torze w pobliżu podstacji trakcyjnej i braku połączeń międzytorowych, prąd trakcyjny płynie w kierunku sąsiedniej podstacji danym torem i wraca do podstacji zasilającej torem sąsiednim, co wydłuża drogę dla prądu powrotnego nawet do 40 km. Powoduje to, że w miejscu odbioru prądu przez pojazd trakcyjny, napięcie szyn względem ziemi może osiągać wartości kilkuset woltów w stosunkowo długim czasie, w zależności od czasu rozruchu lub jazdy z dużym prądem pojazdu trakcyjnego.

Szczególnie niebezpieczne jest powstanie dwóch przerw w danym torze przy braku połączeń międzytorowych. W takiej sytuacji podczas wystąpienia zwarcia, wartość prądu może być niewystarczająca do zadziałania wyłącznika szybkiego w obiekcie zasilania. W zależności od lokalizacji w odniesieniu do podstacji trakcyjnej, długości wyizolowanego odcinka szyn oraz systemu uszynień, wartość prądu wracającego ziemią do podstacji trakcyjnej może powodować zadziałanie ochrony ziemnozwarciowej i wyłączenie prądu zwarcia. Zadziałanie ochrony ziemnozwarciowej jest bardziej prawdopodobne przy uszynieniach grupowych. Niewyłączenie prądu zwarcia powoduje utrzymywanie się wysokiego potencjału szyn (oraz konstrukcji wsporczych sieci trakcyjnej przy uszynieniach indywidualnych) względem ziemi, stwarzając zagrożenie porażeniowe dla ludzi i urządzeń związanych z torem (np. urządzenia srk). Stosowanie połączeń międzytorowych eliminuje do minimum powstanie takiej sytuacji.

Rezystancja zastępcza sieci szynowej powinna zależeć od rezystancji jednostkowej szyn i ich długości. W rzeczywistości zasada ta jest słuszna dla małych odległości (do kilku kilometrów). W zależności od systemu uszynień, rezystancji wzdłużnej szyn (linia jednotorowa czy też wielotorowa z łącznikami poprzecznymi) wpływ ten zasadniczo się różni. Wraz ze wzrostem odległości zaznacza się coraz większy wpływ ziemi na rezystancję zastępczą. Wpływ ziemi na rezystancje zastępczą sieci szynowej pokazany jest na rys.2.

Obliczenia wykonano dla sieci szynowej z szynami S60 dla uszynień indywidualnych oraz grupowych, przy założeniu wymaganej normą rezystancji przejścia szyny – ziemia wynoszącej 2 Ωkm, dla linii jednotorowej (rys.2) oraz dla linii dwutorowej przy założeniu połączeń międzytorowych co 3 km. Dla długości 20 km (średnia odległość między podstacjami) linii jednotorowej wpływ ziemi na rezystancję zastępczą sieci szynowej wynosi:

- 46 % przy uszynieniach indywidualnych niezależnie od stanu technicznego toru,
- 24 % przy uszynieniach grupowych i jednostkowej rezystancji doziemnej równej 2 Ωkm,
- 10 % przy uszynieniach grupowych i jednostkowej rezystancji doziemnej równej 10 Ωkm.




*Rys. 2. Rezystancja zastępcza sieci szynowej obliczona dla linii jednotorowej przy rezystancji przejścia szyny – ziemia 2 Ωkm i rezystancjach doziemnych konstrukcji wsporczych wynoszących 30 Ω.*

Dla linii dwutorowej wartości te wynoszą:

– 30 % przy uszynieniach indywidualnych niezależnie od stanu technicznego toru,
– 18 % przy uszynieniach grupowych i jednostkowej rezystancji doziemnej równej 2 Ωkm,
– 8 % przy uszynieniach grupowych i jednostkowej rezystancji doziemnej równej 10 Ωkm.

