

Józef DĄBROWSKI

## EWOLUCJE SYSTEMU REJESTRACJI I MONITORINGU PRĄDÓW BŁĄDZĄCYCH W METRZE WARSZAWSKIM

**STRESZCZENIE** *W artykule przedstawiono zarys prac związanych z oddziaływaniem trakcji elektrycznej prądu stałego i przyjętego systemu ochrony podziemnej konstrukcji metra w Warszawie przed prądami błędzącymi. Podano różnice jakie występują w systemie ochrony na I i II linii metra. Omówiono struktury systemu rejestracji oddziaływań prądów błędzących na konstrukcje metra oraz fazy przejścia z rejestracji do monitoringu na całym eksploatowanym już odcinku. Podano stosowane kryteria oceny układu połączeń w systemie ochrony przed prądami błędzącymi. Wraz z rozbudową metra następowały opisane w artykule modernizacje systemu monitoringu usprawniające proces zbierania i archiwizowania danych. Opisano sygnalizację występowania niekorzystnych stanów pracy sieci powrotnej przez system monitoringu. W artykule omówiono modyfikacje wprowadzane na liniach metra i adaptacje systemu monitorowania do zmieniających się warunków.*

**Słowa kluczowe:** *prądy błędzące, rejestracja prądów błędzących w metrze, monitoring prądów błędzących w metrze*

**DOI:** 10.5604/01.3001.0010.5026

---

**mgr inż. Józef DĄBROWSKI**

e-mail: j.dabrowski@iel.waw.pl

Instytut Elektrotechniki, Zakład Trakcji Elektrycznej,  
ul. M. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, ISSN-0032-6216, LXIV, zeszyt 277, 2017

