

Zygmunt Kulhawik, Paweł Anielak

Ochrona przeciwporażeniowa i ziemnozwarciowa w urządzeniach trakcji elektrycznej PKP w świetle norm europejskich

W artykule przedstawione są działania PKP zmierzające do zapewnienia wyłączalności zwarcć doziemnych w obwodach zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego przez zastosowanie systemu ochrony ziemnozwarciowej. Omówione zostały zasady działania poszczególnych elementów systemu, których stosowanie zdecydowanie poprawia bezpieczeństwo ludzi i ochronę urządzeń w strefie oddziaływania trakcji elektrycznej prądu stałego. Opisano kilkuletnie doświadczenia eksploatacyjne ze stosowania tego systemu w warunkach PKP oraz wpływ systemu na prądy błądzące jak też inne wymagania i uwarunkowania z tym związane, w tym odniesienie do norm europejskich wprowadzonych ostatnio do stosowania.

System zasilania trakcji elektrycznej 3 kV prądu stałego ma oba bieguny izolowane od ziemi. Biegun dodatni, który ma pełną izolację na poziomie napięcia znamionowego 3 kV jest połączony z siecią jezdnią. Biegun ujemny połączony jest z siecią szynową (szyny toru kolejowego wraz z łącznikami podłużnymi i poprzecznymi) izolowaną od ziemi za pośrednictwem warstwy tłucznia

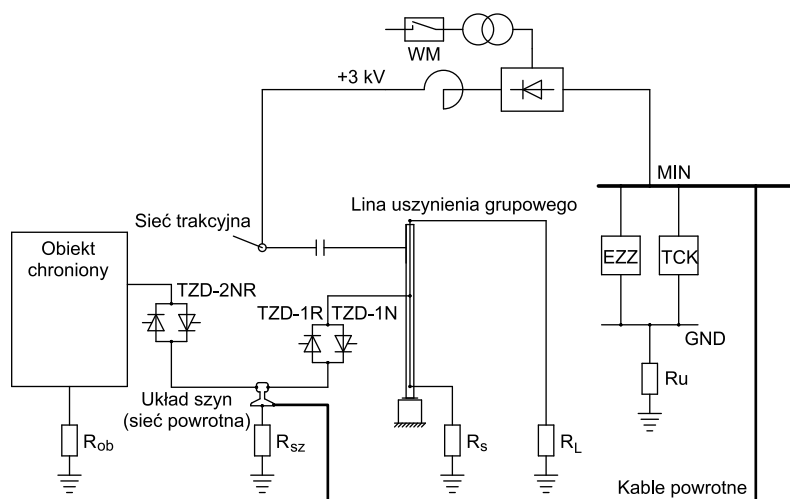
oraz podkładów drewnianych lub betonowych z przekładkami izolacyjnymi. Wymagania stawiane izolacji sieci szynowej względem ziemi są niejednokrotnie sprzeczne, np. ze względu na ochronę przeciwporażeniową i wyłączalność zwarcć doziemnych, rezystancja szyn względem ziemi powinna być jak najmniejsza, zaś ze względu na prądy błądzące oraz wymagania obwodów torowych dla potrzeb srk rezystancja ta powinna być możliwie duża.

Warunkiem właściwej ochrony przeciwporażeniowej w obwodach zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego jest szybkie wyłączenie prądu zwarcia przez wyłącznik szybki wyposażony w wyzwalacz pierwotny, wymagający do zadziałania dużej wartości prądu. Wyłączenie zwarcia następuje jeżeli wartość prądu przekroczy wartość nastawioną na wyzwalaczu pierwotnym.

Prezentowany system ochrony przeciwporażeniowej i ziemnozwarciowej z tyrystorowymi zwiernikami wielokrotnego działania zapewnia wyłączalność zwarcć doziemnych (szybkie przekształcenie zwarcia doziemnego w zwarcie międzybiegunowe o dużej wartości prądu zwarcia), właściwą ochronę przeciwporażeniową oraz w sposób znaczący ogranicza prądy błądzące. Jednym z warunków wyłączalności zwarcć jest zachowanie ciągłości sieci powrotnej.

Na rysunku 1 pokazano podstawowe elementy oraz rezystancje mające wpływ na poprawne działanie systemu ochrony oraz wielkość prądów błądzących.