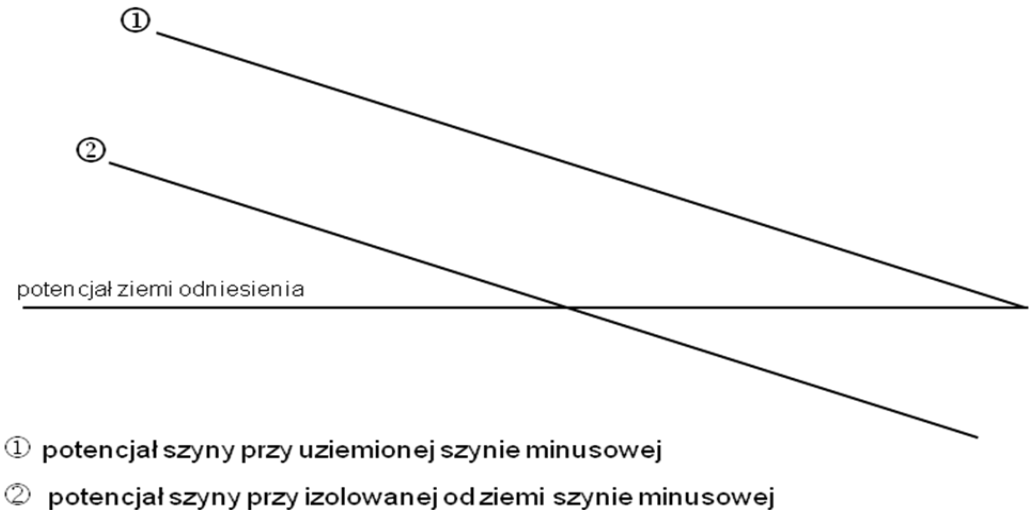
Przy stosowaniu uszynień indywidualnych wpływ ziemi na rezystancję zastępczą praktycznie nie zależy od stanu technicznego toru, natomiast dla uszynień grupowych stan techniczny toru wpływa w sposób znaczący na tą rezystancję.

Opierając się na otrzymanych wynikach można stwierdzić, że procentowy udział prądu płynącego ziemią (prąd błądzący) w środku odcinka zasilania jest analogiczny jak podany wyżej procentowy udział ziemi w rezystancji zastępczej. Obliczenia te zostały wykonane przy założeniu, że szyna minusowa podstacji trakcyjnej jest izolowana od ziemi (przy zastosowaniu układu EZZ). Przy uziemionej szynie minusowej udział prądu powrotnego płynącego ziemią jest znacznie większy, a jego wzrost jest zależny od rezystancji uziomu podstacji. Należy zauważyć, że niezależnie od stanu technicznego toru oraz sposobu uszynień wykonanie połączeń międzytorowych w sposób zdecydowany zmniejsza udział prądu powrotnego płynącego ziemią, co oznacza ograniczenie prądów błądzących.

Połączenia międzytorowe mają wpływ również na zmniejszenie niebezpiecznych potencjałów szyn względem ziemi. W normalnych warunkach połączenie obu torów powoduje zmniejszenie tego potencjału o połowę, niezależnie od stanu technicznego toru i sposobu uszynień. W warunkach awaryjnych (przerwa w jednym z torów) połączenia te mają jeszcze większe znaczenie, umożliwiają wyłączenie zwarcia ograniczając do minimum czas występowania napięć niebezpiecznych. Na podstawie wyżej podanych wyników rezystancji zastępczej wydawać by się mogło, że system uszynień indywidualnych jest bardziej bezpieczny (mniejszy spadek napięcia w sieci szynowej przy porównywalnym obciążeniu). W rzeczywistości jest odwrotnie, gdyż konstrukcje wsporcze sieci trakcyjnej mają potencjał szyn wyniesiony na odległość kilku metrów od toru. Przy uszynieniach grupowych konstrukcje wsporcze mają potencjał ziemi, a dotknięcie szyn z takiej odległości kilku metrów jest praktycznie niemożliwe.

Dodatkowym czynnikiem zmniejszającym zagrożenie porażeniowe wywołane potencjałem szyn, jest stosowany w PKP układ zasilania, a ściślej biorąc zastosowany na wszystkich podstacjach trakcyjnych układ ochrony ziemnozwarciowej. W normalnym układzie szyna minusowa podstacji trakcyjnej jest izolowana od ziemi, co powoduje, że prąd wypływający z szyn do ziemi musi wrócić do szyn w pobliżu podstacji trakcyjnej. Maksymalne napięcie szyn względem ziemi odniesienia w miejscu odbioru prądu przez pojazd trakcyjny wynosi ok.

