

Józef Dąbrowski

Problemy wynikające z izolowania konstrukcji podziemnej metra

W Warszawie trwają już prace ziemne na drugiej linii metra, ale jak dotychczas autorowi nie udało się jednoznacznie ustalić w jakim wariantcie technicznym będzie realizowana budowa tej linii. Na pierwszej linii, jeszcze przed wkopaniem symbolicznej pierwszej łopaty, podjęto decyzję o przyjęciu wariantu ochrony przeciwporażeniowej w formie dwóch ziem odniesienia i może nie w pełni świadomie z wynikających z tego faktu konsekwencji dla ochrony antykorozyjnej.

Wystąpienie warstwy izolującej elektrycznie konstrukcję korpusu stacji, jak i tuneli od elektrolitu glebowego, jaki występuje w ziemi na głębokości ułożenia danej linii metra powoduje, że mamy do czynienia z trzema ziemiami odniesienia – potencjałami względem napięcia elektrycznego występującego np. w stosunku do sieci powrotnej metra:

- ziemią zewnętrzną (ZZ)
- ziemią tunelu metra (ZT)
- ziemią szyn metra znajdujących się wewnątrz konstrukcji (ZS).

ZZ – to ziemia na zewnątrz konstrukcji tuneli oraz stacji i znajdujące się w niej uziomy sieci zasilających prądu przemianego średniego napięcia oraz metalicznie połączone z tymi uziomami urządzenia metalowe, a także rurociągi i inne podziemne konstrukcje metalowe nie posiadające połączeń z tunelami i stacjami metra – ich zbrojeniem.

ZT – połączone ze sobą metalicznie pręty zbrojenia żelbetowego tunelu oraz stacji wraz z przyłączonymi do nich innymi elementami metalowymi, a w przypadku innej konstrukcji tunelu – przewodzące połączenie odcinków tunelu.

ZS – połączone ze sobą metaliczne szyny torów metra i przyłączone do nich przewody powrotne, łącznie szynowe oraz międzytorowe i inne elementy metalowe lub obudowy urządzeń elektrycznych w pobliżu szyn, nie mające żadnego metalicznego styku z ziemią tunelu.

Izolacja podziemnej konstrukcji, a jaka i przed czym?

W pracach [1, 2] wykazano, że wprowadzenie izolacji elektrycznej między konstrukcją podziemną zarówno żelbetową, jak i żeliwną tuneli i stacji metra spowoduje ograniczenie przepływów prądów w tej konstrukcji w efekcie wymiany tych prądów między zewnętrzną ziemią i jej metalowymi elementami. W warunkach miejskich, gdzie metro znajduje zastosowanie, w ziemi dominują prądy pochodzenia trakcyjnego od zelektryfikowanego, szczególnie prądem stałym, transportu szynowego (tramwaje), jak np. w Warszawie. Oprócz tego występują także prądy makroogniw elektrochemicznych wynikających ze zróżnicowanych warstw gleby i ich zawilgocenia oraz prądy teluryczne pochodzące od zmian pola elektromagnetycznego spowodowanymi plamami na słońcu. Coraz większe korozyjne zagrożenie mogą powodować prądy wyrównawcze uziomów transformatorów sn/nn powstające w wyniku

oddziaływania wyższych harmonicznych prądu generowanych przez urządzenia energoelektroniczne zasilane z trójfazowych sieci przemysłowych. Konstrukcja tuneli wraz ze stacjami metra przypomina rurociągi do przesyłu mediów ciekłych i gazowych. Z tą różnicą, że średnice rurociągów są z reguły znacznie mniejsze w porównaniu ze średnicami tuneli, czy wymiarami stacji. Właśnie owa średnica przekroju poprzecznego i różnice w możliwościach do zastosowania technologii układania rurociągu w ziemi oraz budowy tunelu mogą utrudniać dobre izolowanie konstrukcji metra od otaczającego gruntu. W przypadku rurociągów znajdujących się w ziemi, niezależnie od ich średnicy zewnętrznej, montaż ich wykonywało się i nadal wykonuje z reguły metodą odkrywkową i tylko na krótkich odcinkach (np. przejścia pod drogami) metodą przeciskową, ale z dodatkową rurą osłonową. Przy obecnie stosowanych materiałach izolacyjnych (epoksydowych i polietylenowych) nakładanych na rury już podczas ich produkcji uzyskuje się jednostkowe powierzchniowe rezystancje przejścia na poziomie rzędu 10^7 , a nawet $10^8 \Omega/m^2$ [3]. Dostarczane na plac budowy odcinki izolowanych rur spawa się w wykopie lub tuż nad nim i na miejsca spoin nakłada się izolację oraz sprawdza czy została ona poprawnie wykonana. Wcześniej stosowane materiały izolacyjne na rurociągach wytwarzane były na bazie smoły pochodzenia węglowego lub bitumitów pochodzących z ropy naftowej oraz juty i dawały o dwa, a nawet trzy rzędy mniejsze wartości jednostkowej powierzchniowej rezystancji przejścia. A tak na marginesie, to dobra izolacja podziemnej konstrukcji metalowej w postaci gazociągu przyczyniła się do wykazania korozyjnego oddziaływania prądu przemiennego, które wyraźnie uwidacznia się przy wzajemnie równoległym ułożeniu rurociągu i linii elektroenergetycznej lub kolejowej zasilanej prądem przemiennym. Taka konfiguracja sprzyja indukowaniu się w tym rurociągu sił elektromotorycznych, które poprzez uszkodzenia powłoki i otaczającą rurociąg ziemię wywołują przepływ prądu przemiennego. Jak się okazało to gęstość tego prądu ma decydujące znaczenie na wystąpienie zjawiska korozji metalu. W warunkach miejskich zjawisko korozji od prądu przemiennego wydaje się mieć dużo mniejsze znaczenie, ale nie należy go bagatelizować. W Polsce stwierdzono korozyjne oddziaływania prądu przemiennego na rurociągi słabo izolowane w powłoce bitumicznej [4]. Opisanemu zjawisku sprzyjały niekorzystne warunki glebowe.

Budowa tuneli metra, w przeciwieństwie do rurociągów, odbywa się metodą drążenia w ziemi. Założenie opaski (warstwy) izolacyjnej podobnej do tych na rurociągach w takiej technologii wydaje się mało prawdopodobne, ale jeżeli każdy z segmentów tubingu tworzących tunel będzie miał zewnętrzną warstwę z materiału izolującego oraz poszczególne te segmenty będą spajane materiałem nie przewodzącym prądu elektrycznego, to w efekcie można uzyskać tunele izolowane od ziemi zewnętrznej. Na fot. 1 pokazano składowane gotowe już żelbetowe segmenty tubingu do budowy tunelu [5]. Należy zwrócić uwagę, że zewnętrzna warstwa każdego segmentu – ta która będzie się stykać z ziemią – jest

innej barwy. W procesie produkcji segmentów tę przestrzeń można wypełnić lub pokryć materiałem zapewniającym separację wilgoci, a przy okazji także izolację elektryczną. Warstwa ta, wraz z elementami uszczelniającymi pokazanymi na fot. 2 [5], zapewni uszczelnienie przeciwwodne, a także izolację elektryczną wnętrza tunelu od ziemi zewnętrznej. Czy izolacja tak utworzonego tunelu może osiągnąć wartości jednostkowej powierzchniowej rezystancji przejścia rzędu $10^8 \Omega/m^2$? Wydaje się, że nie, wartości te będą niższe, nawet jeżeli na każdym z segmentów tubingu położona zostanie powłoka z odpowiednio grubej i dobrej izolacji, to w procesie budowy oraz dociskania segmentu do wydrążonego fragmentu mogą nastąpić uszkodzenia izolacji (powłoki). Zjawiska takie są znane z technologii układania (zasypywania odkrywki) rurociągów. Najprawdopodobniej ze względu na średnicę i ilość (długość) styku między poszczególnymi segmentami wypadkowa jednostkowa powierzchniowa rezystancja izolacji tuneli nie będzie przekraczała rzędu $10^4 \Omega/m^2$.

