

Systemy ochrony przed prądami błędzącymi i ich monitoringu oraz ochrona przeciwporażeniowa na II linii metra w Warszawie

Systems of protection against stray currents and their monitoring and protection against shock on the II line of the metro in Warsaw



Józef Dąbrowski

mgr inż.

*Zakład Trakcji Elektrycznej Instytut
Elektrotechniki, Warszawa*

j.dabrowski@iel.waw.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono system biernej ochrony przed prądami błędzącymi zastosowany na centralnym odcinku II linii metra w Warszawie. Opisano system Monitoringu Prądów Błędzących wdrożony na tym odcinku metra. Podano stosowane kryteria wobec układów pracy systemu ochrony przed prądami błędzącymi oraz ocenę korozyjnego zagrożenia podziemnej konstrukcji. Omówiono zasady wykorzystane w MPB do sygnalizacji zwarć szyny metra – konstrukcja metra. Przedstawiono zastosowany system ochrony przeciwporażeniowej pasażerów i pracowników metra.

Słowa kluczowe: *Systemy ochrony; Metro; Prąd błędzący*

Abstract: The paper presents a system of passive protection against stray currents that was applied to the central section of the second metro line in Warsaw. Stray currents monitoring system deployed on this stretch of metro line was described. The criteria for abnormal states assessment and assessment of electrochemical corrosion risks of the underground infrastructure were given. The principles used in SCM for signalling short circuits between subway rails and subway construction were given. Passenger and staff safety system was described.

Keywords: *Systems of protection; Metro; Current straying*

W czasie eksploatacji I linii metra w Warszawie można było zaobserwować istotne zmiany dotyczące bezpieczeństwa zarówno pasażerów jak całej infrastruktury metra. Związane to było z wydarzeniami jakie miały w tym okresie miejsce na świecie w różnych eksploatowanych liniach podziemnej kolejki - metra. Autor artykułu [1] przedstawił szereg zagadnień powiązanych z infrastrukturą i jej bezpieczeństwem jak również obsługi i pasażerów w czasie eksploatacji wprowadzonych już na etapie projektowania. Bezpośrednie bezpieczeństwo szczególnie pasażerów wsiadających i wysiadających z wagonów metra związane jest z faktem, że pojazd znajduje się na potencjale szyn po których się poruszają wagony, a pasażer na potencjale peronu. Potencjały te z reguły są różne i mogą być na niebezpiecznym dla człowieka poziomie. Bezpieczeństwo pośrednie związane jest z długotrwałym oddziaływaniem zmiennego potencjału szyn

zelektryfikowanego prądem stałym transportu naziemnego jak i podziemnego. Niezależnie od miejsca posiadania szyn zjawisko to związane jest prądami błędzącymi i korozją elektrochemiczną podziemnych konstrukcji metalowych.

System zasilania trakcji elektrycznej metra jest systemem prądu stałego o znamionowym napięciu 750 V. Zgodnie z zaleceniami Instytutu Kolejnictwa układ zasilania jest taki sam jak na I linii metra. Dzięki temu na odcinku ok 6 km mamy 4 podstacje trakcyjne zasilające szlak oraz jedną z zasobnikiem superkondensatorowym i polami zasilającymi tory odstawcze. Wymagania ochrony przeciwporażeniowej dla systemów trakcyjnych ac i dc podane są w normie [2], a w przypadku prądu stałego (dc) szereg zaleceń z [2] jest przeciwieństwem do wymagań ochrony przed prądami błędzącymi [3] – upływającymi z sieci powrotnej systemu trakcyjnego dc do otoczenia.

Zagadnienie to szerzej omówiono w literaturze [4]

Konstrukcja stacji i tuneli na II linii z punktu widzenia ochrony

Konstrukcja tuneli na II linii metra składa się okrągłych tubingów żelbetowych o długości ponad 1.1 m. Pierścien tubingów o średnicy ponad 5,5 m tworzony jest z siedmiu segmentów żelbetowych, które w procesie budowy tunelu wypełniają przestrzeń za drążącą go tarczą i oddzielają zewnętrzny grunt (elektrolit glebowy, ziemię) od wnętrza. Zarówno segmenty tubingów jak i same pierścienie są uszczelniane przekładką z tworzywa, która jest instalowana w specjalnych rowkach na krawędziach czołowych segmentów i tubingów. Zewnętrzna warstwa betonu nad zbrojeniem segmentu zapewnia izolację wodną i elektryczną. Od wewnątrz w każdym segmentcie wyprowadzone są marki

mające metaliczny styk ze zbrojeniem segmentu. Wyródkowo przeprowadzone pomiary metodą impulsową [5] oraz częstotliwościową [6] wykazały, że w stanie po zmontowaniu konstrukcji tunelu pomiędzy segmentami w pierścieniu jak segmentami sąsiednich pierścieni rezystancja wynosi od kilku do kilkudziesięciu Ω . Z punktu widzenia izolacji elektrycznej na napięcia 230 V w gniazdkach elektrycznych ta mała rezystancja oznacza jednak, że zbrojenie poszczególnych segmentów tubingów są izolowane od siebie oraz od ziemi zewnętrznej (elektrolitu glebowego) ponieważ różnice napięć pomiędzy tymi segmentami nie będą osiągać tak dużych wartości.

O izolacji konstrukcji wykonanych techniką ściany szczelinowej czyli wentylatorowni szlakowych oraz korpusów stacji na II linii pomiarowo niestety nie można nic powiedzieć. Stacje metra o dwóch lub trzech komorach - pasażerskiej, rozjazdów oraz torów odstawczych nie zostały w czasie ich budowy wyposażone w izolowane elektrycznie dylatacje np. na styku poszczególnych komór. Tym samym konstrukcje te pozbawiono możliwości kontrolowanej biernej ich ochrony przed prądami błędzącymi pochodzącymi z obcych źródeł np. trakcji tramwajowej czy kolejowej lub glebowych makroogniw. Jednocześnie brak takich dylatacji uniemożliwia realizację pomiaru konduktancji przejścia korpusu wybudowanej już stacji względem otaczającej ją ziemi (elektrolitu glebowego). W tym przypadku pozostaje jedynie doświadczenie z budowy i eksploatacji I linii, gdzie korpusy stacji wykonano również techniką ściany szczelinowej. Na I linii konstrukcje te pozbawione są warstwy izolacyjnej podobnie jak i drażone tunele wykonane z tubingów żeliwnych [7]. Na II linii mamy zatem najprawdopodobniej przypadek przewidywany w [8], gdzie korpusy konstrukcji wykonanych techniką ściany szczelinowych stanowią uziomy, zaś konstrukcje tuneli odpowiadają połączeniom kablowym pomiędzy uziomami. Powyższe rozwiązanie wynika z faktu, że wewnętrzne metalowe instalacje ułożo-