50 % wartości spadku napięcia w sieci szynowej wywołanego przepływem prądu obciążenia. Uziemienie szyny minusowej w podstacji trakcyjnej powoduje, że maksymalny potencjał szyn względem ziemi odniesienia może osiągnąć prawie pełną wartość spadku napięcia w sieci szynowej co obrazuje poniższy rysunek




**Urządzenia kontrolno pomiarowe**

Stosowanie ograniczników niskonapięciowych w obwodach ochrony ziemnozwarciowej sieci trakcyjnej, wymaga prowadzenia okresowej kontroli ich sprawności technicznej. Sprawdzenie stanu technicznego ogranicznika włączonego w system uszynień grupowych lub do systemu ochrony innych obiektów możliwe jest po odłączeniu go z tego sytemu. Ze względów bezpieczeństwa możliwe to jest po wyłączeniu napięcia z sieci trakcyjnej. Zastosowanie specjalnego testera TOZ umożliwia kontrolę ograniczników bez wyłączania napięcia z sieci trakcyjnej. Tester TOZ włącza się między system uszynień grupowych lub obiekt chroniony a sieć szynową, następnie przeprowadza się test kontrolny tego połączenia (tester wyposażony jest w diodę odpowiedniej mocy, która zapewnia drogę dla prądu zwarcia w przypadku pojawienia się napięcia 3 kV na obiekcie chronionym). Pozytywny wynik testu wykonanych połączeń jest sygnalizowany, co umożliwia odłączenie ogranicznika od sieci szynowej i podłączenie go do testera. Sprawdzenie ogranicznika polega na wymuszeniu impulsu napięciowego o wartości 100 lub 150 V. Przy impulsie 100 V ogranicznik nie powinien zadziałać dla dowolnej polaryzacji impulsu, natomiast przy impulsie 150 V o polaryzacji zgodnej z polaryzacją tyrystora ogranicznik powinien zadziałać a przy polaryzacji przeciwnej nie powinien działać.

Pomiar rezystancji uziomów w otoczeniu trakcji elektrycznej prądu stałego, w szczególności uziomów podstacji trakcyjnych, kabin sekcyjnych, systemu uszynień grupowych, konstrukcji wsporczych, mostów, wiaduktów, itp. może być wykonywany impulsowym miernikiem rezystancji typu IMR-4. Do pomiaru jako sodę prądową wykorzystuje się tory kolejowe lub tramwajowe włączone do sieci powrotnej układu zasilania. Nie wymaga się stosowania dodatkowych sond pomiarowych. Miernik może być również wykorzystywany do pomiarów małych rezystancji zastępując metodę techniczną, w tym do pomiarów:

- ciągłości żył powrotnych i roboczych kabli energetycznych ze wskazaniem wartości zmierzonej rezystancji,
- ciągłości i jakości połączeń w obwodach uziemiających i uszyniających,
- rezystancji obwodu dowolnej pętli zwarcia.

Dla wykonania pomiaru miernik należy włączyć między uziom badany, a tory kolejowe (tramwajowe) lub do innego uziomu o znanej rezystancji (np. uziom stacji energetycznej WN/SN, którego rezystancja w dużych aglomeracjach wynosi 0,2÷0,3 Ω). W czasie wykonywania pomiaru miernik generuje pojedynczy impuls prądowy o amplitudzie do 100 A i czasie trwania do kilkudziesięciu milisekund. Prąd pomiarowy osiąga wartość do 100 A dla rezystancji rzędu miliomów i maleje przy pomiarach większych rezystancji. Pomiar przy wykorzystaniu pojedynczego impulsu wymuszającego nie wprowadza zakłóceń w środowisku obwodów i urządzeń torowych.

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów napięcia i prądu zostaje wyliczona wartość rezystancji. Zastosowana metoda obliczeniowa eliminuje wpływ indukcyjności, napięcia stałego oraz napięcia 50 Hz i jego harmonicznych, występujących w obwodzie pomiarowym. Mierzone wartości są zapamiętywane wraz z datą pomiaru, a następnie mogą być transmitowane do komputera w celu wykonania szczegółowej analizy.