Na konstrukcje stacji, które na ursynowskiej części pierwszej linii metra w Warszawie były realizowane metodami odkrywki, nakładano powłoki przeciwwodne w postaci warstw papy uszczelnianych smolą. Podobnie jak ma to miejsce w tunelach powłoki te mogą jednocześnie przyczyniać się do izolacji elektrycznej między konstrukcją a glebą. Ze względu na wodę, która jest w glebie, mechanizm przewodzenia prądu na styku konstrukcji z glebą (ziemią) jest elektrolityczny (jonowy). Powłoki z papy zastosowane na początkowych stacjach pierwszej linii metra, nakładane warstwami na ścianach i dachach korpusów stacji i smółkowanej na krawędziach styku w warunkach wilgotności otaczającej gleby nie zapewniają dobrej izolacji elektrycznej – co wykazano pomiarami i przedstawiono w pracach [1, 2, 6]. Wilgotność gruntu sprzyja zmniejszaniu jej rezystywności i najczęściej jest przyczyną zwiększania konduktancji przejścia warstwy niezbyt dokładnie spajanych izolacji. Grunty skaliste charakteryzujące się dużą rezystywnością zapewne zmniejszą konduktancję przejścia konstrukcja–ziemia, ale niestety w warunkach warszawskich grunty takie nie występują.

W przypadku stacji i tuneli stosowana jest też technologia ścian szczelinowych. Umożliwia ona budowę głębokich wykopów w warunkach gęstej zabudowy miejskiej. Wykorzystano ją przy budowie dalszych stacji 1. linii metra. Na korpus stacji nakładano na betonie powłoki przeciwwodne z xypeksu. Pomiary konduktancji przejścia przeprowadzone na stacji A15 (Ratusz) wykazały średnią wartość rezystancji przejścia zbliżoną do wartości z poprzednich stacji [1, 2, 6], a analiza wyników poszczególnych prób (serii pomiarów) sugeruje, że to płyta dennej tej stacji nie została elektrycznie odizolowana od ziemi, ponieważ większe wartości rezystancji od średniej występowały w górnych warstwach konstrukcji, czyli pod sufitem [7].

W przypadku tej samej technologii ścian szczelinowych, umożliwiających budowę głębokich wykopów w warunkach gęstej zabudowy miejskiej na drugiej linii metra w Warszawie, przewiduje się wprowadzenie w korpusie stacji materiału izolującego w postaci folii wprowadzonej między zewnętrzną i wewnętrzną warstwę betonu w żelbetowej ścianie. Podobna warstwa izolacji musi znaleźć się w płycie dennej oraz na suficie. Aby uzyskać poprawną izolację elektryczną od zewnętrznej ziemi, dodatkowo należy zadbać o szczelność styku folii na wszystkich krawędziach ścian z podłogą oraz sufitem na całej długości konstrukcji. Spełnienie tych warunków w praktyce jest bardzo kłopotliwe. Różne

kubatury i geometrie brył każdej z budowanych stacji zarówno w Warszawie, jak i na świecie, dają rozmaite powierzchnie styku konstrukcji z otaczającą glebą. Powłoki izolacyjne na tych konstrukcjach mogą być różnego rodzaju. Dlatego też trudno w dostępnej literaturze znaleźć odpowiedź na pytanie jaka wypadkowa wartość jednostkowej konduktancji przejścia konstrukcja–ziemia (odwrotność rezystancji) jest graniczna, poniżej (powyżej) której należy/można uważać konstrukcję metra za dobrze izolowaną.

Ocena powłoki izolacyjnej

W celu dokonania oceny jakości izolowania konstrukcji można postąpić się porównaniem jednostkowej konduktancji przejścia konstrukcja–ziemia niezależną od powierzchni styku z ziemią. Kryterium to zastosowano w normie [8] do oceny torowisk transportu szynowego zelektryfikowanego prądem stałym. Aby można zatem dokonywać porównań i oceny, należy jednostkową powierzchniową rezystancję izolację (przejścia) (Ω/m^2) spotykaną w literaturze, przeliczyć na jednostkę długości konstrukcji, uwzględniając jej średnicę lub obwód przekroju poprzecznego prostokątnego do długości konstrukcji stacji lub tunelu. Wtedy, np. przy zewnętrznej średnicy 6 m, mamy boczną powierzchnię styku z ziemią równą $18,84 m^2$ na 1 metrze długości tunelu, co przy przewidywanym wcześniej poziomie jednostkowej powierzchniowej rezystancji przejścia $10^4 \Omega/m^2$ da jednostkową konduktancję przejścia na poziomie $1,88 mS/m$, odpowiednio $1,88 S/km$. Porównując tę wartość z zaleceniami [8] (np. dopuszczalne $2,5 S/km$ dla torowiska budowy zamkniętej o pojedynczym torze składającym się z dwóch szyn) widocznym staje się, że uzyskanie na całej długości tunelu tak wysokiej średniej wartości rezystancji przejścia na jednostkę powierzchni umożliwiłoby zminimalizowanie wymiany prądów między ziemią i konstrukcją tunelu przy występującym zwarciu ZT z ZS do poziomu zalecanego w przypadku torowiska pracującego w warunkach normalnych. Jednocześnie należy zauważyć, że zgodnie z zaleceniami berlińskiego metra [7], dopiero przy uzyskaniu jednostkowej konduktancji przejścia konstrukcja–ziemia poniżej $0,1 S/km$ dokonuje się wprowadzenia „trzeciej ziemi” ZZ i wynikających z tego konsekwencji. Podana wartość oznacza, że jednostkowa powierzchniowa rezystancja izolacji między konstrukcją a ziemią jest rzędu $10^5 \Omega/m^2$, ponieważ średnice zewnętrzne tubingów w Niemczech są ok. 5,5 m, czyli zbliżone do wartości przyjętej w podanym wcześniej przykładzie.

Konstrukcja stacji w dużym uproszczeniu przypomina prostokątności o długości z reguły większej niż peron pasażerski mieszczący jeden skład (długość składu pociągu metra ok. 120 m). Są jednak stacje o długości ponad trzykrotnie większej od pociągów metra, a to z powodu komór z torami odstawkowymi. Szerokość stacji będzie istotniejszym parametrem dla jednostkowej konduktancji przejścia konstrukcja–ziemia. Wymiar ten obejmuje szerokość dwóch pociągów (skrajnię) plus szerokość peronów zewnętrznych lub wewnętrznych (wyspowego) i może wahać się w granicach od 25 do 40 m. Podobnie jest z wysokością stacji, która może być jedno- lub kilkukondygnacyjna. Przyjmując, że kondygnacja obejmuje wysokość do 4 m, to powierzchnia boczna styku z glebą (gruntem) jednego metra długości stacji może wynosić od $58 m^2$ dla jednokondygnacyjnej wąskiej stacji do $104 m^2$ dla trójkondygnacyjnej wyspowej szerokiej stacji. Jeżeli na powierzchniach zewnętrznych tych stacji udałoby się nałożyć izolację o jednostkowej powierzchniowej rezystancji prze-