---

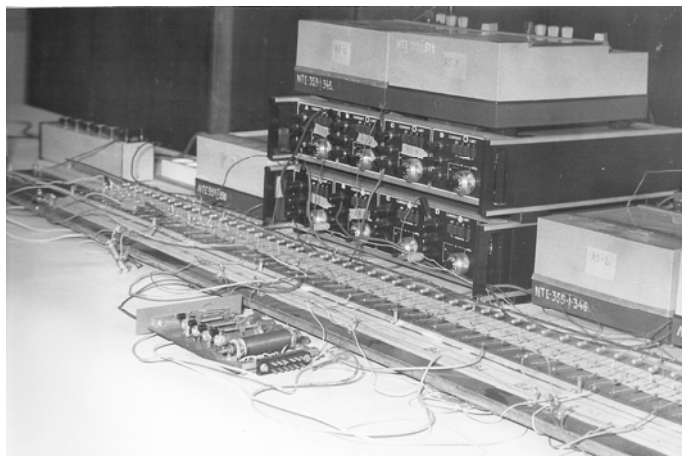
## 1. WSTĘP

---

Szynowa trakcja elektryczna prądu stałego będąca dziełem myśli technicznej człowieka z przełomu XIX i XX wieku jest jednym z kilku znanych źródeł prądu zwanego prądem błędzącym. W systemie szynowej trakcji elektrycznej pojazd jest zasilany ze stacjonarnego źródła – podstacji trakcyjnej. Energia na pokład pojazdu dostarczana jest poprzez odbierak prądu, który ślizga się po gołym (nie izolowanym) przewodzie zawieszonym nad lub tuż obok torowiska po którym porusza się pojazd. Z podstacji gołe przewody zasilane są kablami – przewodami w izolacji. Szyny tworzące torowisko w tym przypadku stanowią nie tylko drogę poruszania się pojazdu, ale są istotnym fragmentem sieci powrotnej prądu z pojazdu do podstacji. Prąd trakcyjny po wykonaniu pracy w układzie napędowym zainstalowanym na pojeździe spływa kołami do szyn po których porusza się pojazd. W punktach zwanych powrotnymi przyłączone są do szyn kable z podstacji trakcyjnej. Pomiędzy pojazdem a punktem powrotnym podstacji prąd trakcyjny wywołuje spadek napięcia na rezystancji wzdłużnej torowiska. Ten spadek napięcia na słabej izolacji szyn torowiska wywołuje zjawisko prądów upływu zwanego błędzącym. Nazwa tego prądu pochodzi z faktu, że wiadomo iż wrócić on musi na podstację i zgodnie z prawem Ohma wykona to po drodze najmniejszego oporu elektrycznego co nie oznacza najkrótszej geometrycznej drogi. Ze względu na poszukiwanie drogi w elektrolicie glebowym zwany był wędrownym (wagabunde) lub błędzącym. Jak stwierdzono zjawisko prądów błędzących wpływało niekorzystnie na podziemne konstrukcje metalowe, co było podstawą prac nad tym zjawiskiem. Do lat osiemdziesiątych XX wieku opracowano modele matematyczne zjawisk związanych z prądami błędzącymi oraz różne techniczne sposoby ograniczania ich upływu jak również ochrony podziemnych konstrukcji metalowych przed oddziaływaniem instalacji trakcyjnych prądu stałego. Metro jest specyficzną konstrukcją podziemną i niekiedy naziemną narażoną na bezpośrednie oddziaływanie prądów upływu z torowisk zabudowanych wewnątrz konstrukcji jak i tych pochodzących od zewnętrznych źródeł np. torowisk tramwajowych. Zastosowanie do budowy obiektów metra żeliwnych tubingów na tunele oraz żelbetu – zbrojonego prętami stalowymi betonu – na konstrukcje stacji pasażerskich i wentylatornie szlakowe wymaga wykorzystania znanych środków ochrony przed skutkami oddziaływania prądów błędzących. Ocena skuteczności zastosowanych środków ochrony wymaga zrealizowania pomiarów, które pod koniec lat osiemdziesiątych XX wieku coraz intensywniej wykorzystywały technikę cyfrową i rozwijającą się technikę zapisu wyników na nośnikach, które pozwalają na dodatkową różnorodną – w tym i statystyczną – obróbkę wyników po wykonanych pomiarach. Poniższy materiał poświęcony jest najistotniejszym zdaniem autora zmianom jakie występowały przy projektowaniu, budowie i eksploatacji metra w Warszawie i miały wpływ na system ochrony przed prądami błędzącymi oraz system pomiarowy służący do oceny skuteczności ochrony obiektów metra przed prądami błędzącymi wszystkich źródeł jakie występują w Warszawie. W znacznej części prac dotyczących koncepcji i budowy systemów ochrony oraz pomiarów decydującą rolę pełnił dr inż. Władysław Dziuba prof. IEL, pracownik Zakładu Trakcji Elektrycznej od 1952 do 2007 roku, kiedy to przeszedł na emeryturę.

## 2. MODELE ZJAWISK PRĄDÓW BŁĄDZĄCYCH W METRZE

Biorąc pod uwagę, że wszystkie materiały z lat pięćdziesiątych XX wieku dotyczące budowy metra w Warszawie, a opracowane w Zakładzie Trakcji Elektrycznej Instytutu Elektrotechniki zostały po przerwaniu tej inwestycji zwrócone do inwestora, należy zauważyć, że ponownie prace nad zjawiskiem prądów błądzących w podziemnej konstrukcji żelbetowej i metalowej jaką jest metro rozpoczęto w drugiej połowie lat osiemdziesiątych od pomiarów parametrów elektrycznych fragmentów konstrukcji budowanego metra i utworzenia modelu analogowego [1] odzwierciedlającego oddziaływanie własnego torowiska na tą konstrukcję – patrz rysunek 1.



**Rys. 1. Widok na analogowy model metra odcinka od B1 do A7**

Dwa czterokanałowe zasilacze to pola rozdzielni prądu stałego (wyłączniki) na dwóch podstacjach trakcyjnych. Na tekstolitowej płycie drut oporowy to ziemia i zestaw zlutowanych rezystorów odpowiadających za rezystancje poprzeczne: przejścia tunel ziemia oraz szyny tunel oraz rezystancje wzdłużne zbrojenia tunelu, szyn jezdnych oraz szyn prądowych na zastępczych odcinkach konstrukcji, a zestaw potencjometrów to pojazd metra [1].

Kolejnym krokiem wykorzystującym ówczesny rozwój techniki komputerowej był model cyfrowy [2]. Model ten był później rozbudowywany o kolejne pomierzone odcinki rezystancji wzdłużnych tuneli i stacji oraz konduktancji przejścia szyny – konstrukcja, aż do stacji A13 włącznie, kiedy to do obliczeń jednego wariantu rozstawienia pociągów w tunelu posiadany wówczas sprzęt komputerowy potrzebował ponad trzech godzin i musiał wykorzystywać zapis pośrednich wartości przeliczeń na dysku, ze względu na zbyt małe pamięci RAM. Dalszej rozbudowie metra towarzyszyło zjawisko zwiększenia obszarów zasilania poprzez włączenie dwóch sąsiednich podstacji w obszar zasilania dwustronnego zewnętrznych podstacji. Zjawisko pracy dwustronnego