Rezystancja mierzonego uziomu jest mniejsza od wartości wyliczonej i wskazanej przez miernik o wartość rezystancji przejścia szyny – ziemia wynoszącej 0,1÷0,2Ω (większe wartości dotyczą torów w dobrym stanie technicznym z systemem uszynień grupowych) lub o inną znaną wartość rezystancji sondy prądowej wykorzystywanej w czasie pomiaru.

Miernik IMR-4 może być wykorzystywany do pomiaru rezystancji uziomu również przy braku dostępu do sondy prądowej o znanej rezystancji. Należy wówczas wykorzystać dowolną sondę prądową oraz napięciową umiejscowioną i spełniającą wymagania jak przy pomiarach uziomu tradycyjną metodą techniczną. Dokładność pomiaru w takim układzie zależy od lokalizacji sondy napięciowej, która powinna znajdować się na potencjale ziemi odniesienia.
Impulsowa metoda pomiaru stwarza przybliżone warunki jakie występują podczas rzeczywistych zwarć.

## Doświadczenia eksploatacyjne stosowanego w PKP systemu ochrony ziemnozwarciowej

Podstawowym zadaniem urządzenia ochrony ziemnozwarciowej jest zapewnienie wyłączalności zwarć doziemnych, co realizowane jest przez przekształcenie zwarcia doziemnego w zwarcie międzybiegunowe o dużym prądzie, gwarantującym zadziałanie wyłącznika szybkiego w podstacji trakcyjnej lub kabinie sekcyjnej. Dotychczasowe doświadczenia potwierdzają walory tego rozwiązania, polegające na minimalnym zakresie uszkodzeń podczas zwarć doziemnych, w porównaniu ze skutkami jakie występowały w przypadku braku tego urządzenia.
W niektórych podstacjach węzłowych występuje problem związany z przepływem dużego prądu między uziomem podstacji a szyną minusową w momencie zadziałania ogranicznika urządzenia ochrony ziemnozwarciowej od napięć zakłócających (np. procesy łączeniowe w obwodzie 3 kV). Prądy te osiągają wartości do kilkuset amperów powodując niejednokrotnie wyłączenia podstacji. Tak duże prądy wynikają niewątpliwie ze złego stanu sieci powrotnej oraz w wyniku połączeń, poprzez żyły powrotne kabli zasilających podstacje trakcyjne, z rozległym systemem uziomów stacji energetycznych WN/SN, którego wartość wypadkowa zawiera się w granicach 0,2 – 0,3 Ω. Energetyka zawodowa wymaga dwustronnego uziemiania żył powrotnych. Omawiane wyżej normy przewidują taką sytuację proponując jednostronne uziemianie lub stosowanie urządzenia ograniczającego napięcie (odpowiedniego ogranicznika niskonapięciowego). Problem ten jest aktualnie rozpatrywany.
Ciągłość połączeń uziemiających i uszyniających obiektów zasilania, ma zasadniczy wpływ na wyłączalność zwarć doziemnych natomiast nie ma bezpośredniego wpływu na pracę urządzeń zasilania w czasie ich normalnej eksploatacji. Stwierdzenie nieprawidłowości w obwodach uziemiających i/lub uszyniających wymaga wykonania pomiarów, które personel utrzy-

mujący urządzenia w ruchu, wykonuje z reguły 1 raz w roku. Tak więc przez okres jednego roku obwody te mogą pozostawać uszkodzone lub mogą nie spełniać wymaganych parametrów. Skutkiem tego może być nie wyłączenie zwarć doziemnych i spowodowanie dużego zagrożenia porażeniowego dla ludzi i rozległych uszkodzeń urządzeń. Zastosowanie testera ciągłości kabli rozwiązuje ten problem. Podstawowym elementem testera jest impulsowy miernik rezystancji. Miernik ten jest przystosowany do wykonywania pomiarów rezystancji w strefie oddziaływania trakcji elektrycznej prądu stałego z wykorzystaniem sieci szynowej jako elektrody pomiarowej. Kilkuletnie doświadczenia PKP oraz badania laboratoryjne i eksploatacyjne testerów TCK, przeprowadzone przez Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa, potwierdziły przedstawione wyżej cechy urządzenia.