ścia równej $10^4 \Omega/m^2$, tj. wartości założonej dla tuneli, co ze względu na długości i nakładanie na siebie płytów folii wydaje się trudnym do realizacji wynikiem, to dałoby jednostkowe konduktancje przejścia na poziomie od 5,8 mS/m do 10,4 mS/m (odpowiada to 5,8 S/km; 10,4 S/km). Wartości te są niestety w najlepszym przypadku ponad dwukrotnie większe od zalecanych w normie [8] dla torowisk budowy zamkniętej. Z tego też powodu styk konstrukcji stacji z ziemią staje się miejscem ewentualnej łatwiejszej wymiany ładunku elektrycznego między tymi warstwami. Zwiększenie przekroju poprzecznego korpusu stacji, jakie występuje w porównaniu z tunelem powoduje, że powierzchnia styku obudowy również ulega zwiększeniu, co oznacza zwiększanie jednostkowej konduktancji przejścia konstrukcja stacji–ziemia nawet przy takiej samej jednostkowej powierzchniowej rezystancji izolacji na tunelu, jak i stacji. Aby uzyskać zbliżone wartości jednostkowej konduktancji przejścia konstrukcja ziemia dla stacji oraz tuneli, należy na powierzchni konstrukcji stacji nakładać bardzo dokładnie izolacje o większych wartościach jednostkowej powierzchniowej rezystancji niż na segmenty tunelu. Należy przy tym dodatkowo zwrócić uwagę na fakt, że stacje wykonywane są w innych technologiach niż tunele oraz to iż płytę denną stacji jest trudno wyizolować od podłoża. Spostrzeżenia te sugerują, że przy zastosowaniu izolowania konstrukcji metra od ziemi można uzyskać sytuację przypominającą system rozłożonych uziomów w postaci korpusów stacji połączonych izolowanymi kablami, czyli tunelami.

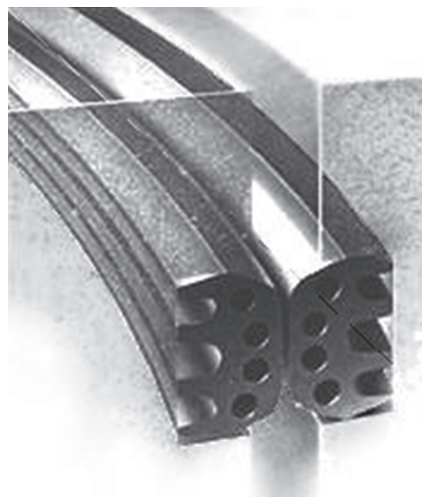
Ekwipotencjalizacja wnętrza tuneli i stacji metra, czyli ZT

Konieczność wprowadzenia do wnętrza stacji i tuneli metra energii elektrycznej jest oczywista. Energia ta jest niezbędna do funkcjonowania zainstalowanych tam systemów, np. oświetlenia, wentylacji, łączności oraz sygnalizacji dla pasażerów, a także i obsługi, a jej większość zużywana jest na cele trakcyjne. Użytkowanie energii elektrycznej musi spełniać wymogi bezpieczeństwa i dlatego zrozumiałym jest, że zbrojenie płyty dennej traktuje się jako uziom wewnętrzny dla instalacji elektrycznych na stacji, czyli ZT. Połączenie metaliczne zbrojenia fundamentu ze zbrojeniem ścian i płyty stropowej zapewnia zmniejszenie rezystancji poprzecznej i wzdłużnej konstrukcji, a co za tym idzie minimalizację „stożków napięcia” wewnątrz konstrukcji stacji w przypadkach występowania zwarć doziemnych (do ziemi metra – ZT) w sieci elektroenergetycznej oraz trakcyjnej metra. Ze względów na niebezpieczeństwo porażeniowe ludzi znajdujących się wewnątrz stacji i tuneli, metaliczne połączenie zbrojenia elementów korpusu stacji jest konieczne. Poprowadzenie specjalnej magistrali uziemiającej wzdłuż konstrukcji sprzyja temu bezpieczeństwu i pozwala w sposób jednoznaczny na ułożenie systemu sieci zasilania niskonapięciowego w układzie TN-S [9].

Moc niezbędna do zasilania wszystkich systemów pracujących wewnątrz metra powoduje, że wprowadzenie zasilania do wnętrza konstrukcji podziemnej realizowane jest za pomocą elektroenergetycznych sieci rozdzielczych 15 kV. W przypadku pierwszej linii metra w Warszawie rozwiązanie zasilania przedstawiono w [9, 10]. Podstacje zasilające pociągi metra i potrzeby własne są rozmieszczone na co drugiej stacji pasażerskiej. Aby zapewnić niezawodność zasilania z systemu elektroenergetycznego, podstacje metra są podłączone kablami dwustronnie do różnych rejonowych punktów zasilających (RPZ) lub różnych sekcji roz-



Fot. 1. Składowanie żelbetowych segmentów obudowy tunelu



Fot. 2. Pierścienie uszczelniające między segmentami

dzielniczy średniego napięcia (RSN) w danym RPZ. Na podstacji metra ekrany tych kabli zasilających są podłączone poprzez obudowę RSN do ZT.

We wspomnianej już normie [8] stawiane jest jeszcze jedno wymaganie, aby przeliczeniowy spadek napięcia wzdłuż konstrukcji między kablami powrotnymi podstacji podczas maksymalnego obciążenia nie przekraczał 100 mV. W pracy [11] podano zależności między elektrycznymi parametrami konstrukcji metra i obciążeniem sieci trakcyjnej w metrze a spadkiem napięcia na wyizolowanej od ziemi konstrukcji podziemnej metra. W pewnym uproszczeniu sprowadza się to do uzyskania rezystancji wzdłużnej konstrukcji stacji lub tuneli porównywalnej z rezystancją wzdłużną ułożonego wewnątrz torowiska. W przypadku konstrukcji żelbetowych część prętów zbrojenia należy zamiast splotem węzłkowym (drułem) łączyć metalicznie przez spawanie. Porównywalna rezystancja torowiska w tunelu (stacji) z rezystancją wzdłużną tych konstrukcji oznacza, że w przypadku zwarcia między torowiskiem a konstrukcją (co na pierwszej linii metra faktycznie zdarza się i to najczęściej na zwoznicach) część prądu trakcyjnego w konstrukcji w pobliżu miejsca zwarcia będzie co najwyżej równa prądowi płynącemu w torowisku. Przy izolowaniu konstrukcji metra od ziemi spadki napięcia od prądu zwarcia będą porównywalne ze spadkami napięć w szynach metra i ewentualna wartość upływu prądu trakcyjnego metra z konstrukcji do ziemi zewnętrznej będzie na „poziomie” prądu upływu wyizolo-

wanego torowiska trakcji prądu stałego. Warunkiem tego jest jednostkowa konduktancja przejścia konstrukcja – ziemia o wartości zbliżonej do podanego wyżej przykładu. Przy braku izolacji między konstrukcją metra a ziemią prąd zwarcia może przedostawać się bezpośrednio do ziemi i trudno jednoznacznie określić jaka jego część będzie płynąć konstrukcją, a jaka otaczającą ziemią. Niewątpliwie zależy to od rezystywności gruntu w otoczeniu konstrukcji.

No to izolować, czy nie? A może jak izolować?