Właściwe działanie systemu osiągnie się stosując ochronę ziemnozwarciową w obiektach zasilania (podstacje trakcyjne i kabiny sekcyjne), pomiar ciągłości połączeń uszyniających oraz uszynienie otwarte przez zwierniki tyrystorowe konstrukcji wsporczych sieci trakcyjnej i innych obiektów dla których wymagane jest uszynienie. W odniesieniu do konstrukcji wsporczych sieci trakcyjnej jest to uszynienie grupowe tzn. konstrukcje są uziemione i połączone między sobą liną uszynienia grupowego na długości 2–3 km i połączone do szyn poprzez zwierniki. Uszynienie otwarte gwarantuje, że w normalnym układzie zasilania, szyny kolejowe nie są połączone z ziemią przez uziomy konstrukcji, a więc rezystancja przejścia szyny ziemia zależy wyłącznie od stanu technicznego toru. Zastosowane rozwiązania spełniają wymagania wprowadzonych ostatnio norm [7 i 8]. Uzupełnieniem całego systemu jest wdrożenie do eksploatacji odpowiednich urządzeń pomiarowych, w tym impulsowego miernika rezystancji uziomów, wykorzystującego do pomiaru sieć szynową jako elektrodę o znanej rezystancji doziemnej oraz testera zwierników



Rys. 1. Rozmieszczenie urządzeń i rezystancji doziemnych mających wpływ na działanie systemu ochrony ziemnozwarciowej i przeciwporażeniowej

EZZ - Urządzenie ochrony ziemnozwarciowej w obiekcie zasilania, TCK - Tester ciągłości kabli powrotnych, TZD-1N, TZD-1R - zwierniki napięciowe stanowiące układ zwiernika dwukierunkowego, TZD-2NR - zwiernik dwukierunkowy w jednej obwodzie, R_u - rezystancja doziemna obiektu zasilania – maks. 2 Ω , R_l - wypadkowa rezystancja doziemna linii uszynienia grupowego – maks. 2 Ω , R_{sz} - rezystancja doziemna sieci szynowej – 0,1 do 0,2 Ω , R_{ob} - rezystancja doziemna obiektu chronionego

przystosowanego do ich kontroli bez wyłączenia napięcia z sieci trakcyjnej.

Ochrona ziemnozwarciowa w obiektach zasilania

Podstacje trakcyjne i kabiny sekcyjne wyposażone są w urządzenie ochrony ziemnozwarciowej typu EZZ, TUZZ lub UZZ. Podstawowym elementem urządzenia jest zwirnik dwukierunkowy przystosowany do przewodzenia prądu zwarcia w kierunku od szyny minusowej i części prądu obciążenia w kierunku od szyny minusowej do ziemi w warunkach awaryjnych sieci szynowej. W podstacjach trakcyjnych zasilanych bezpośrednio napięciem 110 kV, zwirnik przystosowany jest do przewodzenia części prądu zwarcia doziemnego w obwodzie 110 kV.

Zwirnik jest wyzwalany napięciem przyłożonym do jego zacisków zewnętrznych i nie wymaga dodatkowego zasilania. Poziom napięcia wyzwalającego zwirnik jest niższy od dopuszczalnych napięć rażeniowych, czyli zachowane są warunki ochrony przeciwporażeniowej. Urządzenie ochrony ziemnozwarciowej kontroluje w sposób ciągły prąd w obwodzie zwirnika, przekroczenie wartości progowej (600 A w podstacji trakcyjnej i 300 A w kabinie sekcyjnej) powoduje wyłączenie danego obiektu z ruchu. Urządzenie wyposażone jest w obwód komutacyjny o zdolności wyłączenia prądu do 100 A. W podstacjach trakcyjnych EZZ może być przystosowany do wyłączenia prądu do 300 A.

W przypadku powstania zwarcia doziemnego w obiekcie zasilania lub w kablu zasilacza, zwirnik urządzenia EZZ (TUZZ, UZZ) przechodzi w stan przewodzenia przekształcając zwarcie doziemne w zwarcie międzybiegunowe o dużej wartości prądu, co umożliwia szybkie wyłączenie zwarcia przez dany wyłącznik szybki. Jeżeli z różnych przyczyn to nie nastąpi, urządzenie EZZ poprzez automatykę podstacji trakcyjnej powoduje wyłączenie obiektu zasilania z ruchu po czasie ok. 200 ms (w kabinach sekcyjnych wyłączenie jest natychmiastowe).