układu zasilania z jedną podstacją jako kabiną sekcijną było w cyfrowym modelu metra uwzględnione. Natomiast zrealizowana rozbudowa układu zasilania wymagała od programu dodatkowych pętli przeliczeń co wydłużyłoby czas obliczeń. Wobec tych faktów zawieszono pracę nad dalszą rozbudową modelu. Sam model w początkowym okresie budowy był weryfikowany z wynikami rejestracji spadków napięć na konstrukcji oraz potencjałami powiększających się fragmentów podziemnej budowlanej metodą wykopu. Wyniki obliczeń wariantów posłużyły do opracowania systemu biernej ochrony w postaci dylatacji poprzecznych wypełnionych materiałem izolacyjnym i wymogu dobrze wyizolowanego torowiska od konstrukcji oraz wytypowaniu wielkości fizycznych, których pomiary są niezbędne do oceny skuteczności stosowanych środków ochrony.

### 3. SYSTEM OCHRONY PRZED PRĄDAMI BŁĄDZĄCYMI I ICH POMIARÓW

---

Na przełomie lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych XX wieku zarówno w kraju jak i na świecie do ochrony podziemnych konstrukcji metalowych stosowano metody bierne polegające na izolowaniu konstrukcji od ziemi zewnętrznej (elektrolitu glebowego) oraz w przypadku rurociągów ich sekcjonowanie. Do sekcjonowania rurociągów służą monobloki – stanowią one konstrukcyjną przerwę w metalicznej ciągłości rurociągów. Poza tym stosowane są metody protektorowe wykorzystujące różnicę potencjałów elektrochemicznych metali do ochrony konstrukcji kosztem metalu protektora np. żelazo chronione cynkiem. W metodach protektorowych – dodatkowo zewnętrzny materiał jest przeznaczony do zużycia (skorodowania) w procesie ochrony. Od lat sześćdziesiątych XX wieku stosowano metody czynne z wykorzystaniem zewnętrznych źródeł prądu przemiennego z przemysłowych sieci elektroenergetycznych. Ta technika ochrony związana była z dynamicznym rozwojem półprzewodników. Zastosowanie diod początkowo germanowych a później krzemowych umożliwiło budowę drenażu polaryzowanego, który pozwalał w metalicznym połączeniu pomiędzy chronioną konstrukcją, a źródłem prądu błędzącego na przepływ prądu tylko w jednym kierunku. Współcześnie drenaż spolaryzowany może wykorzystywać tranzystory CMOS i dzięki sterowaniu jego przewodzeniem można kształtować poziom stałego potencjału konstrukcji w przypadku przepływu prądu przez drenaż [3]. Dzięki temu w odpowiednich strefach można decydować o wyrównaniu napięć pomiędzy szynami zelektryfikowanego transportu prądem stałym a podziemną konstrukcją metalową. W przypadkach braku bezpośredniego dostępu do źródła prądów błędzących w postaci szyn zelektryfikowanego prądem stałym transportu stosuje się stacje ochrony katodowej. Instalacja ta składa się z chronionego podziemnego metalowego obiektu oraz uziomu anodowego i regulowanego źródła prądu stałego zasilanego z sieci prądu przemiennego. Ochrona ta może stosować jedną z dwóch strategii. Po pierwsze utrzymywać stałą wartość prądu ochrony lub po drugie stałą wartość potencjału ochrony w punkcie odniesienia – zainstalowania elektrody pomiaru potencjału konstrukcji metalowej względem otaczającego ją gruntu (ziemi). Najkorzystniejsze efekty ochrony podziemnych konstrukcji uzyskiwano stosując mieszankę metod biernych i jednej z metod czynnych. Projekty celowe [4, 5] z początku lat dziewięćdziesiątych służyły do opracowania systemu ochrony konstrukcji metra przed prądami błędzącymi przy założeniu, że powłoki izolacyjne pomiędzy konstrukcją

a ziemią zewnętrzną będą o relatywnie małych rezystancjach oraz w celu ustalenia założeń dla rejestracji wybranych wielkości fizycznych w czasie rzeczywistym, w celu oceny zjawisk korozyjnych występujących w konstrukcji. W tym celu koniecznym stała się wizualizacja wyników, która umożliwiałaby wytypowanie najkorzystniejszej konfiguracji połączeń biernej ochrony podziemnej konstrukcji przed prądami błędzącymi pochodzącymi od wszystkich źródeł. Projekt celowy [4] umożliwił także przetestowanie i wdrożenie systemu rejestracji do realizacji na pierwszym fragmencie odcinka od Kabat (A01) poprzez Wilanowską (A07), a w następnym etapie po Politechnikę (A11). W pracy [6] przedstawiono poszczególne etapy rozwoju techniki pomiarowej w tym i komputerowej wdrażane do opracowania systemu rejestracji, a następnie systemu monitoringu prądów błędzących oddziałujących na konstrukcje metra. Zaproponowany system rejestracji służył do oceny skuteczności biernej ochrony metra w postaci izolacji poprzecznych zwiększających wzdłużną rezystancję konstrukcji przed oddziaływaniem prądów błędzących. Przewidywano również zastosowanie drenażu wzmocnionego do ochrony podziemnej konstrukcji metra.