ne w tunelach, a zwłaszcza metalowe korytka kablowe i magistrala uziemiająca przechodzące przez wszystkie konstrukcje łączą je także elektrycznie. Podobną funkcję spełniają ekrany kabli elektroenergetycznych SN i nn przyłączane w miejscach podłączenia do rozdzielni i odbiorników w celu zapewnienia bezpieczeństwa porażeniowego. Ekrany kabli teletechnicznych przyłączane są na krańcach do zbrojenia w celu eliminacji zakłóceń od pracujących wewnątrz konstrukcji metra aparatów i urządzeń łączności, elektronicznych, energoelektronicznych oraz elektrycznych. Połączenie te w znacznie mniejszym stopniu, ale również przyczyniają się do wyrównywania potencjałów pomiędzy konstrukcjami ze ścian szczelinowych. Dodatkowo w tunelach wykonana jest wewnętrzna ekwipotencjalizacja wszystkich segmentów tunelu znajdujących się ponad poziomem płyty torowiska. Bezpieczeństwo porażeniowe od napięć przemianych 50 Hz z systemu elektroenergetycznego do zasilania potrzeb własnych zapewnia system uziomów fundamentowych w korpusach stacji i wentylatorni szlakowych oraz pięcioprzewodowa instalacja nn w systemie TN.

System ochrony przed prądami błędzącymi

Podziemna konstrukcja metra, a dokładniej jej zbrojenie, narażona jest na oddziaływanie zewnętrznych źródeł prądów płynących w ziemi oraz własnego systemu trakcyjnego. W warunkach Warszawy do źródeł zewnętrznych należy zaliczyć szynowe trakcje kolejową i tramwajową, makroogniwa występujące na terenie miasta [9] oraz prądy telluryczne pochodzące od zaburzeń promieniowania elektromagnetycznego słońca. Jak ustalono [10] nieregularność występowania zjawisk burz magnetycznych oraz zróżnicowany kierunek przepływu prądów tellurycznych nie powodują uszkodzeń korozyjnych w konstrukcjach podziemnych, chociaż przyczyniają się do uszkodzeń w systemach elektroenergetycznych. Oddziaływania sys-

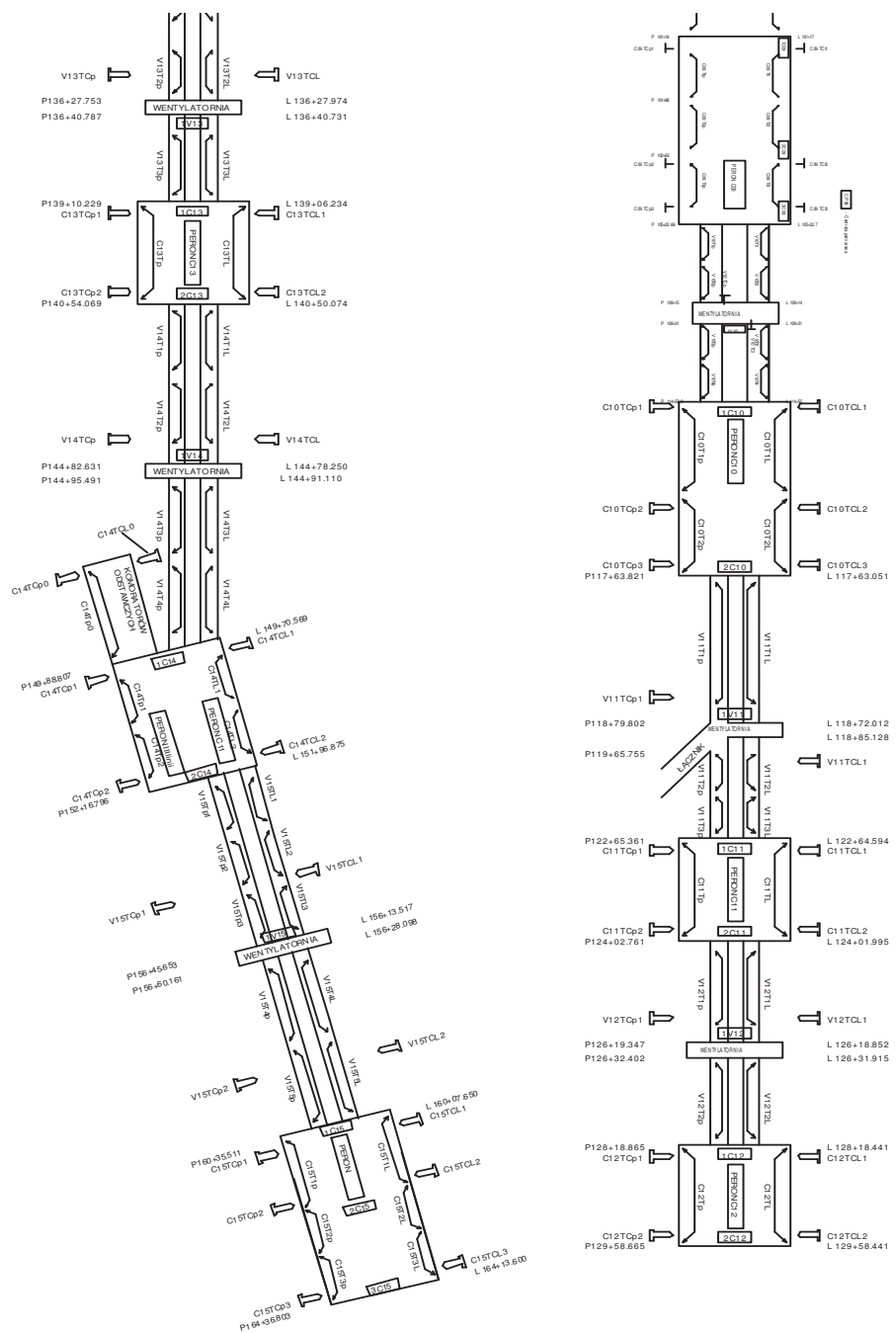
temu kolejowego i tramwajowego są uzależnione od taboru, rozkładu jazdy, stanu sieci powrotnej oraz warunków pogodowych, a także w znacznym stopniu od wzajemnego usytuowania względem podziemnej konstrukcji. Jednym ze sposobów biernej ochrony przed oddziaływaniami prądów w ziemi jest izolowanie konstrukcji od elektrolitu glebowego, drugim jest zmiana rezystancji wzdłużnej konstrukcji przez wprowadzanie izolacji poprzecznych (w rurociągach są to monobloki) sekcjonujących długą konstrukcję. Następne metody ochrony należą do grupy aktywnych i w tej pracy zostały pominięte. Na II linii metra konstrukcje tuneli (jego zbrojenie) jest izolowane od zewnętrznego elektrolitu glebowego co oznacza zastosowanie środka ochrony przed oddziaływaniem prądów błędzących na tunele. W celu zmniejszenia wymiany prądu pomiędzy konstrukcjami stacji i wentylatorni szlakowych centralnego odcinka II linii wykorzystano izolacje tuneli od ziemi (elektrolitu glebowego) do wprowadzenia sekcjonowania odcinków z konstrukcjami ścian szczelinowych. Tylko dzięki tej zewnętrznej izolacji w tunelach można było uzyskać poprzeczne dylatacje z izolacją wykonując zwieralne przerwy w ciągłości magistrali uziemiającej oraz w korytkach kablowych na wybranych przekrojach tubingów. Dzięki temu uzyskano możliwość oddzielania od siebie korpusów sąsiednich stacji i wentylatorni szlakowych. Zanim sprawdzono skuteczność tego środka ochrony przed prądami wykonano badania pojedynczych przerw oraz sprawdzono bezpieczeństwo porażeniowe i selektywność działania zabezpieczeń przy zwarcia w sieciach nn prądu przemianego zasilających obiekty np. sterowania ruchem, czy oświetlenia zainstalowane w tunelach oraz wentylatorniach szlakowych. Uzyskano pozytywne wyniki pomiarów impedancji pętli zwarcia oraz rezystancji uziemień zarówno przy zwartych jak i rozwartych zworach na dylatacjach w tunelach dzięki temu dopuszczono do zastosowania system biernej ochrony przed prądami błędzącymi zwłaszcza