Minimalne jednostkowe rezystancje wzdłużne stacji oraz tuneli sprzyjające bezpieczeństwu porażeniowemu są jednak zagrożeniem dla tej konstrukcji z punktu widzenia oddziaływania prądów błądzących, zwłaszcza pochodzących z obcych zewnętrznych źródeł [12]. Przy braku powłok izolacyjnych na konstrukcji taka mała rezystancja wzdłużna konstrukcji metra sprzyja przepływowi prądów w glebie przez konstrukcję. Zgodnie z prawem Kirchhoffa strefom wpływania tych prądów do konstrukcji muszą towarzyszyć obszary jego wypływania z niej, i ta ostatnia faza prowadzi do zjawisk korozyjnych na powierzchni styku metalu z elektrolitem glebowym. Będzie to powodowało ubytki metalu w tym obszarze. W przypadku izolowania konstrukcji od ziemi zjawisko ubytków korozyjnych nie powinno wystąpić, ale należy stwierdzić, że gabaryty konstrukcji zarówno tuneli, jak i stacji sprzyjają lokalnym niejednorodnościom pokrycia izolacją zewnętrznych powierzchni, a to umożliwia ewentualny przepływ prądów płynących w ziemi przez zbrojenie metra. Aby do takiej wymiany prądów błądzących mogło dojść, muszą być spełniane dwa warunki, nad którymi w zasadzie w sposób techniczny (inżynierski) nie panuje się do końca. Pierwszym warunkiem są faktyczne miejsca występowania uszkodzeń (nieciągłości) izolacji konstrukcji metra i ich powierzchnia styku z ziemią. Drugim jest rozptył prądów wypływających z sieci powrotnych zelektryfikowanego prądem stałym transportu szynowego w danym mieście i to nie tylko w okolicach podziemnej konstrukcji. Aby w sposób techniczny zminimalizować wpływ wymiany prądów błądzących z obcych zewnętrznych źródeł, niezbędnym jest wprowadzenie dylatacji z elektryczną izolacją między tunelami i stacjami, ewentualnie dodatkowo między wentylatorniami szlakowymi i tunelami. W czasie uruchamiania odcinka metra można wtedy dokonać oceny oddziaływania prądów błądzących na konstrukcję i wybrać taką konfigurację zwartych i rozwartych dylatacji z izolacjami, która umożliwi zminimalizowanie wartości prądów płynących w konstrukcjach tuneli i stacji. Wielkość tych prądów przekłada się na ładunek elektryczny i na masę skorodowanego metalu zgodnie z prawem Faraday'a.

Wydaje się bardziej prawdopodobne, że w naturalnych warunkach terenowych (glebowych) i braku nakładania dodatkowej izolacji na konstrukcję podziemną, rozkład jednostkowej rezystancji przejścia między tą konstrukcją, a ziemią będzie na każdym fragmencie zbliżony, a zatem i równomierny. Oczekiwane ewentualne gradienty zmian rezystancji będą znacznie mniejsze niż w przypadku nakładanych powłok izolacyjnych i lokalnych uszkodzeń lub nieciągłości izolacji. Wszystkie rozważania w dostępnej literaturze dotyczące oceny zagrożenia korozyjnego, jak i rozkładu napięć wzdłuż torowiska zakładają jednorodność środowiska. W literaturze podawane są dopuszczalne gęstości prądu (ochrony) przepływającego między konstrukcją i ziemią przy założeniach jednorodności oraz ograniczonej obszaru oddziaływania prądów błądzących, np. do 200 m od źródła. Owa jedno-

rodność na styku konstrukcja–ziemia jest znacznie trudniejsza do uzyskania przy izolowaniu zewnętrznych powierzchni podziemnych konstrukcji.

Jeżeli przez nieizolowaną powierzchnię (np. 1 m^2) styku metalu z glebą będzie wypływał określony prąd (np. 1 A), to przy równomiernym rozptywie (stałej gęstości prądu 1 A/m^2) należy oczekiwać jednakowej głębokości ubytku metalu po każdym rozpatrywanym okresie oddziaływania (np. 1 roku). Dla przykładowych wartości otrzymany ubytek stali wyniesie 8,9 kg i korozyjny wżer będzie głębokości 1,1 mm. W normie [13] na podanym przykładzie zdefiniowano pojęcie szybkości korozji – głębokość wżeru w czasie. Dla stalowych rurociągów [14, 3] pojawia się również określenie akceptowalnego poziomu szybkości korozji, który wynosi $\leq 0,5 \mu\text{m/rok}$ dla odpowiedzialnych rurociągów wysokociśnieniowych. Jeżeli przepływ takiego samego prądu (1 A) będzie odbywał się przez uszkodzoną powłokę izolacyjną o powierzchni np. 10^4 mniejszej niż poprzednio, to po pierwsze gęstość prądu wymiany będzie większa proporcjonalnie do stosunku powierzchni, po drugie – pomijając ewentualne efekty brzegowe na krawędziach uszkodzonej izolacji – prąd ten wywoła w każdym rozpatrywanym okresie oddziaływania ubytek masy taki sam, jak poprzednio, z tym, że na znacznie mniejszej powierzchni, stąd głębokość wżeru korozyjnego oczekiwanego po czasie przepływu prądu będzie proporcjonalna do powierzchni przepływu. Szybkość korozji w takim przypadku może przekraczać wartość technicznie akceptowalną. Podobnie, jak w przypadku rurociągów, także w tunelach i na stacjach metra taki wżer korozyjny oznacza lokalne mechaniczne osłabienie konstrukcji na skutek zmniejszenia przekroju materiału konstrukcyjnego. Dodatkowo produkty korozji zawsze mają większą objętość niż metal i wiążąc się z nim grupy wodorotlenowe. W przypadku rurociągów powoduje to dalsze uszkodzenie izolacji, a w tunelach żelbetowych pęknięcie betonowej otuliny na prętach zbrojeniowych, co umożliwi łatwiejszą penetrację wód gruntowych w betonie.

Wniosek z tego jest następujący, jeżeli izolować konstrukcję od ziemi, to czynić to w miarę możliwości jak najdokładniej, nie unikając separacji poprzecznych w postaci izolowanych elektrycznie dylatacji. Zgodnie z normą [8] należy również wyeliminować (ostatecznie znacząco ograniczyć) metaliczne połączenia części metalowych konstrukcji metra z zewnętrznymi metalowymi konstrukcjami, które mogą wprowadzać prądy w ziemi do ZT metra.

Oddziaływanie uziomów elektroenergetycznych

Uwagi ogólne

Rozbudowane układy uziomów podstacji elektroenergetycznych napowietrznych czy wewnątrzowych mają zabezpieczyć obsługę podstacji w stanach awaryjnych, tj. zwarcie w sieci, wyładowań atmosferycznych, od nadmiernych napięć krokowych i dotykowych. Uziomy te są na „stałe” przyłączone do punktów zerowych transformatorów oraz instalacji odgromowych. Jeżeli energia rozprzeczana jest siecią kablową, to ekrany wszystkich kabli w sposób widoczny są przyłączone do obudów rozdzielnic, a te połączone do uziomów. Dzięki instalacjom (przewodom) odgromowym, jak również połączeniom ekranów kabli, uziomy podstacji są elementami wyrównującymi potencjały między podstacjami. System uziomów nie generuje prądów błądzących, ale umożliwia ich rozptył i dzięki temu uziomy podlegają ubocznym skutkom wpływu i wypływu prądu, co w końcowym efekcie zmienia ich rezystancję

zawsze na większą. Wprowadzenie do konstrukcji stacji „Centrum” A13 na pierwszej linii metra RPZ „Pałac” – chociaż takie rozwiązanie nie jest zalecane w normie [8] – pozwoliło wykazać pomiarowo zjawisko przepływu prądu przez ekrany kabli związane z wyrównywaniem potencjałów między uziomami RPZ [15, 16]. Należy zauważyć, że prądy wyrównujące występują w ekranach kabli wysokonapięciowych (110 kV), jak i średnio napięciowych (15 kV). O kierunku i wielkości przepływu tych prądów w ekranach kabli decydują warunki w jakich znajdują się poszczególne przyłączone uziomy sąsiadujących podstacji elektroenergetycznych oraz rezystancja ekranu kabla zależna od przekroju poprzecznego ekranu i długości kabla (połączenia). Przeprowadzone w latach 2001 i 2005 badania na PRZ „Pałac” potwierdziły również przyczynę dla której w normie [8] nie zaleca się wbudowywania w korpus metra RPZ. Na etapie projektowania praktycznie nie udało się oszacować, że uziom jakim dla RPZ będzie zbrojenie konstrukcji metra znajdzie się w strefie wpływu prądów z ziemi do konstrukcji. Aby uniknąć ewentualnych zagrożeń, najkorzystniej jest nie wprowadzać RPZ do konstrukcji metra, nawet gdy jest to system dwóch ziem odniesienia.