#### 4. SYSTEM REJESTRACJI PRĄDÓW BŁĘDZĄCYCH W KONSTRUKCJACH METRA

---

W systemie rejestracji, a później monitoringu zastosowano strukturę szafek jako punktów pomiarowych obejmujących obszar pomiarów do kilkuset metrów w obu kierunkach od miejsca zainstalowania danej szafki wewnątrz konstrukcji metra. Szafka taka była odpowiednikiem 16-to kanałowego rejestratora firmy L'Instruments [7], który wykorzystywano w okresie pomiarów realizowanych na budowie metra. W szafce pomiarowej następuje standaryzacja sygnałów wielkości mierzonych w okolicy miejsca posadowienia danej szafki. Przyjęte oznaczenia szafek, zgodne z projektowymi oznaczeniami tuneli i stacji stosowanymi na budowie metra jednoznacznie definiują ich miejsce w podziemnej konstrukcji. Oznaczenie każdego punktu pomiarowego zawiera kolejny numer punktu na odcinku i numer odcinka szlakowego lub stacyjnego tunelu według zasady stosowanej na budowie i przyjętej także w eksploatacji metra; tak np. 2A04 jest drugą szafką pomiarową, licząc od strony Stacji Techniczno-Postojowej (STP) Kabaty (A00), na stacji A04. Wielkości mierzone w szafkach to:

ST – napięcie między szynami jezdnyymi metra i konstrukcją, pozwalające na określenie stref upływu i powrotu prądów do szyn metra;

S – spadek napięcia w szynach między sąsiednimi punktami pomiaru umożliwiający ustalenie kierunku prądu w szynach;

T – spadek napięcia w tunelu lub jego zbrojeniu na odcinku pomiędzy sąsiednimi punktami pomiarowymi, co pozwala na wyznaczenie prądu płynącego w tunelu na podstawie znanej, uprzednio zmierzonej rezystancji tego odcinka;

TCw, TCz – potencjał zbrojenia konstrukcji tunelu lub stacji względem cynkowej elektrody odniesienia umieszczonej na zewnątrz ściany stacji lub tunelu przy jego wschodniej lub zachodniej ścianie;

TMw, TMz – potencjał zbrojenia konstrukcji tunelu lub stacji względem siarczano-miedziowej ( $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{SO}_4$ ) elektrody odniesienia umieszczonej na zewnątrz ściany stacji lub tunelu przy jego wschodniej lub zachodniej ścianie;

I1, I2, I3, I4, I7 lub IP – prądy poszczególnych zasilaczy trzeciej szyny lub prąd obciążenia podstacji trakcyjnej;

STrT – napięcie szyn pobliskiego toru tramwajowego względem zbrojenia stacji lub tunelu – (magistrali uziemiającej);

SKT – napięcie szyn pobliskiego toru kolejowego względem zbrojenia stacji lub tunelu – (magistrali uziemiającej).

W szafce pomiary wszystkich wymienionych wielkości, o ile występują one w okolicy szafki, wykonuje się za pomocą przetworników pomiarowych PU51 na odcinku od B01 do A06, a następnie powyżej stacji A06 stosowano nowsze przetworniki PU70. Przetwarzają one doprowadzane do zacisków napięcie wejściowe składowej stałej na sygnał stałoprądowy o wartości  $0...+/-5$  mA w zależności od mierzonego napięcia.

Wieloparowa skrętka kabla typu telefonicznego w ekranie służy do przekazywania sygnałów z szafek do Central Pomiarowych (CP) umieszczonych na stacjach z podstacją trakcyjną. Tak dobierano szafki pomiarowe podłączone do centrali, aby przekazywane jednocześnie wyniki z takiego obszaru pomiarów odpowiadały teoretycznemu obszarowi zasilania podstacji trakcyjnej przy klasycznym dwustronnym zasilaniu. W CP każdy sygnał prądowy podawany był na precyzyjny rezystor o wartości 800 Ohm. Z listwy zbierającej sygnały z obszaru pomiarowego znormalizowane co do zakresu  $+/- 4$  V doprowadzono do wielowytykowch złącz komputerowych. Analogiczne złącza w kartach przetworników A/C zainstalowanych w komputerze klasy PC umożliwiają rejestrację przebiegów wszystkich wielkości mierzonych w zasięgu danej CP.