z obcych źródeł. W celu zminimalizowania oddziaływania własnej sieci powrotnej zbudowanej wewnątrz konstrukcji należy zadbać o wyizolowanie sieci szynowej oraz aparatury do niej przyłączonej od konstrukcji. Posadowienie i mocowanie torowiska w systemie EBS przy prawidłowym wykonaniu oraz braku kapiącej, a tym bardziej stojącej wody na podtorzu w której zanurzona byłaby stopka szyny, sprzyja uzyskaniu jednostkowej konduktancji przejścia szyny – tunel pojedynczego toru wymaganej w normie [3] wydanej w 1998 r. Istotną wadą centralnego odcinka jest długość torowiska bez możliwości jego podziału na krótsze odcinki. Utrudnia to w znaczący sposób ustalenie możliwych w czasie eksploatacji miejsc pojawiania się zwarć pomiędzy trakcyjną siecią powrotną a zbrojeniem podziemnej konstrukcji, czego doświadczono już w czasie eksploatacji. Ocenę skuteczności działania ochrony przed prądami błędzącymi wszystkich źródeł na konstrukcję metra zapewnia system Monitoringu Prądów Błędzących

System MPB

W celu dobrania układu połączeń biernego systemu ochrony przed prądami błędzącymi na centralnym odcinku II linii metra wykonany jest układ pomiarowo-rejestrujący zwany systemem Monitoringu Prądów Błędzących, którego zadaniem jest rejestrowanie oraz przechowywanie wartości mierzonych wielkości, a także sygnalizowanie wystąpienia zwarć pomiędzy siecią powrotną metra a konstrukcją. System MPB jest cało liniowy, ale składa się z poszczególnych szafek pomiarowych rozmieszczonych w konstrukcjach stacji i wentylatori. Cztery znaki alfanumeryczne zapewniają opis szafki, który jednoznacznie określa położenie punktu w konstrukcji centralnego odcinka. Każda szafka obejmuje obszar w którym mierzone są występujące w nim następujące wielkości:

- ST – napięcie pomiędzy konstrukcją, a szynami w miejscu zainstalowania szafki V
- S – spadek napięcia w szynach po-



1. Idea systemu monitoringu prądów błędzących na centralnym odcinku II linii metra w Warszawie. Po lewej stronie fragment od stacji Rondo Daszyńskiego – (C09) do stacji Nowy Świat – Uniwersytet – (C12) na lewym brzegu Wisły, a po prawej stronie tunele (V13) i stacja Kopernik (Powiśle) – (C13) do stacji Dworzec Wileński – (C15).

- IP – prąd podstacji trakcyjnej zasilającej pojazd metra A
- TC – potencjał konstrukcji względem cynkowej elektrody odniesienia wystającej z konstrukcji V
- T – spadek napięcia na konstrukcji w mV z możliwością przeliczenia na wartość prądu płynącego w konstrukcji A
- SKT – napięcie pomiędzy szynami kolejowymi a konstrukcją metra V
- STrT – napięcie pomiędzy szynami tramwajowymi a konstrukcją metra V

Na rysunku 1 pokazano schemat idealnego rozmieszczenia szafek pomiarowych w konstrukcjach centralnego odcinka II linii metra oraz wielkości TC i T. Szafki pomiarowe podobnie jak i elektrody zainstalowane są na stacjach oraz wentylatoriach szlakowych. W przypadku stacji trójkomorowych C09 i C15 rozmieszczono po trzy szafki, zaś na pozostałych po dwie oraz po jednej w każdej wentylatori. Na nieparzystych stacjach znajdują się podstacje

Tab. 1. Zestawienie wartości ekstremalnych i średnich napięcia szyny tunel ST wzdłuż centralnego odcinka II linii metra zarejestrowanych w dniu 23.11.2015 r w czasie od godz. 7:00 do 8:30.