Podstacje na pierwszej linii metra

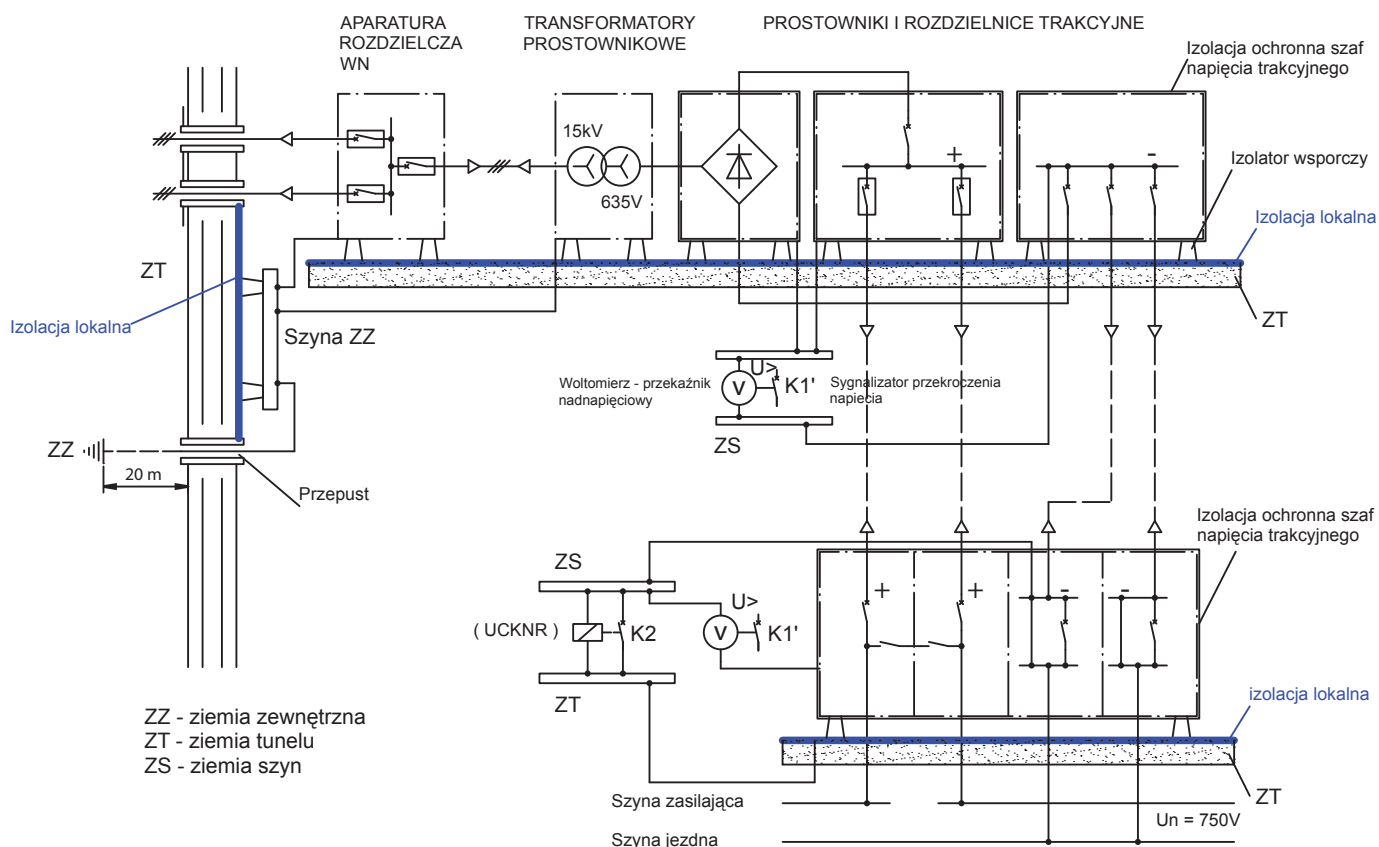
W przypadku pierwszej linii warszawskiego metra, ze względu na odrzucenie izolowania korpusu podziemnej budowli od ziemi wprowadzanie kabli sn do podstacji elektrotrakcyjnej i uziemienie ekranów kabli do ZT (ziemia tunelu) przyjmuje się z dobrodziejstwem inwentarza i zakłada równomierność rozptyłu prądów wpływających i wypływających z konstrukcji do otaczającej ziemi. Ze względu na duże powierzchnie oczekuje się, że szybkość korozji tunelu oraz stacji nie przekracza wartości technicznie ak-

ceptowalnych. Podstacja trakcyjna zbudowana na powierzchni ziemi i ta w korpusie stacji w przypadku dwóch ziem odniesienia praktycznie niczym się nie różnią, może jedynie wymaganiami niepalności instalacji wewnątrz podziemnej konstrukcji.

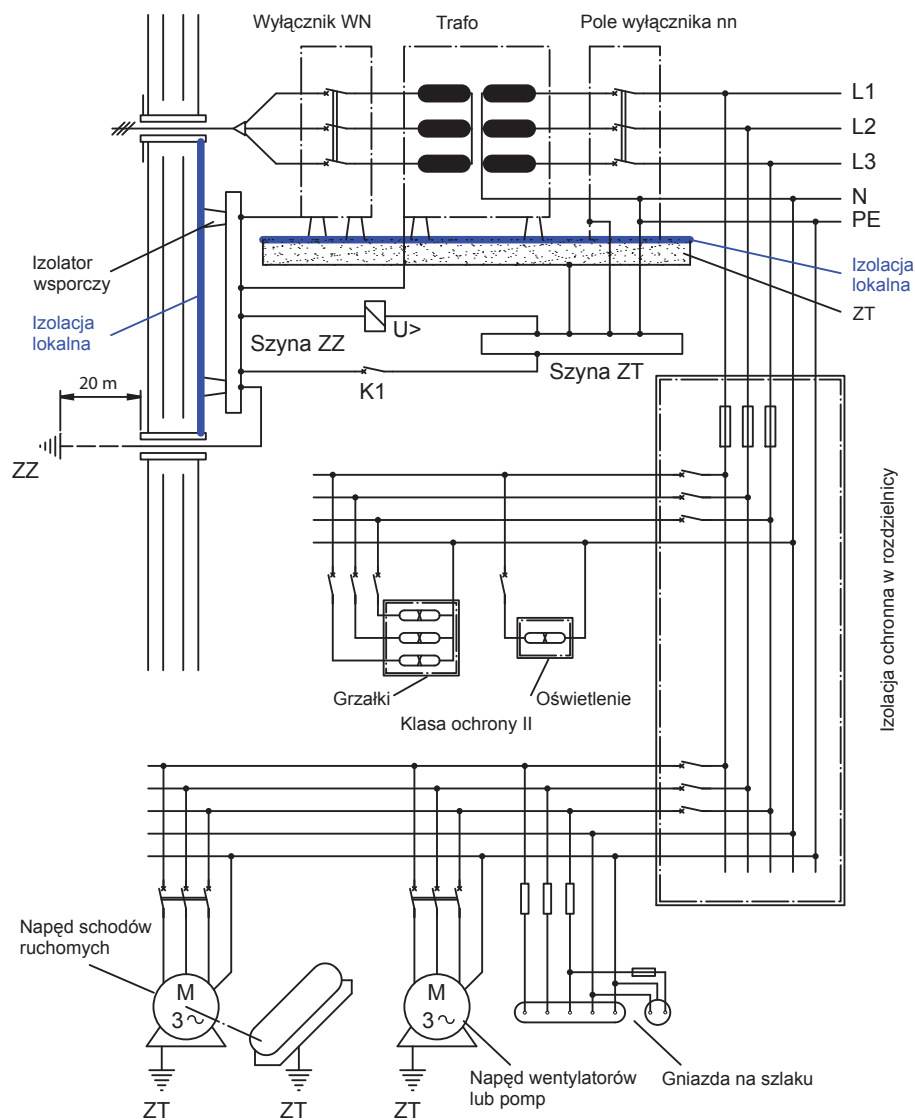
Podstacje dla izolowanych podziemnych konstrukcji metra