Ograniczenie ilości sygnałów pomiarowych w Centrali Pomiarowej wynika ze złączy 16 kanałowych komputerowych kart przetworników A/C oraz maksymalnie trzech kart możliwych do zainstalowania w komputerze PC [8]. Stworzone oprogramowanie komunikacji z kartami przetworników pomiarowych umieszczonych w komputerze klasy PC umożliwiała uruchomienie rejestracji z danego obszaru pomiarowego. Długość czasu rejestracji wartości chwilowych została uzależniona od częstotliwości próbkowania i technicznych możliwości przenoszenia plików rejestracji z komputera pomiarowego na inny komputer. Na marginesie należy dodać, że są to czasy wchodzenia do użytkowania dyskietek 3,5 cala. Dysk o pojemności 1,2 MB przyjmował dane z rejestracji wartości chwilowych z każdej CP przy zadeklarowanym czasie próbkowania co 0,5 sekundy za 2 godziny rejestrowanych pomiarów. Rejestrację w CP można było uruchomić w trybie ze zliczaniem za ustalony przedział czasu. Ta rejestracja polegała na tym, że dla zadanych odstępów czasu obliczane były wartości średnie (także średnie dodatnie i ujemne) i wybierane wartości ekstremalne z każdej mierzonej wielkości i tylko one były zapisywane do pamięci komputera w celu późniejszego opracowania, natomiast wszystkie pozostałe wartości chwilowe są wymazywane; w efekcie takiej rejestracji otrzymuje się zbiór wartości średnich i ekstremalnych dla przyjętych okresów czasu.

Oprogramowanie wizualizujące wyniki zarejestrowanych pomiarów było w zasadzie oddzielnym programem. Dzięki temu to oprogramowanie można było zainstalować na dowolnym komputerze z szybszym procesorem i o lepszej grafice na kolorowym monitorze. Przykłady obsługi i wyniki rejestracji uzyskanych tuż przed oficjalnym uruchomieniem metra dla pasażerów podano w [8].



**Rys. 2. Widok szafki pomiarowej 2A10 podczas prac kontrolnych przetworników pomiarowych typu PU51; w tej szafce tylko rejestracja wielkości TC realizowana jest przetwornikiem PU70**

Pierwsze rejestracje mające na celu weryfikację koncepcji systemu rejestracji dotyczyły obszaru stacji zasilającej oraz głowic sąsiednich stacji A03 wraz z łączącymi je tunelami podczas pierwszego wjazdu składu metra do tunelu z STP Kabaty. Zarejestrowano wjazd i wyjazd pociągu. Jednej z prób rozruchu pociągu na stacji A03 towarzyszyło kontrolowane i rejestrowane zwarcie pomiędzy siecią powrotną a konstrukcją metra. Później w przypadku stacji A07 wykonano próby rozszerzenia obszarów pomiarowych, które okazały się nie trafione – zwiększeniu obszaru towarzyszył wzrost zakłóceń mierzonych sygnałów, zwłaszcza tych szafek najbardziej odległych od Centrali Pomiarowej. Należy zauważyć, że pierwsze szafki pomiarowe wykorzystywały przetworniki U/I sygnałów wejściowych napięciowych na prąd w zakresie  $\pm 5$  mA. Po próbach w centrali pomiarowej na stacji A07 zaproponowano przetworniki o prądzie wyjściowym  $\pm 20$  mA. Większość kłopotliwych zakłóceń została wyeliminowanych jednak z rozszerzenia obszaru pomiarowego należało zrezygnować, także ze względu na ograniczenia ilości obrabianych przez karty przetworników sygnałów, albo zmienić definicję obszarów CP.

## 5. ŹRÓDŁA ODDZIAŁYWAŃ PRĄDÓW BŁĄDZĄCYCH NA KONSTRUKCJE METRA

---

Odcinek ursynowski metra charakteryzuje się tym, że tory zelektryfikowanego prądem stałym kolejowego transportu szynowego znajdują się w znacznych odległościach – w linii prostej rzędu kilku (od 2 do 6) kilometrów od konstrukcji metra. Pomimo, że przebiegi torów kolejowych oraz ursynowskiego odcinka metra nie są ułożone równoległe to między innymi ze względu na odległość nie należało oczekiwać istotnych oddziaływań prądów błędnych pochodzących z tych torowisk. Z tego powodu założono, że prądy wpływające do konstrukcji będą płynąć wzdłuż niej. Większość testów pro-