TABELA WYNIKÓW PODSTAWOWYCH POMIARÓW RZECZYWISTYCH								
Początek pomiaru : 15.11.23 07:00:00								
Koniec pomiaru : 15.11.23 08:30:00								
Liczba pomiarów przewidywana :10800								
CP	WIELKOŚĆ	ZAKR.	MIN	MAX	SR-	SR+	%+	l. pom.
ICP09	1C09ST	100,0 V	-25,391	23,926	-0,753	4,677	82,685	10800
ICP09	2C09ST	100,0 V	-25,513	24,048	-0,755	4,674	82,657	10800
ICP09	3C09ST	100,0 V	-24,170	24,658	-0,762	4,406	81,407	10800
ICP09	V10ST	100,0 V	-20,874	21,973	-0,811	3,658	78,148	10800
ICP09	C10ST	100,0 V	-20,752	20,508	-3,078	0,934	29,852	10800
ICP11	2C10ST	100,0 V	-15,869	20,508	-0,889	2,795	69,046	10800
ICP11	V11ST	100,0 V	-16,357	20,508	-0,834	2,781	68,130	10800
ICP11	V11STI	100,0 V	-99,976	100,098	-10,543	13,340	54,389	10800
ICP11	C11ST	100,0 V	-16,968	19,897	-0,795	2,946	68,704	10800
ICP11	C11STI	100,0 V	-99,976	100,098	-10,892	13,015	53,593	10800
ICP11	2C11ST	100,0 V	-16,846	20,020	-1,022	2,674	64,148	10800
ICP11	V12ST	100,0 V	-9,521	9,155	-1,097	0,921	50,019	10800
ICP13	2C12ST	100,0 V	-21,362	17,578	-2,412	1,846	47,259	10800
ICP13	V13ST	100,0 V	-28,442	22,095	-3,235	1,632	43,120	10800
ICP13	1C13ST	100,0 V	-21,118	16,602	-2,323	1,024	41,750	10800
ICP13	2C13ST	100,0 V	-35,156	27,954	-3,898	1,590	38,287	10800
ICP14	V14ST	100,0 V	-41,016	33,691	-5,293	1,253	28,991	10800
ICP14	1C14ST	100,0 V	-44,434	32,349	-6,381	1,236	26,574	10800
ICP14	2C14ST	100,0 V	-46,143	33,447	-6,850	1,283	25,815	10800
ICP15	1C15ST	100,0 V	-50,293	42,603	-7,140	1,396	26,454	10800
ICP15	2C15ST	100,0 V	-50,659	41,504	-7,156	1,397	26,565	10800
ICP15	3C15ST	100,0 V	-50,537	41,504	-7,155	1,394	26,528	10800

Uwaga: Wielkości V11STI oraz C11STI to napięcia szyn I linii metra względem zbrojenia korpusu odpowiednio łącznika pomiędzy obiema liniami i oraz stacji C11. Należy zwrócić uwagę, że w tym zestawieniu są to dwie wielkości o największych wartościach ekstremalnych i średnich.

trakcyjne zasilające pociągi metra. Ze zbiorczego bocznika w szafie kabli powrotnych do systemu MPB wprowadzone są sygnały proporcjonalne do wielkości prądu pobieranego z podstacji.

W miejscach zbliżeń, skrzyżowań oraz wspólnego przebiegu szyn tramwajowych i kolejowych rejestrowane są napięcia pomiędzy tymi szynami a konstrukcją.

Opis każdej zarejestrowanej wielkości pozwala intuicyjnie jednoznacznie określić miejsce skąd (z którego miejsca) ona pochodzi.

W szafkach pomiarowych znajdują się przetworniki analog cyfra o zakresach wejściowych sygnału analogowego dopasowanych do mierzonych wielkości. Liczba przetworników w

szafce zależna jest od ilości mierzonych sygnałów. Kolejność występowania sygnałów w szafkach zapisana jest w pliku konfiguracyjnym. Dzięki temu przetworzone na cyfrę sygnały, są przesyłane z szafek światłowodową siecią Ethernetową do serwera w Centralnej Dyspozytorii. Z każdej szafki na centralnym odcinku II linii metra można za pomocą oprogramowania wgranego na laptopa sprawdzić czy pozostałe aktualnie pracują, podglądać jakie wartości chwilowe są rejestrowane z częstotliwością 2 Hz oraz przegrać zarejestrowane dane za ostatni miesiąc. Wcześniejsze dane są dostępne na serwerze w CD. Do wizualizacji wyników systemu MPB służy specjalistyczne oprogramowanie ANPRB2. Wizualizacja dotyczy wszystkich wielkości

rejestrowanych w MPB, które można zestawiać centralami pomiarowymi (grupami do czterech szafek pomiarowych zainstalowanych obok siebie w obrębie nieparzystej stacji) lub wybraną jedną wielkością za cały odcinek lub z kilku szafek. Obsługa programu umożliwia uzyskanie wyników za dowolny przedział czasu o ile są dostępne pliki z rejestracją i w tym przedziale czasu nie nastąpiły zmiany w konfiguracji – pracy wszystkich elementów całego systemu. Prezentacja może być w postaci tabelarycznej – „wyników podstawowych” – zawierającej zestawienie wartości ekstremalnych oraz średnich dodatnich i ujemnych a także wskaźnika proporcji sygnałów dodatnich i ujemnych w analizowanym przedziale czasu. Przykładowo pokazano w tabeli **1** wydruk z ekranu tabelarycznego zestawienia wyników rejestracji napięcia ST szyny metra – (magistrala) zbrojenie konstrukcji metra zarejestrowane w dniu 23. listopada 2015 r w godzinach od 7:00 do 8:30. Wyniki można zaprezentować także w formie graficznych wykresów przebiegów czasowych wartości chwilowych i średnich 30 minutowych oraz dla przedziału czasu w skali drogi tj. wzdłuż konstrukcji. Na rysunkach **2** i **3** pokazano wyniki z tabeli **1** w postaci wykresów odpowiednio z wartości chwilowych i z wartości uśrednionych. Oprogramowanie umożliwia także analizy korelacyjne, tworzenie histogramów, które na obecnym etapie służą celom poznawczym i porównawczym np. ze stosowanymi w praktyce kryteriami oceny zagrożeń.

Ponieważ wykresy z rys. **2** i **3** dotyczą tego samego przedziału czasu zawartego w pełnych i półgodzinnych przedziałach czasu to oba wykresy będą jednakowe. Wartości uśredniane przechowywane w programie są zliczane za 15 minut. Zastosowany w analizie wyników 30 minutowy przedział czasu to efekt doświadczeń przy pomiarach zagrożeń korozyjnych od prądów błądzących różnych podziemnych konstrukcji metalowych.