System uszynień grupowych w układzie otwartym jest stosowany w PKP od 1996 roku na podstawie koncepcji opracowanej przez Politechnikę Warszawską [2]. Na podstawie badań laboratoryjnych i terenowych przeprowadzonych przez CNTK [3], [4] do systemu zostały wytypowane tyrystorowe ograniczniki niskonapięciowe typu TZD. Ograniczniki te były przystosowane do przewodzenia prądu w jednym kierunku od ziemi do szyn tj. dla przypadku wystąpienia zwarcia doziemnego w obwodzie 3 kV prądu stałego przy założeniu ciągłości sieci powrotnej. Kilkuletnie doświadczenia wykazały, że warunki te nie zawsze są spełnione. W praktyce występuje (świadomy lub nieświadomy) brak łączników międzytorowych i to na całych liniach lub szlakach kolejowych. Występują też przerwy w ciągłości sieci szynowej spowodowane uszkodzeniem lub kradzieżą dławika torowego, wymianą szyn lub rozjazdów bez wykonania połączeń obejściowych, itp. Sytuacja taka wymaga zastosowania ograniczników przystosowanych również do przewodzenia prądu od szyn do ziemi i to w sposób długotrwały, jako części prądu obciążenia.

Aktualnie system uszynień grupowych w układzie otwartym jest stosowany również w odniesieniu do konstrukcji wsporczych sieci trakcyjnej na fundamentach tradycyjnych. Konstrukcje te mimo, że nie są odizolowane od ziemi są dodatkowo uziemiane, co zapewnia lepszy poziom bezpieczeństwa i chroni konstrukcje wsporcze przed korozją, pod warunkiem że uziomy są wykonane z prętów cynkowanych lub ze stali nierdzewnej..

Uszynienie otwarte przez ogranicznik jest szczególnie istotne dla budowli inżynieryjnych takich jak mosty, wiadukty, estakady, itp. Stosowane dotychczas iskierniki przeważnie pozostają w stanie zwarcia, co powoduje przepływ prądu trakcyjnego do ziemi powodując elektrokorozję konstrukcji metalowej. Jakość stosowanych w PKP iskierników niskonapięciowych jest niezadowalająca. Można stwierdzić, że większość z nich jest na stale zwarta lub tak zmontowana (brak możliwości wykonania pomiarów), że nie zadziała podczas wystąpienia zwarcia doziemnego, co z kolei może stworzyć duże zagrożenie porażeniowe podczas zwarć w sieci trakcyjnej. Jest to szczególne niebezpieczne gdy przez te obiekty przebiegają instalacje niskiego napięcia. Zwarty iskiernik powoduje elektrokorozję wywołaną prądami błądzącymi. Koszty remontu takich obiektów są zazwyczaj bardzo duże a ograniczenie prądów błądzących mogłoby wydłużyć okres ich żywotności. Dlatego też, jak najbardziej celowe jest uszynianie wymienionych obiektów przez ograniczniki niskonapięciowe (równoległe połączenie TZD-1N i TZD-1R) stosowane w systemie uszynień grupowych lub przez ograniczniki dwukierunkowe typu TZD-2NR w przypadku gdy rezystancja doziemna uszynianego obiektu jest większa niż 2 Ω.

## Wnioski

1. Zastosowanie urządzeń ochrony ziemnozwarciowej w obiektach zasilania, kontrola ciągłości kabli powrotnych i uszyniających oraz uszynienia otwarte konstrukcji przewodzących

przez ograniczniki niskonapięciowe stanowi kompleksowy system rozwiązujący problem wyłączalności zwarć doziemnych w obwodach zasilania trakcji elektrycznej 3 kV prądu stałego zapewniający jednocześnie właściwą ochronę przeciwporażeniową i ograniczenie do minimum prądów błądzących. Uzupełnieniem całości stanowią specjalne mierniki do pomiaru parametrów mających istotny wpływ na skuteczność działania całego systemu.