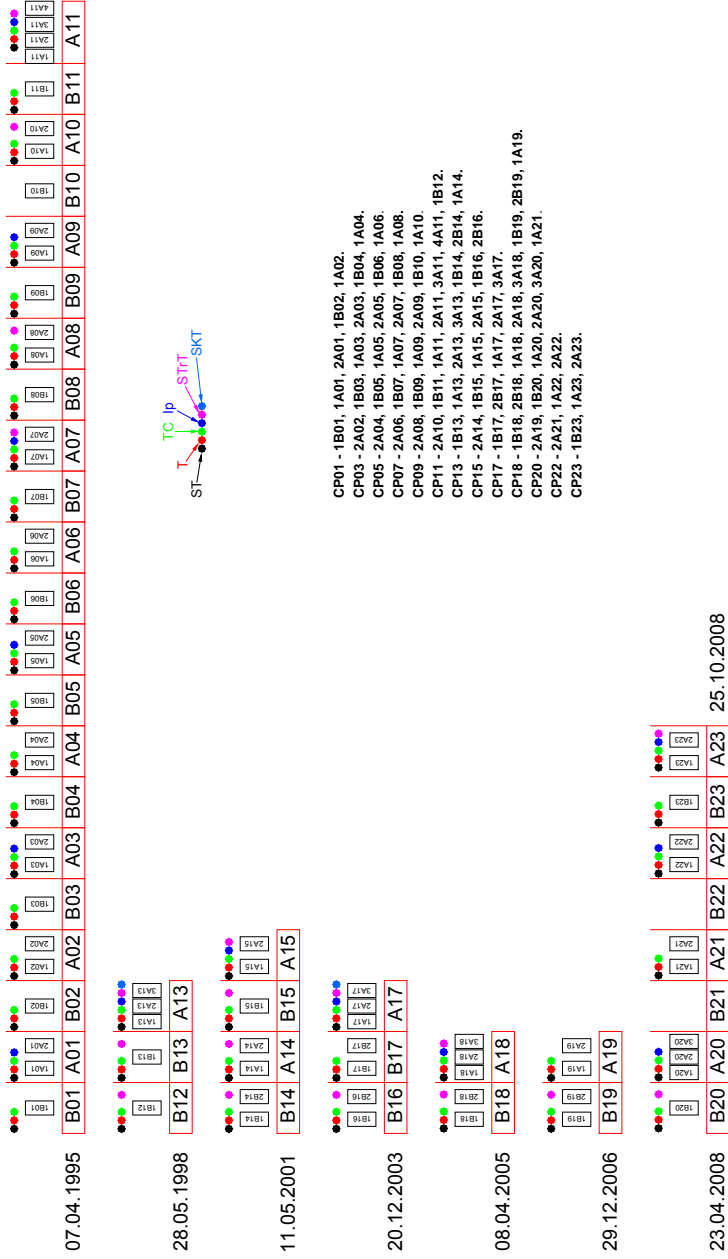
wadzonych podczas budowy pierwszego odcinka siedmiu stacji potwierdzała to założenie. Począwszy od stacji A07 w pobliżu konstrukcji stacji i tuneli metra pojawiają się torowiska tramwajowe. Na odcinku do stacji A11 występują cztery skrzyżowania z konstrukcją metra, przy czym dwa są prostopadłe do osi jazdy pociągów metra (A08 i A10), zaś dwa są pod kątem ostrym (A07) lub wręcz w osi korpusu stacji (A10). W tym przypadku z jednej strony tory tramwajowe odchodzą pod kątem prostym od osi metra, zaś z drugiej strony tory metra odchylają się od osi ulicy z torowiskiem tramwajowym. Takie usytuowanie zewnętrznych źródeł prądów błądzących nie wywołało jeszcze zjawisk, które występują na odcinku od stacji A13 do A19, czyli w centrum miasta. Na tym odcinku tunele znajdują się nie tylko w pobliżu torów tramwajowych, ale osie torowisk metra i tramwaju zrzucone na poziomą płaszczyznę meandrują faktycznie znajdując się na różnych poziomach – tramwajowe na powierzchni, zaś metra kilka lub kilkanaście metrów głębiej. Dodatkowo prostopadłe do tuneli metra ułożone są tory kolejowe linii średnicowej oraz dworca Warszawa Gdańska. Cztery tory linii średnicowej przebiegają w kamiennym tunelu nad metrem, zaś na stacji Warszawa Gdańska tory kolejowe są na powierzchni ziemi. Odcinek od stacji A19 znajduje się pomiędzy torami tramwajowymi w ulicach Broniewskiego i Marymonckiej, które w ostateczności zbiegają się nad końcową stacją A23. Oczekiwano, że mogą wystąpić prądy wyrównawcze na które będzie miała wpływ bierna ochrona przed prądami w postaci dylatacji z izolacją w konstrukcjach stacji i tunelu. Niestety, ale w czasie budowy torowisk wewnątrz tunelu izolacja w dylatacjach tunelu została zwarta przez zbrojenie bankietów podtorza. Dodatkowo magistrała uziemiająca w postaci bednarki umieszczonej wzdłuż konstrukcji po obu ścianach tunelu została połączona poprzecznymi pierścieniami z takiego samego płaskownika. Stalowe pręty zbrojeniowe bankietów montowane w narożach pomiędzy ścianą tunelu a fundamentem (podłogą) przyczyniły się do metalicznych połączeń, które w efekcie wyeliminowały izolację dylatacji oraz techniczną możliwość wpływu na wartości prądów błądzących w konstrukcji metra i ich wymiany z otoczeniem [9].