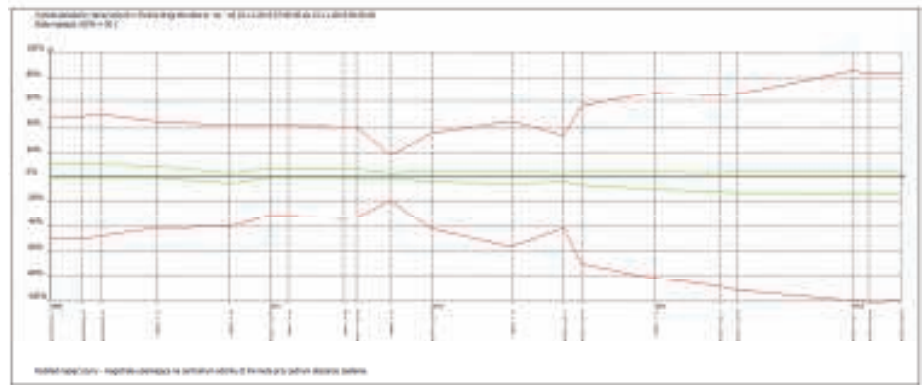
Pierwsza kolumna tabeli **1** określa centralę pomiarową – stację z zasil-

niem trakcyjnym wokół której są mierzone i archiwizowane wielkości. W drugiej kolumnie występuje opis wielkości, dzięki któremu wiadomo w której szafce pomiarowej ona występuje, zaś w trzeciej kolumnie podany jest zakres pomiarowy zastosowanego przetwornika. Następne cztery kolumny to kolejno wartości ekstremalne minimalna i maksymalna oraz średnie ujemne i dodatnie. W kolejnej kolumnie podany jest procent wartości powyżej zera z liczby próbek podanej w ostatniej kolumnie. Najczęściej liczba próbek odpowiada zadeklarowanemu przedziałowi czasu dokonywanej analizy przy częstotliwości próbkowania 2 Hz. W przypadku, gdy liczba ta jest mniejsza, to oznacza, że brakująca liczba próbek uległa utracie np. przy transmisji lub przetwarzaniu sygnału analogowego na cyfrowy.

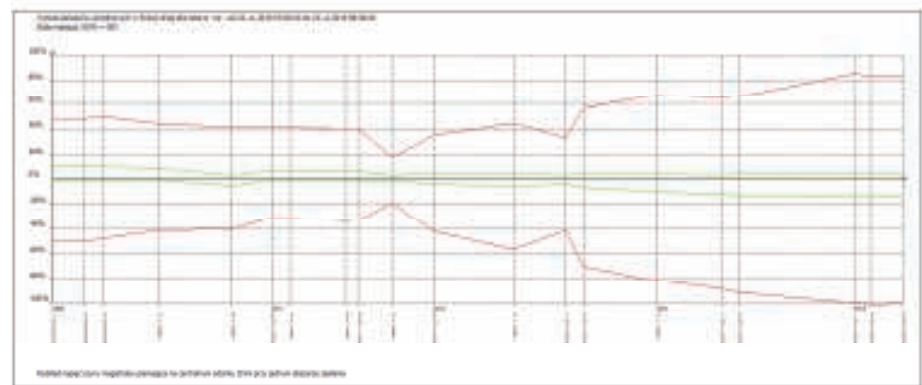
Ocena zagrożenia od prądów błądzących

Wstępnej oceny oddziaływania poszczególnych źródeł trakcyjnych na konstrukcję metra dokonuje się wyliczając wartości średnie dodatnie i ujemne z napięć pomiędzy konstrukcją a szynami: ST, SKT i STRT w czasie jednej doby. Zgodnie z literaturą [11] tylko przekraczanie wartości podanych w normie [12] należy uznać jako zagrożenie, zaś wartości poniżej tych progów wymagają dodatkowych informacji. Ostrzejszym podejściem do oceny źródeł jest wyliczanie wartości średnich z godzin szczytu, kiedy ruch jest największy jak i oczekiwane średnie.

Wartości prądów płynących w konstrukcji wyznaczane są metodą pośrednią, która zwłaszcza przy słabo izolowanych konstrukcjach podziemnych jest mało dokładna. Wszelkie zabiegi i poprawki wprowadzane do układu pomiarowego metoda techniczną przy wyznaczaniu rezystancji wzdłużnej odcinka dotyczą rezystancji w danym momencie pomiaru. Korzystanie z tej wartości w różnym okresie czasu oznacza założenie stałości wyznaczonej rezystancji wzdłużnej



2. Przykładowy wykres rozkładu napięcia szyny tunel wzdłuż centralnego odcinka II linii metra zarejestrowany w dniu 23.11.2015 r pomiędzy 7:00 a 8:30. Wykres utworzony z wartości chwilowych (rzeczywistych) kolor czerwony to wartości ekstremalne występujące w analizowanym przedziale czasu; kolor zielony to wartości średnie dodatnie i ujemne za ten sam przedział czasu.



3. Rys. 3 Przykładowy wykres rozkładu napięcia szyny tunel wzdłuż centralnego odcinka II linii metra zarejestrowany w dniu 23.11.2015 r pomiędzy 7:00 a 8:30. Wykres utworzony z wartości uśrednionych; kolor czerwony to wartości ekstremalne występujące w analizowanym przedziale czasu; kolor zielony to wartości średnie dodatnie i ujemne za ten sam przedział czasu.

w czasie. Założenie to może budzić obiekcje zwłaszcza jeżeli po pomiarach na danym odcinku były prowadzone prace związane z uszczelnianiem konstrukcji z wykorzystywaniem iniekcji. Dodatkowo spadki napięcia na konstrukcji mierzone są w miliwoltach i dlatego należy sprawdzać przesunięcie wartości zerowej przetworników. Pomimo tych zastrzeżeń wyraźnie są widoczne zmiany prądów w konstrukcji (spadków napięć na konstrukcji) wynikające z godzin ciszy nocnej jak i szczytu ruchu pojazdów trakcyjnych. Wprowadzanie zmian w układzie połączeń biernej ochrony przed prądami błądzącymi również powoduje widoczne zmiany (zwłaszcza na wartościach średnich) w rozpyłach prądów w konstrukcji zarówno w godzinach nocnych jak i szczytów w ruchu pojazdów. Wartości prądów przepływających przez po-

szczególne fragmenty konstrukcji i ich zmiany mogą być wskaźnikiem, ale w godzinach ciszy nocnej często średnie 30 minutowe nie są równe zero. To świadczy o prądach makroogniw lub depolaryzacji konstrukcji jeżeli średnie maleją w czasie trwania ciszy nocnej i utrudnia ocenę zagrożenia.

Najistotniejszym kryterium oceny zagrożenia korozyjnego podziemnej konstrukcji od prądów błądzących jest zmiana potencjału tej konstrukcji. Zgodnie z normą [13], która jest odpowiednikiem normy europejskiej, można przyjmować, że zagrożenie konstrukcji metra przez korozję elektrolityczną nie „występuje” – szybkość korozji konstrukcji jest na technicznie dopuszczalnym poziomie, jeżeli wartość średnia przesunięcia potencjału względem ziemi ΔTC w godzinie szczytowego ruchu, w stosunku do wartości tego potencjału przy braku

prądów błądzących, jest mniejsza niż

$$\Delta TC = TC_{sz} - TC_n < + 100 \text{ mV}$$

(1)

Przy czym TC_{sz} jest wartością średnią potencjału tunelu w czasie szczytu porannego (godz. 6:30-8:30) lub szczytu popołudniowego (godz. 14:30-17:00), natomiast TC_n jest wartością średnią tego potencjału w czasie nocnej przerwy w ruchu (godz. 1:00-3:00).