Zastosowanie urządzeń ochrony ziemnozwarciowej w podstacjach trakcyjnych wyposażonych w obwód komutacyjny zapewnia, że szyna minusowa podstacji nie jest uziemiona w sposób ciągły. 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. Oznacza to, że zwirniki tyrystorowe stosowane w terenie wzdłuż linii kolejowej nie muszą być wyposażane w obwody komutacyjne, co byłoby bardzo kłopotliwe do zastosowania w terenie (obwód komutacyjny wymaga zasilania).

Równolegle do urządzenia EZZ montowany jest tester ciągłości kabli powrotnych typu TCK. Podczas pomiaru wykonywanego automatycznie, mierzona jest suma rezystancji; kabli powrotnych, rezystancji przejścia szyny–ziemia (R_{sz}), rezystancji uziomu obiektu zasilania (R_u) oraz rezystancji kabli powrotnych (uszyniających). Tester ma dwie nastawy progowe o wartościach 2 Ω i 4 Ω . Przekroczenie pierwszego progu jest sygnalizowane 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 (2 Ω) urządzenie sygnalizuje ten stan i wraca do normalnego cyklu pracy. Po przekroczeniu wartości drugiego pro-

gu (4 Ω) następuje blokada testera co wymaga ręcznego odblokowania. Na bazie testera powstał impulsowy (pojedynczy impuls pomiarowy) miernik rezystancji uziomów wykorzystujący sieć szynową jako sondę o znanej rezystancji względem ziemi odniesienia.

Ochrona ziemnozwarciowa w sieci trakcyjnej

W układzie uszynień grupowych są stosowane zwirniki typu TZD-IN i TZD-IR. Zwirniki te połączone równolegle stanowią zwirnik dwukierunkowy, gdzie zwirnik TZD-IN przystosowany jest do przewodzenia prądu zwarcia a TZD-IR 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), zwirnik TZD-IN 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. Po wyłączeniu prądu zwarcia zwirnik przechodzi do stanu pierwotnego.

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 zwirnika TZD-1R. Część prądu trakcyjnego płynie przez ten zwirnik i wypadkową rezystancję liny uszynienia grupowego (RL) do ziemi i wraca do podstacji trakcyjnej co przeważnie powoduje zadziałanie zwirnika 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.

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 zwirnika i szybkie wyłączenie prądu zwarcia. Dla obiektów których rezystancja względem ziemi jest większa niż 2 Ω stosuje się zwirnik dwukierunkowy typu TZD-2NR. W przypadku gdy rezystancja ta jest mniejsza niż 2 Ω należy stosować zestaw dwóch zwirników tj, TZD-1N i TZD-1R połączonych równolegle.

Stosowanie zwirników tyrystorowych w obwodach ochrony ziemnozwarciowej sieci trakcyjnej, wymaga prowadzenia okresowej kontroli ich sprawności technicznej. Sprawdzenie stanu technicznego zwirnika włączonego w system uszynień grupowych lub do systemu ochrony innych obiektów wymaga jego wyłączenia z tego systemu, co ze względów bezpieczeństwa byłoby możliwe po wyłączeniu napięcia z sieci trakcyjnej. Dla rozwiązania tego problemu został opracowany specjalny tester zwirników umożliwiający ich kontrolę bez wyłączenia napięcia z sieci trakcyjnej. Tester włącza się między 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 dalsze postępowanie polegające na odtłączeniu zwirnika od sieci szynowej i dołączeniu do testera. Sprawdzenie zwirnika polega na wymuszeniu impulsu napięciowego o wartości 100 lub 150 V. Przy impulsie 100 V zwirnik nie powinien działać dla dowolnej polaryzacji impulsu, natomiast przy impulsie 150 V o polaryzacji zgodnej z po-

laryzacją tyrystora zwiernik powinien zadziałać a przy polaryzacji przeciwnej nie działać.

Normy europejskie

W 2002 r. zostały wprowadzone do stosowania dwie normy europejskie dotyczące, bezpieczeństwa elektrycznego i uziemień w otoczeniu trakcji elektrycznej prądu stałego (PN- EN 50122-1) oraz ochrony przed oddziaływaniem prądów błędzących (PN-EN 50122-2) [7, 8].