**Rys. 3. Widok na szafkę pomiarową 1A19 systemu MPB przed doprowadzeniem sygnałów pomiarowych do dwunastu przetworników PU70; z prawej strony kasetka kart przetworników AC/DC i transmisji łącza RS, a nad nią zasilacz elektroniczny**



Schemat przedstawiający odcinki Metra Warszawskiego, wraz z zaznaczonymi szafkami pomiarowymi systemu MPB, oraz datami oddawania do użytku kolejnych odcinków metra.



Rys. 4. Zestawienie central pomiarowych CP i współpracujących z nimi szafek pomiarowych w systemie MPB z uwzględnieniem odcinków rozbudowy I linii metra – przekazywaniem ich do eksploatacji z pasażerami; nad każdą szafką kolorowym kółkiem zaznaczono zestaw wielkości rejestrowanych w danej szafce pomiarowej

## 6. ZAMIANA SYSTEMU RPB NA MPB

---

W latach 1998-99 w metrze warszawskim wprowadzono system zdalnego sterowania ruchem i kontroli dyspozytorskiej wykorzystującej transmisję światłowodową. Przy tej okazji system RPB jako fragmenty całoliniowego systemu został zmodyfikowany do Monitoringu Prądów Błądzących czyli ciągłej rejestracji na całym eksploatowanym odcinku. Prace testowe nad przerobionym RPB na odcinku od A01 do A13 trwały w okresie od września do grudnia 1999 r. Zapis danych z monitoringu na tym odcinku realizowany jest od listopada 1999 r. [10, 11, 12]. W efekcie zebranych w eksploatacji doświadczeń zrezygnowano z rejestrowania wartości prądów zasilaczy i potencjału konstrukcji względem siarczano-miedziowych elektrod odniesienia [8]. Istniejące w systemie RPB punkty pomiarowe w postaci szafek pozostały na swoich miejscach. W systemie MPB tworzą one warstwę fizycznych pomiarów. W szafce Centrali Pomiarowej pojawia się karta przetwarzania A/C ze sterownikiem pomiarowym. W systemie MPB to warstwa konwersji sygnałów analogowych na cyfrowe. Przetworzone sygnały są przesyłane przewodem przemysłowego łącza szeregowego typu RS485 do pomieszczenia koncentratora światłowodowego na danym CP, a następnie światłowodem poprzez kolejne CP do serwera na CD – komputera rejestrującego w Centralnej Dyspozytorni. Cały ten proces i związane z nim urządzenia to warstwa akwizycji danych czasu rzeczywistego. Połączenie poszczególnych CP z koncentratorem odtwarza system rejestracji z komputerem i jego oprogramowaniem dla każdej z istniejących wówczas centrali. Dla celów monitoringu stworzono także nowe oprogramowanie ANPRB do wizualizacji wyników, które umożliwia selekcję zakresu czasu, obszaru i wyboru wielkości rejestrowanych jak również wykresy wielkości w funkcji długości tunelu [13]. W celu weryfikacji wyników rejestracji w obu systemach pozostawiono na stacjach z CP do A13 możliwość rejestracji w CP i wykonania porównania wyników z takich samych przedziałów czasowych dla poszczególnych CP przy stałym już dla całego obszaru kroku obserwacji 0,5 sekundy. Dzięki takiemu dwuetapowemu rozwiązaniu przetestowano przetwarzanie, transmisję i zapis na serwerze oraz wizualizację wyników zarówno graficzną jak i tabelaryczną w systemie MPB. W efekcie uzyskano zweryfikowaną możliwość podglądu i jednoczesnej oceny oddziaływania zewnętrznych źródeł na całą eksploatowaną konstrukcję metra jak również możliwość dokonania oceny stanu sieci powrotnej metra.