Na drugiej linii metra w Warszawie przewiduje się, że podstacje trakcyjne będą tak, jak na pierwszej umieszczone wewnątrz konstrukcji metra. W przypadku izolowania zewnętrznych powierzchni konstrukcji stacji oraz tuneli uzyskujemy nową jakość w postaci trzech ziem i ewentualnymi opisanymi wadami, związanymi z możliwą dokładnością wykonania izolacji.

Aby uniezależnić izolowaną konstrukcję od oddziaływania uziomów sąsiednich RPZ z których zasilane jest metro, zaproponowane zostało rozwiązanie pokazane na rysunkach 1 i 2 [7]. Z konstrukcji wyprowadzony zostaje do otaczającego gruntu uziom zewnętrzny. Na zewnątrz podziemnej konstrukcji poprzez odpowiedni przepust wyprowadzony jest kabel wysokonapięciowy (15 kV) łączący uziom zewnętrzny z szyną ziemi zewnętrznej ZZ wewnątrz stacji. Do odizolowanej od konstrukcji stacji szyny ZZ dołączone są izolowanymi przewodami obudowy aparatury WN (wyłączniki, rozdzielnice, transformatory). Aparatura ta musi być odizolowana od ziemi tunelu ZT, podobnie jak i część trakcyjna, czyli prostowniki, rozdzielnica prądu stałego, szafa kabli powrotnych. W systemie dwóch ziem część trakcyjna była/jest również odizolowana od ziemi tunelu. Zastosowanie szyny ZZ z rozłączanymi przewodami od obudów aparatury WN umożliwia między innymi dokonywanie pomiarów rezystancji zewnętrznego uziomu w czasie eksploatacji oraz izolacji posadowienia aparatury wyso-



Rys. 1. Schemat zasilania obwodów trakcyjnych w metrze wiedeńskim



Rys. 2. Schemat zasilania obwodów niskiego napięcia w metrze wiedeńskim

konopięciowej. Część WN podstacji w systemie „trzech ziem” wymaga dodatkowego zabezpieczenia na czas występowania nadmiernych napięć między ZZ i ZT oraz pobytu obsługi na terenie tej części podstacji. Wejście ludzi w wydzielony obszar części WN powinno automatycznie powodować zwieranie ZZ z ZT na czas pobytu osób na tym terenie. Po opuszczeniu przez obsługę tego obszaru powinno automatycznie nastąpić przełączenie na nadzór napięcia między ZZ i ZT. Nadmierne napięcia między tymi ziemiami powinny powodować zwarcia ZZ z ZT rozłączane po czasie kilku lub kilkunastu sekund, podobnie jak jest to realizowane na pierwszej linii metra w przypadku napięć między ZT i ZS, gdzie pracują urządzenia ciągłej kontroli napięć rażenia [17]. Takie rozwiązanie zapewnia minimalizację czasu oddziaływania (pracy) uziomów RPZ na podziemne konstrukcje metra i ogranicza tym samym szybkość korozji ewentualnych odsoniętych części podziemnej konstrukcji. W ramach systemu monitorowania prądów błądzących można nadzorować wartość składowej stałej prądu uziomu na każdej stacji, jednak będzie to pośrednia informacja o możliwych ubytkach metalu z zewnętrznego uziomu.

Dostępna literatura techniczna przedmiotu w zakresie instalacji zewnętrznego uziomu w metrze jest nad wyraz uboga. Wydaje się jednak, że ze względu na przyłączenie do tego uziomu jedynie

dwóch ekranów kabli z różnych RPZ lub nawet z jednego RPZ, ale dwóch różnych sekcji RSN można oczekiwać prądów o zbliżonych wartościach jakie pomierzono na RPZ „Patac” na kablach przyłączonych do rozdzielni 15 kV [15, 16]. Przy założeniu czasu eksploatacji takiego uziomu uzyska się oszacowanie jego masy. Podczas występowania stanów awaryjnych w postaci zwarcia w sieci zasilającej zadziałanie urządzenia nadzoru napięcia między ZZ i ZT w znaczący sposób zmniejszy rezystancję uziomu i zmieni rozptyw prądu. Rezystywność gruntu może zadecydować o długości (powierzchni) czynnej części uziomu. Przyłączenie uziomu z szyną ZZ powinno być kablem w izolacji, przechodzącym przez ścianę konstrukcji wysokonapięciowym przepustem.

W przypadku konstrukcji metra w gruntach o dużej rezystywności proponowane są również uziomy zewnętrzne na odcinkach szlakowych, ale w warszawskich warunkach gruntowych rozwiązanie takie wydaje się nie być konieczne.

Wewnętrzne zagrożenia konstrukcji

Jak wynika z tych rozważań, pomimo że podziemna część metra będzie izolowana od otoczenia, nie należy rezygnować z jej sekcjonowania dylatacjami z izolacją, podobnie jak to zrealizowano na pierwszej linii w systemie dwóch ziem, tj. bez dodatkowej izolacji zewnętrznej. Prawidłowo zbudowana izolacja na dylatacji zwiększa rezystancję wzdłużną konstrukcji dla ewentualnych prądów błądzących, ograniczając tym samym

ich wartość i tym samym korozyjne skutki. Taka dylatacja o grubości do 2 cm może rezystancyjnie odpowiadać nawet kilkudziesięciu metrom konstrukcji tunelu. Doświadczenia z budowy długich stacji obejmujących peron pasażerski, komorę rozjazdów oraz komorę z torami odstawkowymi na pierwszej linii wskazują, że dylatacje z izolacją były wykonane w sposób prawidłowy przy budowie korpusu stacji, tj. ścian, podłogi oraz sufitu. Dzięki temu dylatacje te oddzielały od siebie poszczególne odcinki konstrukcji stacji. Jednak w czasie wyposażania wnętrza stacji izolacje na dylatacjach ulegały zwarciom i tym samym traciły początkową skuteczność. Z dostrzeżonych przyczyn takiego stanu należy wymienić między innymi ustawiane barierki zabezpieczające część peronu technologicznego od torowiska, wydzielenia powierzchni magazynowych siatką na stelażach z kątowników itp. konstrukcje osadzone w żelbecie stacji. Podwieszane sufity, jak i podnoszona podłoga w pomieszczeniach z dylatacją również stanowią zagrożenie dla dobrze zbudowanych izolowanych dylatacji.