W przypadku normy PN-EN 50122-1, dziedzina ta nie była dotychczas znormalizowana. Istnieje szereg opracowań w tym zakresie, jednak żadne z tych opracowań nie uzyskało jakiegokolwiek mocy prawnej. Należy nadmienić, że dotychczasowe normy dotyczące bezpieczeństwa elektrycznego przeważnie zawierały klauzulę, że nie dotyczy to trakcji elektrycznej prądu stałego. Parametry techniczne stosowanych zwierników tyrystorowych w zupełności spełniają wymagania tej normy. Podane w normie dopuszczalne napięcia rażeniowe są znacznie wyższe od charakterystyki napięciowo-czasowej stosowanych zwierników. Dotyczy to również wytrzymałości zwarciowej zwiernika, gwarantującej wyłączenie prądu zwarcia przez wyłączniki szybkie. Norma określa też zasady wykonywania instalacji nn w strefie oddziaływania trakcji elektrycznej, między innymi sugerując rozwiązanie pokazane na rysunku 1, w odniesieniu do obiektu chronionego, gdyby była w nim instalacja nn.

Norma PN-EN 50122-2 zastępuje dotychczasową normę PN-E/92-05024 dotyczącą ograniczenia prądów błędzących, która zawierała szereg wymagań szczegółowych, których spełnienie nie zawsze skutkowało dostatecznym ograniczeniem prądów błędzących. Wprowadzona norma PN-EN 50122-2 dla ograniczenia prądów błędzących wymaga w zasadzie spełnienia trzech podstawowych warunków:

- 1) jednostkowa rezystancja przejścia szyny ziemia nie może być mniejsza niż $2 \Omega\text{km}$,
- 2) części przewodzące, które nie są izolowane od ziemi nie mogą być bezpośrednio połączone z siecią szynową – uszynienia indywidualne konstrukcji wsporczych sieci trakcyjnej nie spełniają tego wymogu,
- 3) jeżeli ze względów bezpieczeństwa połączenie z siecią szynową jest nieuniknione należy stosować urządzenie ograniczające napięcie – stosowane w systemie ochrony ziemno zwarciowej zwierniki w zupełności spełniają wymagania stawiane w normie takim urządzeniom.

Doświadczenia eksploatacyjne stosowanego w PKP systemu ochrony ziemnozwarciowej

Aktualnie w PKP wszystkie podstacje trakcyjne i większość kabin sekcyjnych wyposażona jest w urządzenie ochrony ziemnozwarciowej typu EZZ, TUZZ bądź UZZ.

Urządzenia TCK zainstalowane są w kilkunastu obiektach zasilania. Jest to aktualnie przyjęty standard w odniesieniu do obiektów budowanych i modernizowanych.

System uszynień grupowych w układzie otwartym ze zwiernikami tyrystorowymi w odniesieniu do konstrukcji wsporczych sieci trakcyjnej jest zainstalowany na długości ok. 800 km z wykorzystaniem ok. 800 szt. zwierników tyrystorowych TZD-IN i TZD-IR. Zwierniki TZD-2NR w odniesieniu do innych konstrukcji wymagających uszynienia są zainstalowane w liczbie kilkudziesięciu sztuk.

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. Dotychczasowe doświadczenia potwierdzają walory tego rozwiązania, polegające na minimalnym zakresie uszkodzeń podczas zwarć doziemnych, w porównaniu ze skutkami bez tego urządzenia.

W niektórych podstacjach węzłowych występuje problem związany z przepływem dużego prądu między uziomem podstacji a szyną minusową w momencie zadziałania zwiernika 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 $0,2-0,5 \Omega$. Energetyka zawodowa wymaga dwustronnego uziemiania żył powrotnych. Omawiane normy przewidują taką sytuację proponując jednostronne uziemianie lub stosowanie urządzenia ograniczającego napięcie. 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 utrzymujący urządzenie w ruchu, wykonuje z reguły raz w roku. Tak więc przez okres jednego roku obwody te mogą pozostawać uszkodzone lub nie spełniać wymaganych parametrów, czego skutkiem 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 10 szt. testerów, przeprowadzone przez Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa [4], potwierdziły przedstawione wyżej cechy urządzenia. Podczas eksploatacji nastąpiło kilkakrotne wyłączenie obiektów zasilania z ruchu, każdorazowo w uzasadnionych przypadkach (np. spowodowane nie uzgodnionym odłączeniem dławika między kablami powrotnymi a siecią szynową, brakiem łączników szynowych, brakiem ciągłości połączeń uziemiających). System uszynień grupowych w układzie otwartym jest stosowany w PKP od 1996 r. na podstawie założeń opracowanych przez Politechnikę Warszawską [2]. Na podstawie badań laboratoryjnych i terenowych przeprowadzonych przez CNTK [3, 5] do systemu zostały wytypowane tyrystorowe zwierniki napięciowe typu TZD. Zwierniki 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. Sporadycznie występują też przerwy w ciągłości sieci szynowej (uszkodo-