Na centralnym odcinku II linii metra w Warszawie dodatnie przesunięcia zmian średnich potencjału konstrukcji ΔTC nie przekraczają +25 mV i występują na obu krańcach tego odcinka. Największe ujemne przesunięcie ΔTC występuje na korpusie stacji C14 i oznacza wpływanie do konstrukcji prądów upływających z pobliskich torów kolejowych śródmiejskich i dalekobieżnych. Wartość ta przekracza -50 mV i ze względu na brak dylatacji z izolacją w ścianach na styku komór tej stacji nie mamy technicznej możliwości zbadania wpływu zmiany rezystancji wzdłużnej korpusu stacji na obniżenie amplitudy zmian ΔTC .

Obecnie prowadzone są prace porównawcze nad korelacjami rejestrowanych wielkości i zagrożeniem konstrukcji oraz sygnalizacją zwarć w sieci powrotnej względem konstrukcji tuneli.

Wykrywanie zwarcia

Ponieważ stan zwarcia sieci powrotnej metra z jej konstrukcją jest zjawiskiem nader niepożądanym z punktu widzenia trwałości podziemnej konstrukcji metra system MPB został wyposażony w procedurę wykrywania stanów zwarcia. Na II linii służą do tego celu pary sygnałów ST i TC. W godzinach szczytu za każde 30 minut wyliczane są wartości średnie dodatnie i ujemne wielkości ST oraz dla wybranych wielkości TC wyznaczane są wartości ekstremalne. Jeżeli para sygnałów spełnia jednocześnie dwa następujące warunki:

Dla średniej ujemnej

$UST30- > USTg-$ oraz $TC_{min} < TC_{grmin}$

Dla średniej dodatniej

$UST30+ < USTg+$ oraz $TC_{max} > TC_{grmax}$

To system sygnalizuje zwarcie podając jednocześnie wielkości, które przekroczyły wartości graniczne. Wartości graniczne zostały ustalone w efekcie długotrwałych obserwacji normalnego stanu jazdy metra z pasażerami zarówno w dni robocze jak i świąteczne oraz wycień wartości średnich ST dla poszczególnych 30 minutowych przedziałów czasu w godzinach szczytów porannego i popołudniowego. Z ponad 5 miesięcy obserwacji wyliczono dla każdej wielkości ST wartości średnie dodatnie i ujemne. Sprawdzono rozrzut wyników poszczególnych średnich 30 minutowych. Za wartość $USTg-$ oraz $USTg+$ dla danego punktu pomiarowego przyjęto 35% odpowiednich wyliczonych średnich długoterminowych. Podobna analiza dotyczyła wielkości TC, których w systemie jest dużo więcej, ale niektóre z zamontowanych elektrod generują sygnały z nieoczekiwanymi przebiegami – np. brak charakterystycznych dobowych zmian potencjału konstrukcji. W przypadku potencjałów rejestrowane były wartości ekstremalne podczas normalnej pracy. Do sygnalizacji zwarć wybrano elektrody o większej amplitudzie zmian. Ostateczną weryfikacją przyjętych wartości granicznych było przeprowadzenie 30 minutowego kontrolowanego zwarcia na zaciskach urządzenia służącego ochronie porażeniowej pasażerów.

Niestety, ale przed przystąpieniem do poszukiwania miejsca wystąpienia zwarcia należy dokonać przeglądu wyników rejestracji z okresu sygnalizacji zwarcia. Istotną wskazówką są kierunki prądów w konstrukcji. W miejscu zwarcia prądy w tym samym czasie spływają lub wypływają zależnie od polaryzacji napięcia ST. Odcinek pomiaru spadku napięcia na konstrukcji, gdzie występuje zwarcie wykazuje nieokreślone wartości chwilowe lub średnie zaś bezpośrednio sąsiednie mają przeciwne znaki. Poważną przeszkodą w tej analizie mogą być przekroczenia zakresów pomiarowych

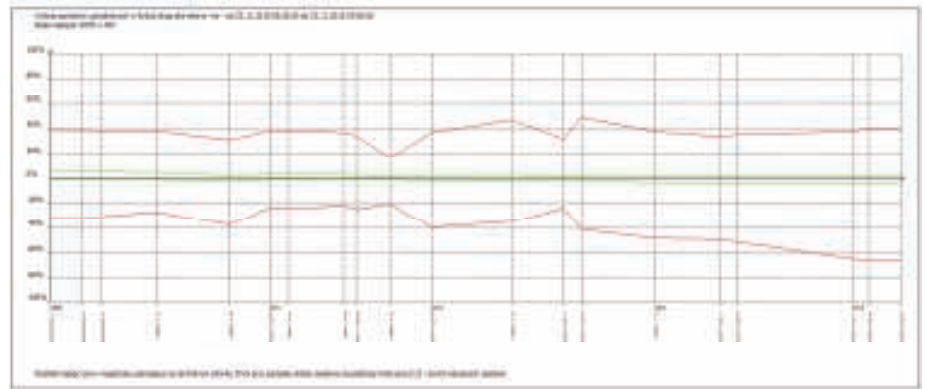
przetworników spadku napięcia na konstrukcji. Należy wtedy poszukiwać krótkich przedziałów czasu, gdy nie występują przekroczenia zakresu przetwornika. Przy typowaniu obszaru do poszukiwania miejsca zwarcia warto również porównać przebiegi czasowe potencjałów w pobliżu minimalnych wartości ST. Wahania potencjału elektrod po stronie miejsca zwarcia (toru i ściany) bywają tam zazwyczaj większe. Zmienność potencjału pod wpływem zwarcia sieci powrotnej metra z konstrukcją byłaby najprawdopodobniej większa jeżeli elektrody odniesienia byłyby zainstalowane do 3 m nad główką szyny metra, a nie jak w przypadku centralnego odcinka do 4 m pod powierzchnią ziemi. Czas eksploatacji wykaże, gdzie wystąpią uszkodzenia izolacji sieci powrotnej względem konstrukcji. W początkowym okresie rozruchu wystąpiły uszkodzenia izolacji na zwrotnicy oraz posadowieniu aparatury przyłączonej do sieci powrotnej, a zamontowanej na podstacji trakcyjnej stacji C11. Brak możliwości wydzielenia odcinków torowych na II linii metra w czasie godzin nocnych jest znaczącą barierą utrudniającą lokalizowanie (poszukiwanie) miejsca wystąpienia zwarcia w terenie.