2. Opisane urządzenia mogą być stosowane w każdym systemie trakcji elektrycznej prądu stałego. Przykładem może być zastosowanie urządzeń ochrony ziemnozwarciowej (EZZ) w podstacjach trakcyjnych zasilających sieć trakcyjną na linii szybkiego tramwaju w Poznaniu oraz ograniczników niskonapięciowych typu TZD do ochrony wiaduktów na tej linii. Wymaga to pewnej modyfikacji układu wyzwalania tyrystorów (poziom 60 V) oraz zapewnienia większej wytrzymałości zwarciowej tyrystorów.
3. Z uwagi na rozległość sieci szynowej wszystkie prace remontowe i modernizacyjne w torach kolejowych powinny być wykonywane z zachowaniem zasady ciągłości sieci szynowej, tj konieczności stosowania połączeń obejściowych, nawet wówczas, gdy dany odcinek toru jest wyłączony z ruchu. Niedopuszczalna jest budowa lub modernizacja linii kolejowej bez wykonania połączeń międzytorowych. Dla uzyskania skuteczności takich połączeń wystarczy je wykonać co trzy kilometry [2].
4. Sposób wykorzystania torów dla potrzeb srk, wykonywanie połączeń międzytokowych i międzytorowych oraz sposób i miejsce uszynień konstrukcji powinny być wykonywane zgodnie z dokumentacją techniczną uzgodnioną przez wszystkie zainteresowane strony. Dotyczy to również wykonywanych zmian i modernizacji.
5. Połączenia międzytokowe i międzytorowe zapewniają:
   - znaczące zmniejszenie prądów błądzących niezależnie od stanu technicznego toru i sposobu uszynień,
   - prawie dwukrotnie zmniejszenie potencjałów szyn względem ziemi, co jest szczególnie istotne przy dużych obciążeniach i zwarciach,
   - lepszą i pewniejszą wyłączalność zwarć i ograniczenie napięć niebezpiecznych w warunkach awaryjnych (przerwa w torze).
6. Stosowany na modernizowanych liniach kolejowych PKP system uszynień grupowych w układzie otwartym oraz ochrona ziemnozwarciowa w obiektach zasilania, gwarantuje spełnienie wymagań wprowadzonych norm europejskich [3], [4] i [5]. Wymagań tych norm nie spełnia stosowany dotychczas system bezpośrednich uszynień indywidualnych.
7. Zastosowany we wszystkich podstacjach trakcyjnych układ ochrony ziemnozwarciowej, instalowany między szyną minusową a uziomem, umożliwia izolowanie szyny minusowej od ziemi przy jednoczesnym zapewnieniu wyłączalności zwarć doziemnych. Zastosowanie ochrony ziemnozwarciowej, niezależnie od rozwiązań technicznych w sieci powrotnej, zapewnia:
   - znaczące ograniczenie prądów błądzących,
   - znaczące zmniejszenie potencjałów sieci szynowej względem ziemi, co jest szczególnie istotne przy dużych obciążeniach i zwarciach.

Literatura:

1. Dziuba Władysław: *"Sieć powrotna i prądy błądzące"*. Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa 1995 r.
2. Politechnika Warszawska: *"Analiza rozwiązań ochrony ziemnozwarciowej i przeciwporażeniowej urządzeń sieci trakcyjnej 3 kV prądu stałego - uszynienia i uziemienia konstrukcji wsporczych sieci trakcyjnej"*. Praca studialna. Warszawa 1995 r.

3. Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa: *"Nowy system ochrony przeciwporażeniowej i ziemnozwarciowej dla urządzeń sieci trakcyjnej - badania w warunkach eksploatacyjnych".* Praca nr 3016/23, Warszawa 1996 r.
4. Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa*: „System uszynień grupowych w układzie otwartym dla linii kolejowych*". Praca nr 3048/23, Warszawa 2001 r.,
5. PN-EN 50122-1 - Zastosowanie kolejowe. Urządzenia stacjonarne. Część 1: Środki ochrony dotyczące bezpieczeństwa elektrycznego i uziemień.
6. PN-EN 50122-2 - Zastosowanie kolejowe. Urządzenia stacjonarne. Część 1: Środki ochrony przed oddziaływaniem prądów błądzących wywołanych przez trakcję elektryczną prądu stałego.
7. PN-EN 50123-5 - Zastosowanie kolejowe. Urządzenia stacjonarne – Aparatura łączeniowa prądu stałego. Część 5: Ograniczniki przepięć i ograniczniki niskonapięciowe do specyficznego zastosowania w systemach prądu stałego.