Na bielańskim odcinku w tunelach B21, B22 oraz na stacjach A21 i A22 zastosowano torowisko w technologii EBS [18]. W porównaniu z technologią układania torowiska na pozostałych podziemnych odcinkach, poza tunelem dojazdowym z STP Kabaty, uzyskano zbliżone poziomy konduktancji przejścia szyny tunel [6,

Izolacja ochronna w rozdzielni

19) spełniające wymagania normy [8] w tym zakresie. Zapropowano tę technologię w celu wy tłumienia drgań mechanicznych generowanych przez pociągi metra oraz wyciszenia emitowanych w czasie jazdy hałasów. Być może wprowadzenie w tunelach B21 i B22 dodatkowej ekwipotencjalizacji magistral uziemających, czyli połączeń wykonanych bednarką poprowadzoną od magistrali po ścianie i po dnie tunelu między magistralami uziemającymi na obu ścianach dwutorowego tunelu przy technologii zbrojonego podtorza pod mocowania typu EBS spowodowało zwarcia wszystkich dylatacji z izolacją na tym odcinku, czyli ich skuteczne wyeliminowanie. W efekcie ten fragment metra został pozbawiony możliwości wprowadzenia biernej ochrony tunelu przed prądami błędzącymi i sprawdzenia jej skuteczności [20].

Na drugiej linii metra przewiduje się ekwipotencjalizację segmentów tubingowych tunelu oraz torowisko w technologii EBS. Jest wielce prawdopodobne, że zbrojenie, na którym układane jest torowisko, zewrże połączenia ekwipotencjalizujące segmenty tunelu, a tym samym magistralę uziemającą. Wtedy możemy oczekiwać w najgorszym przypadku, że cały budowany odcinek sześciu stacji zostanie pozbawiony biernej ochrony przed prądami błędzącymi. Ewentualne wybudowanie podziemnej konstrukcji w centrum miasta z tak niekorzystnym efektem jest wielce niepokojące, między innymi w świetle wyników rozptyłu prądów w ekranach kabli WN łączących RPZ „Powiśle” z RPZ „Pałac”. Między tymi RPZ-ami stwierdzono występowanie makroogniwa wynikającego z różnych rodzajów gleby, w których znajdują się ich uziomy [15, 16]. Pomimo przewidywanej powłoki izolacyjnej na korpusach stacji „Powiśle” i „Nowy Świat”, ze względu na ich usytuowanie, należy oczekiwać, że tunele między tymi stacjami, a być może nawet dalszą stacją „Świętokrzyska”, będą kolejną drogą wyrównywania potencjału stwierdzonego makroogniwa. W przypadku wyeliminowania biernej ochrony przed prądami błędzącymi nie będzie żadnego technicznego środka umożliwiającego ograniczenie skutków oddziaływania warunków glebowych na konstrukcję drugiej linii metra w tym obszarze. Na rysunku 3 przedstawiono przekrój geologiczny z trasą 2. linii metra. Wyraźnie widoczne są różne warstwy geologiczne, które tłumaczą zjawisko makroogniwa między wspomnianymi RPZ oraz sygnalizują potencjalne zagrożenie dla budowanej konstrukcji 2. linii metra. W przypadku zniszczenia dylatacji z izolacją, makroogniwa będą mogły destrukcyjnie oddziaływać na odstąpnięte (uszkodzone) części konstrukcji metra bez technicznej możliwości zmniejsze-

nia ich siły działania. W części śródmiejskiej funkcjonują tramwaje, które jak wynika z Monitoringu Prądów Błędzących na pierwszej linii metra są w normalnych warunkach pracy metra oraz PKP zasadniczym źródłem prądów błędzących [21]. Przy braku możliwości zwiększania rezystancji wzdłużnej konstrukcji metra na 2. linii prądy tramwajowe również mogą okazać się dominującymi, jak na pierwszej.

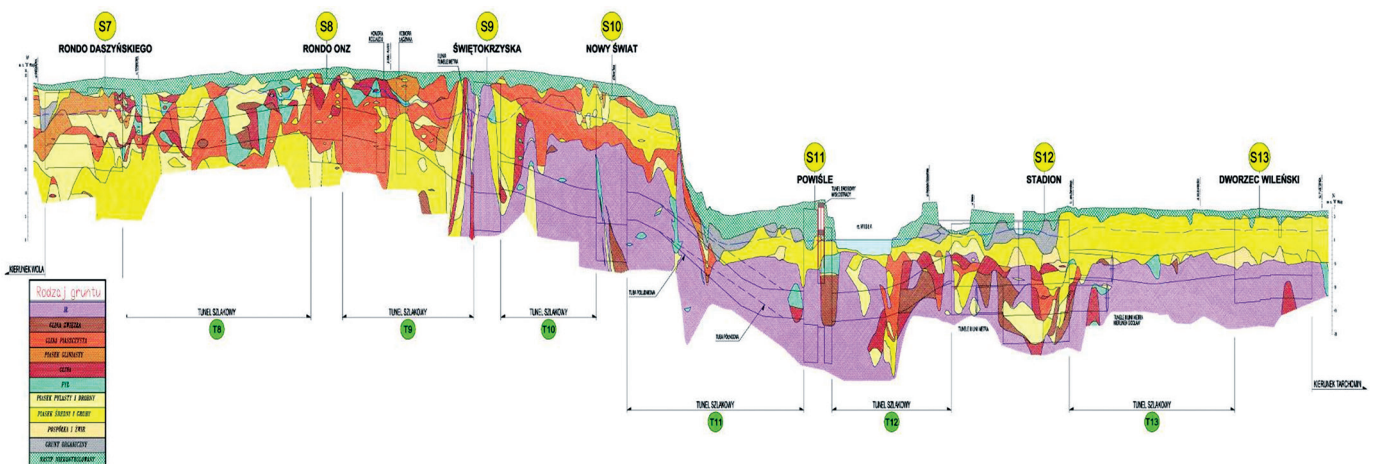
Monitorowanie stanu oddziaływań konduktancyjnych (prądów błędzących)

Na pierwszej linii metra uruchomiono początkowo system rejestracji prądów błędzących RPB [22], który w 1999 r., tj. w czasie eksploatacji metra z pasażerami, przebudowano na system monitorowania prądów błędzących MPB [21, 23]. Podstawowym codziennym zadaniem systemu MPB jest wykrywanie zwarć między ZS i ZT [24]. Ponadto pomiary potencjału konstrukcji w ok. 200 miejscach jej długości pozwalają na ocenę zmian oddziaływania zewnętrznych źródeł prądów błędzących. Generalnie zmianom potencjałów towarzyszą zmiany rozptyłu prądów konstrukcji, które są mierzone pośrednią metodą spadków napięcia na tej konstrukcji. Przy założeniu, że zmierzona przed uruchomieniem jazd pociągów metra rezystancja wzdłużna konstrukcji oraz otaczającej jej ziemi nie ulega zmianie, to z zarejestrowanych spadków napięcia można wtedy wyliczyć prąd zgodnie z prawem Ohma.

W przypadku izolowania konstrukcji metra od zewnętrznej ziemi system MPB może być ograniczony tylko do funkcji opisanych w pracy [25], tj. w celu wykrywania zwarć ZT z ZS. System MPB może być ograniczony w mniejszym zakresie np. poprzez zminimalizowanie liczby elektrod oraz liczby odcinków pomiaru spadku napięcia na konstrukcji. Praca systemu MPB na drugiej linii w przypadku jej izolowania i wystawienia zewnętrznych uzio-mów umożliwiłaby ocenę zużycia materiału elektrody w efekcie zliczania przepływu ładunku elektrycznego (prądu w czasie). Wymagałoby to niewielkich modyfikacji w działaniu programu nadzorującego pracę i sygnalizującego zwarcia.