Zabezpieczenie przeciwporażeniowe

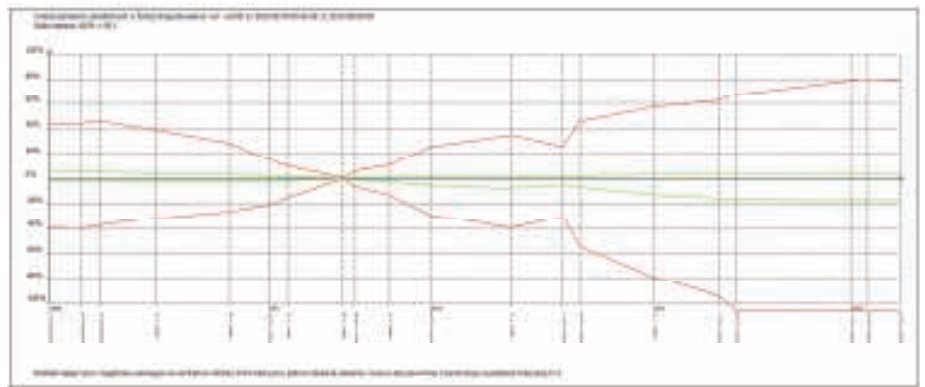
Wskazówki jak zapewniać bezpieczeństwo elektryczne w systemach trakcyjnych podane są w normie [2]. Zachowanie odstępów oraz osłon izolacyjnych itd. realizowane jest w projekcie konstrukcji instalacji systemu trakcyjnego metra przy uwzględnieniu wymagań [2]. Dobra izolacja szyn, po których przemieszczają się składy metra, sprzyja zgodnie z [4] wzrostowi napięcia pomiędzy szynami a zbrojeniem konstrukcji – magistralą uziemiaczą przy jednakowym obciążeniu systemu zasilania. Wielkość napięcia ST jest zależna również od odległości pomiędzy podstacjami zasilającym pociągi. Zalecana odległość pomiędzy podstacjami trakcyjnymi jest nie więk-

sza niż 2 km i z reguły na centralnym odcinku metra jest zapewniona. Przy klasycznym dwustronnym zasilaniu z wykorzystaniem czterech wybudowanych podstacji trakcyjnych obszar zasilania obejmuje odcinki dwóch linii pomiędzy sąsiednimi podstacjami. Przy zachowaniu warunków bezpieczeństwa sterowania ruchem pojazdów wymiana energii hamowania pociągu metra przy takim rozwiązaniu zasilania występuje jedynie wtedy, gdy na sąsiednim torze pomiędzy tymi podstacjami (obszarze zasilania) znajduje się pociąg jadący w przeciwnym kierunku. Zjawisko to występuje tylko przy gęstym ruchu pociągów i nadal jest raczej przypadkowe. W celu zwiększenia skuteczności rekuperacji energii na sąsiedni pojazd - do sieci - przy hamowaniu każdego ze znajdujących się na linii składów wprowadzono rozszerzony obszar dwustronnego zasilania do całego odcinka II linii metra dostępnego dla pasażerów. Na wspólny obszar pracują cztery podstacje z których dwie zewnętrzne pracują jak przy dwustronnym zasilaniu, zaś dwie wewnętrzne wzmacniają zasilanie pracując równolegle. Ubocznym skutkiem tego rozwiązania jest wzrost napięcia szyny tunel ST przy zachowaniu gęstości jazdy składów ilości pasażerów. Korzystnym skutkiem zwiększenia obszaru zasilania jest zmniejszenie szczytów poboru prądu z poszczególnych podstacji a także samej ilości energii pobranej z elektroenergetycznej sieci zasilającej [14]. Rozwiązanie konstrukcyjne trakcyjnego układu zasilania na centralnym odcinku metra umożliwiła przełączenie układu zasilania. Na rys. 4 pokazano dla porównania rozkład napięcia szyny tunel na centralnym odcinku II linii metra przy podziale na dwa obszary zasilania. Podział ten jest dokonany na postacji trakcyjnej C13. Przedział czasu obejmuje fragment godzin porannego szczytu i dotyczy 23. listopada 2015 r czyli tego samego dnia co na rys. 2 i 3. W efekcie podziału obszarów zasilania zarówno wartości ekstremalne jak i średnie ulegają zmniejszeniu.

Na rys. 5 widoczny jest rozkład



4. Przykładowy wykres rozkładu napięcia szyny tunel wzdłuż centralnego odcinka II linii metra zarejestrowany w dniu 23.11.2015 r pomiędzy 5:30 a 7:00. Wykres utworzony z wartości uśrednionych; kolor czerwony to wartości ekstremalne występujące w analizowanym przedziale czasu; kolor zielony to wartości średnie dodatnie i ujemne za ten sam przedział czasu.



5. Przykładowy wykres rozkładu napięcia szyny tunel wzdłuż centralnego odcinka II linii metra zarejestrowany podczas zwarcia sieci powrotnej z konstrukcją na C11 w dniu 09.11.2015 r pomiędzy godziną 6:30 a 8:00. Wykres utworzony z wartości uśrednionych; kolor czerwony to wartości ekstremalne występujące w analizowanym przedziale czasu; kolor zielony to wartości średnie dodatnie i ujemne za ten sam przedział czasu.

napięcia szyny tunel na centralnym odcinku II linii metra przy jednym obszarze zasilania takim samym jak w przypadku rys. 2 i 3. Pokazane wyniki dotyczą stanu zwarcia sieci powrotnej z konstrukcją jaki miał miejsce na podstacji trakcyjnej C11. W celu porównania z rysunkami 2 - 4 przyjęto na wykresie taką samą skalę napięcia oraz przedział czasu szczytu porannego 6:30 – 8:00.

Przyjęcie przedziału czasu obejmującego szczyt poranny w takim samym dniu tygodnia pozwala na założenie, że ruch pociągów był realizowany zgodnie z rozkładem jazdy i zbliżone było wypełnienie pociągów. Zatem warunki od strony obciążenie sieci trakcyjnej są podobne i upoważniają do porównań między innymi napięć ST. Z porównania zarówno wartości maksymalnych jak i średnich jest wyraźnie widoczne zwiększenie napięć na końcowym fragmencie praskiego

odcinka II linii metra przy zwarcia na C11. W okolicach miejsca zwarcia wartości ST dążą do zera. Podobne zjawiska są obserwowane na I linii metra [15, 16].