dzenie lub kradzież dławika torowego, wymiana szyn lub rozjazdów bez wykonania połączeń obejściowych, itp.). Sytuacja taka wymagała zastosowania zwierników przystosowanych również do przewodzenia prądu od szyn do ziemi i to w sposób długotrwały, jako części prądu obciążenia. Aktualnie system 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. Prozaicznym problemem stosowania uszynień grupowych są kradzieże liny uszynienia grupowego.

Uszynienie przez zwiernik tyrystorowy jest szczególnie istotne dla budowli inżynierskich takich jak mosty, wiadukty, estakady, itp. Stosowany dotychczas iskiernik przeważnie pozostaje w stanie zwarcia co powoduje przepływ prądu trakcyjnego do ziemi powodując elektrokorozję konstrukcji metalowej. Jakość stosowanych w PKP iskierników niskonapięciowych często jest niezadowalająca [6]. Można stwierdzić, że większość z nich jest na stałe zwarta lub tak zmontowana (brak możliwości wykonania pomiarów), że nie zadziała podczas wystąpienia zwarcia doziemnego, co z kolei może stworzyć duże zagrożenie porażeniowe podczas zwarcia w sieci trakcyjnej, szczególnie gdy przez te obiekty przebiegają instalacje niskiego napięcia. Zwarty iskiernik powoduje elektrokorozję wywołaną prądami błędzającymi. Koszty remontu tych obiektów są zazwyczaj bardzo duże a ograniczenie prądów błędzących mogłoby wydłużyć okres żywotności omawianych obiektów. Dlatego też, jak najbardziej celowe jest uszynienie tych obiektów przez zwierniki tyrystorowe stosowane w systemie uszynień grupowych lub zwierniki dwukierunkowe gdy rezystancja doziemna danego obiektu jest większa niż 2Ω .

Wnioski

1. Zastosowanie urządzeń ochrony ziemnozwarciowej w podstawach trakcyjnych, wyposażonych w układ komutacyjny, umożliwia stosowanie zwierników w systemie uszynień otwartych bez obwodów komutacyjnych.
2. Ochrona ziemnozwarciowa w obiektach zasilania, kontrola ciągłości kabli powrotnych i uszyniających oraz uszynienia otwarte ze zwiernikami tyrystorowymi konstrukcji przewodzących stanowi kompleksowy system rozwiązujący problem wyłączalności zwarć

doziemnych w obwodach zasilania trakcji elektrycznej 3 kV prądu stałego, zapewniający jednocześnie właściwą ochronę przeciwporażeniową oraz ograniczenie do minimum prądów błędzących. Uzupełnieniem całości są specjalne mierniki do pomiaru parametrów mających istotny wpływ na skuteczność działania całego systemu.

3. Przedstawione rozwiązania ze zwiernikami tyrystorowymi spełniają wymagania wprowadzonych do stosowania norm europejskich [7, 8].



Literatura

- [1] Dziuba W.: *Sieć powrotna i prądy błędzące*. Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa 1995.
- [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.
- [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.
- [4] Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa: *Urządzenie do badania ciągłości kabli powrotnych i uszyniających*. Praca nr 3018/21. Warszawa 1998.
- [5] Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa: *Badania systemu uszynień grupowych w układzie otwartym dla linii kolejowych*. Praca nr 3048/23, Warszawa 2001.
- [6] *Kulhawik Zygmunt: Ochrona przeciwporażeniowa – zabezpieczenia ziemnozwarciowe w obwodzie 3 kV*. Technika Transportu Szynowego 3/1994.
- [7] PN-EN 50122-1. Zastosowanie kolejowe. Urządzenia stacjonarne. Część 1: Środki ochrony dotyczące bezpieczeństwa elektrycznego i uziemień.
- [8] PN-EN 50122-2. Zastosowanie kolejowe. Urządzenia stacjonarne. Część 1: Środki ochrony przed oddziaływaniem prądów błędzących wywołanych przez trakcję elektryczną prądu stałego.

Autorzy:

mgr inż. Zygmunt Kulhawik
inż. Paweł Anielak
PKP Energetyka Spółka z o.o.