Podsumowanie

Wprowadzenie izolacji na zewnętrzną powierzchnię podziemnej konstrukcji metra w niesprzyjających okolicznościach może wywołać lokalnie korozję, której szybkość przekroczy dopuszczalną technicznie (aprobowaną) wielkość, zmniejszając tym samym żywotność tej konstrukcji.



Rys. 3. Przekrój geologiczny centralnego odcinka drugiej linii metra w Warszawie [5]

Aby zapobiegać tym niesprzyjającym okolicznościom, izolowaną konstrukcję metra należy sekcjonować dylatacjami z izolacją, które w procesie uruchamiania do eksploatacji powinno się przebadać i dobrać najkorzystniejszy układ połączeń zwierających dylatacje, aby podczas oddziaływania wszystkich źródeł prądów błędnych ich negatywne skutki były jak najmniejsze. Należy przy tym zadbać, aby wewnętrzne wyposażenie i zbrojenie torowiska w zaproponowanej technologii nie spowodowało wyeliminowania skuteczności dylatacji z izolacją. Dodatkowo należy ograniczyć wprowadzenie prądów z uzimów RPZ-ów zasilających podstacje trakcyjne metra, poprzez wyizolowanie obudów aparatury WN i wyprowadzenia zewnętrznego ich uziumu dla każdej z podstacji metra.

Ze względu na wymagania przeciwporażeniowe, na czas przebywania obsługi w obrębie wydzielonej strefy WN podstacji elektrotrakcyjnej, powinny być połączone ziemie tunelu ZT i zewnętrzna ZZ, podobnie jak przy występowaniu nadmiernych napięć między tymi ziemiami. Urządzenie automatycznie wyrównujące potencjały ziem odniesienia ZT i ZZ pracuje na podobnych zasadach co UCKNR na pierwszej linii metra.



Literatura

- [1] Dąbrowski J.: *Dwie czy trzy ziemie odniesienia na drugiej linii metra warszawskiego*. Technika Transportu Szynowego 4/2008.
- [2] Dąbrowski J.: *Dlaczego trzy ziemie odniesienia na drugiej linii metra warszawskiego*. XIII Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i V Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie SEMTRAK'2008 (s. 135–142). Zakopane październik 2008 r.
- [3] Sokółski W.: *Podręcznik dla elektryków*. Zeszyt 25 Ochrona katodowa stalowych konstrukcji podziemnych (wiadomości podstawowe). SEP-COSiW 2009.
- [4] Fiedorowicz M., Jagiełło M.: *Dlaczego warto zabezpieczać podziemne rurociągi stalowe powłokami izolacyjnymi o wysokiej jakości*. Ochrona przed Korozją 8/2009.
- [5] Żolnierzak R.: *Budowa II linii Metra w Warszawie*. Prezentacja na Komisji Torowej IGKM, 11.03.2010 r., <http://www.igkm.pl>
- [6] Dziuba W., Dąbrowski J.: *Rezystancje w obwodach prądów powrotnych warszawskiego metra*. VII Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK'96. Zakopane, październik 1996 r.
- [7] Dąbrowski J., Dziuba W.: *System 2 lub 3 ziem odniesienia w metrze warszawskim – ocena porównawcza*. Dok. IEI Nr arch. 58/2007.
- [8] PN-EN 50122-2:2002 *Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacjonarne, cz. 2. Środki ochrony przed oddziaływaniem prądów błędnych wywołanych przez trakcję elektryczną prądu stałego*.
- [9] Ber P., Molak B., Dąbrowski J.: *Ochrona przeciwporażeniowa w Metrze Warszawskim*. Elektroinfo 4/2004, s. 26–28.
- [10] Ber P.: *Zasilanie i sieć trakcyjna metra*. Konferencja Naukowo-Techniczna „Trakcja elektryczna w komunikacji miejskiej” TRAM'96. Gdańsk, maj 1996 r.
- [11] Ptaszkowski J.: *Elektryczne parametry tuneli kolei podziemnych*. Trakcja i Wagony 10-11-12/1981, s. 281–287.
- [12] Dąbrowski J.: *Kompromisy pomiędzy wymaganiami bezpieczeństwa elektrycznego a wymaganiami ograniczania upływu prądów błędnych z trakcji elektrycznej na przykładzie metra warszawskiego*. Bezpieczeństwo urządzeń energoelektronicznych. I Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna SPES'98. Tom II, s. 237–242. Warszawa, listopad 1998 r.
- [13] PN-EN 50162:2006 *Ochrona przed korozją wskutek prądów błędnych z układów prądu stałego*.
- [14] PN-EN 12954:2004 *Ochrona katodowa konstrukcji metalowych w gruntach lub wodach – Ogólne zasady i zastosowania dotyczące rurociągów*.
- [15] Dąbrowski J., Dziuba W.: *Wpływ kabli RPZ „PALAC” na prądy błędne w tunelach warszawskiego metra*. X Jubileuszowa Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i II Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie SEMTRAK'2002, s. 427–436. Zakopane, październik 2002 r.
- [16] Dąbrowski J., Dziuba W., Szyszko R.: *Pomiary prądów błędnych wprowadzanych do tuneli metra za pośrednictwem żył powrotnych kabli elektroenergetycznych stacji 110/15 kV RZP „Pałac”*. Dokumentacja IEI nr arch. NTE/8/2005.
- [17] Dąbrowski J. i in.: *Opracowanie nowej wersji urządzeń ciągłej kontroli napięć rażenia (UCKNR) spełniających wymagania norm PN-EN 50122 cz. 1 i 2*. Dokumentacja IEI nr arch. 10/2002.
- [18] Dąbrowski J.: *Badanie posadowienia torów w systemie EBS pod kątem upływu prądów błędnych na odcinku metra B21 – A22*. Dokumentacja IEI nr arch. NTE/3/2007.
- [19] Dąbrowski J., Magdańska A.: *Jednostkowa konduktancja przejścia szyny-tunel w okresie sześciolletniej eksploatacji*. X Jubileuszowa Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i II Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie SEMTRAK'2002, s. 427–436. Zakopane, październik 2002 r.
- [20] Dąbrowski J.: *Uruchomienie bielańskiego odcinka I linii metra warszawskiego i zmiany potencjału tej podziemnej konstrukcji*. Technika Transportu Szynowego 7-8/2011, s. 33–41.
- [21] Dąbrowski J., Dziuba W.: *Kontrola prądów błędnych w tunelach Warszawskiego Metra*. MET'2003 Nowoczesna Trakcja Elektryczna w Zintegrowanej Europie XXI w. Pultusk 2003 r.
- [22] Dziuba W., Dąbrowski J.: *System rejestracji prądów błędnych w tunelach Warszawskiego Metra*. IV Krajowa konferencja „Pomiary Korozyjne w Ochronie Elektrochemicznej”. Jurata 1996 r.
- [23] Dąbrowski J., Jasiński S., Magdańska A.: *System monitorowania prądów błędnych w Warszawskim Metrze – sprzęt i oprogramowanie*. VI Krajowa konferencja „Pomiary Korozyjne w Ochronie Elektrochemicznej”. Jurata 2000 r.
- [24] Dąbrowski J., Dziuba W.: *Wykrywanie zwarcí pomiędzy szynami a tunelem w metrze warszawskim*. MET'2001 Nowoczesna Trakcja Elektryczna w Zintegrowanej Europie XXI w. Gdańsk 2001 r.
- [25] Altmann M., i in.: *Streustromüberwachung bei der U-Bahn Nürnberg*. Elektrische Bahnen 5/2004.

Józef Dąbrowski
Instytut Elektrotechniki

Artykuł nawiązuje do [1] oraz referatu wygłoszonego na Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej Trakcji Elektrycznej SEMTRAK'2008 [2].