Jeżeli rozbudowie centralnego odcinka II linii metra będą towarzyszyły zwarcia szyny konstrukcja na budowanych odcinkach przy metalicznie połączonych szynach części eksploatowanej i budowanej to należy oczekiwać w czasie występowania zwarcia nastąpi wzrost napięć ST na odcinku eksploatowanym po przeciwnej stronie miejsca zwarcia. Obecnie maksymalne wartości napięcia ST nie przekraczają wartości 60 V i są z punktu widzenia normy [2] bezpiecznymi wartościami napięcia rażenia. W świetle doświadczeń z budowy i eksploatacji I linii metra [15] należy oczekiwać nawet dwukrotnego wzrostu napięć ST przy zwarcia na rozbudowywanej II linii w drugim etapie.

Po uruchomieniu części wybudowanych w drugim etapie napięcia ST o maksymalnych wartościach dwukrotnie większych niż obecnie są wielce prawdopodobne zwłaszcza, że utrzymana zostanie gęstość ruchu składów metra na dłuższym odcinku. Zatem pokazane w tabeli 1 wartości napięć pomiędzy konstrukcją II linii a szynami I (V11STI i C11STI) nie będą różnić się tak znacząco jak obecnie. Przypadkowe zwarcie na eksploatowanym rozszerzonym centralnym odcinku II linii na jednym z końców wywoła napięcia ST o wartościach określanych w [2] jako niebezpieczne. Aby zapewnić bezpieczeństwo - zwłaszcza pasażerów wsiadających lub wysiadających z pociągów - na drugiej linii zastosowano układy z elementem [17] ograniczającym napięcie rażenia instalując te układy na podstacjach trakcyjnych, a w przypadku stacji parzystych (C10 i C12) w rozdzielniach nn na poziomie peronów pasażerskich. Zainstalowanie tego układu na podstacji metra przypomina rozwiązanie Elektronicznego Zabezpieczenia Ziemnozwarciowego na podstacjach kolejowych i tramwajowych. Charakterystyki napięciowe warystorowych elementów [17] deklarowane w dokumentacji producenta odpowiadają wymaganiom napięciowym normy [2] z jedną małą uwagą nie zachowują opóźnień czasowych podanych dla poszczególnych wartości napięć rażenia podanych w [2]. Zastosowanie takiego rozwiązania w przypadku niskich napięć ST spełnia wszystkie wymagania bezpieczeństwa. Przewidywany wzrost napięć ST, a zwłaszcza czasy trwania wartości maksymalnych wynikające z prądów trakcyjnych przemieszczających się pociągów metra sugeruje, że zastosowane zabezpieczenie działając zbyt szybko będzie przyczyniało się do występowania krótkotrwałych zwarc, a tym samym do roztwarzania (koro-dowania elektrochemicznego) podziemnej konstrukcji metra. Nie można wykluczyć bardzo niekorzystnego zjawiska wzajemnego pobudzania się zabezpieczeń znajdujących się na przeciwnych krańcach eksploatowanego

odcinka metra. Organizacja informacji o stanie pracy każdego urządzenia na II linii uniemożliwi rozpoznanie powyższego zjawiska. Dynamika odpowiedzi układu zabezpieczającego w trakcyjnych podstacjach napowietrznych np. EZZ i natychmiastowe działanie powoduje również „uboczne” korozyjne skutki na uziomach podstacji. W przypadkach tych rozwiązań naprawa związana z odbudową uziomu jest znacznie prostsza niż odbudowa podziemnej konstrukcji metra. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Sokołowski M.: Metro Warszawskie – innowacyjność, bezpieczeństwo, strategie utrzymania infrastruktury IX Konferencja Naukowo-Techniczna Projektowanie, Budowa i utrzymanie Infrastruktury w Transporcie Szynowym INFRASZYN 2016 s. 61–79
- [2] PN-EN 50122-1 - Zastosowanie kolejowe. Urządzenia stacyjne. Część 1: Środki ochrony dotyczące bezpieczeństwa elektrycznego i uziemień,
- [3] PN-EN 50122-2 - Zastosowanie kolejowe. Urządzenia stacyjne. Część 2: Środki ochrony przed oddziaływaniem prądów błędnych wywołanych przez trakcję elektryczną prądu stałego
- [4] Dąbrowski J.: Kompromisy pomiędzy wymaganiami bezpieczeństwa elektrycznego a wymaganiami ograniczania upływu prądów błędnych z trakcji elektrycznej na przykładzie warszawskiego metra SPES'98 I Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Bezpieczne Urządzenia Energoelektroniczne 24-27.11.1998 Warszawa-Międzylesie s. 237-242
- [5] IMR 4 Instrukcja obsługi 2010 KO-LEN
- [6] IMU 110 Instrukcja obsługi 2007 Sonel
- [7] Dziuba Wł., Dąbrowski J.: Rezystancje w obwodach prądów powrotnych warszawskiego metra VII

- Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK'96, Zakopane październik 1996 s. 213-220
- [8] Dąbrowski J.: Drobne, lecz istotne problemy wynikające z izolowania podziemnej konstrukcji metra Wiadomości Elektrotechniczne 2011, 7, 33-41.
- [9] Dąbrowski J., Dziuba Wł.: Wpływ kabli RPZ „Pałac” na prądy błędzące warszawskiego metra X Jubileuszowa Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK'2002, Zakopane październik 2002 s. 427-436
- [10] Matus H.: Oddziaływanie prądów tellurycznych na rurociągi chronione katodowo XII Krajowa Konferencja Pomiarów Korozyjne w Ochronie Elektrochemicznej Jura-ta 19-21.09.2012 s. 131-142
- [11] Dziuba W., Dąbrowski J.: Orientacyjna ocena stanu tramwajowej sieci powrotnej jako źródła prądów błędzących OpK 1999r nr 8 s. 202 – 205 (Ochrona przed Korozją)
- [12] PN-92/E-05024 Ochrona przed korozją. Ograniczenie upływu prądów z trakcyjnych sieci powrotnych prądu stałego
- [13] PN-EN 50162 Ochrona przed korozją powodowaną przez prądy błędzące układów prądu stałego
- [14] Ber P., Dąbrowski J., Magdalińska A.: Skutki wprowadzenia efektywniejszego układu zasilania z punktu widzenia rekuperacji energii na sieć powrotna metra warszawskiego XII Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i IV Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie SEMTRAK'2006, Zakopane październik 2006 s. 9-16
- [15] Dąbrowski J.: Rozkład napięcia szyny – tunel w metrze warszawskim MET 2007 Warszawa 27-29.09.2007r
- [16] Dąbrowski J., Dziuba Wł.: Wykrywanie przypadkowych zwarc pomiędzy szynami a tunelem w metrze warszawskim MET 2001 Gdańsk 31.05 – 2.06.2001r
- [17] Low-Voltage Limiter HVL 120-0.3 Dokument ID 1HC0075863 E01 AB