W systemie rejestracji zapisywano dane na dysku komputera a następnie po zakończonej sesji pomiarowej można było po przełączeniu na program wizualizacji przeglądać i analizować wyniki, lub je skopiować na dyskietkę w celu przeniesienia danych rejestracji na inny komputer. W systemie MPB wyniki rejestracji wartości chwilowych zapisywane były na dysku serwera w Centralnej Dyspozytorni przypisanego do prądów błądzących. Każdego dnia tworzony jest katalog zawierający w ośmioznakowej nazwie jego datę powstania. W tym katalogu zapisany zostaje plik konfiguracyjny odpowiadający pracującym aktualnie w systemie szafkom pomiarowym i rejestrowanym wielkościom. Co kwadrans zapisywane są pliki danych wartości chwilowych z całego eksploatowanego systemu. W dodatkowym pliku raportów odnotowywane są informacje o zdarzeniach związanych z ingerencją w system jaki i przekroczeniami granicznych

wartości wytypowanych wielkości, z których raporty pojawiały się u Dyspozytora Energetycznego metra. Na zakończenie dnia dopisywany jest plik danych uśrednionych z każdej półgodziny tego dnia – odpowiednik rejestracji ze zliczaniem. Początkowo na dysku serwera mieściły się pliki danych z trzech tygodni, a potem następowało nadpisywanie nowego pliku na miejscu najstarszego. W celu wizualizacji wyników wspomnianym programem ANPRB należało dane z serwera skopiować na przenośny dysk i przenieść na inny komputer. Do przenoszenia zastosowano dyski SyQuesta o pojemności 270 MB. Wystarczało to na zapis wszystkich danych z czterech dni. Przełom wieków to rywalizacja systemu przenośnych dysków z wkraczającymi na rynek płytami CD. Na płycie w początkowym okresie można było zapisać dane z całego tygodnia. Dzięki udostępnieniu komputera z napędem SyQuesta i nagrywarką CD zarchiwizowano na płytach dane od grudnia 1999 r. do chwili przeniesienia Centralnej Dyspozytorni metra na STP Kabaty. Rozbudowie metra towarzyszyła rozbudowa systemu MPB – patrz rysunek 4, co powodowało że przy uruchamianiu każdego kolejnego odcinka przybywało danych i zajmowanej pamięci. W końcowym okresie nadpisywanie na serwerze następowało już po ośmiu dniach, a na przenośnym dysku SyQuesta można było zapisać jedynie jeden dzień, zaś na płycie CD tylko cztery dni. W ciągu bez mała dziesięciu lat eksploatacji przenośnych dysków następowało ich zużycie w postaci „bad sektorów”, które uniemożliwiały odczyt zapisanych danych. Jak wiadomo płyty CD i DVD „wygrały” etap wyścigu na rynku. Dostępność przenośnych dysków ograniczała się do rynku wtórnego i w efekcie kompletność danych wartości chwilowych zaczęła podupadać, tym bardziej, że na serwerze nadpisywanie następowało po coraz krótszym czasie ze względu na rozbudowę linii metra oraz systemu MPB. Do nieciągłości zarchiwizowanych danych przyczyniały się także uszkodzenia dysku w serwerowni, które występowały po okresie deklarowanej gwarancji producenta. Po przeniesieniu Dyspozytorni metra na STP pojemność dysku umożliwia zapis danych z kilku lat bez nadpisywania.

### 6.1. Sygnalizacja zwarć sieci powrotnej z konstrukcją metra

Dzięki doświadczeniom z RPB – rejestracji ze zliczaniem – system MPB wyposażono w dodatkową funkcję sygnalizacji zwarć sieci powrotnej metra ze zbrojeniem tej konstrukcji – magistralą uziemiającą [14]. W miejscu zwarcia średnie napięcia ST zarówno dodatnie jak i ujemne są minimalne, zaś prądy zwarcia w konstrukcji będą rozplływać się w przeciwnych kierunkach oraz ze względu na zwiększone wartości prądów pojawią się większe wahania zmian potencjału konstrukcji – największe w okolicach miejsca zwarcia. Ponieważ prądy zwarcia z reguły powodują przekraczanie zakresów pomiarowych przetworników w obszarze miejsca zwarcia to do typowania zwarcia przyjęto pary wartości średnich dodatnich i ujemnych napięć szyny tunel za 30 minut i wartości ekstremalnych potencjału konstrukcji za ten sam przedział 30 minut. Początkowo uzyskano dużą niezgodność sygnalizacji zwarć z ich faktycznym występowaniem [15]. Czas eksploatacji, a zwłaszcza próby związane z odseparowaniem szyn torów jezdnych w tunelach metra od tych na powierzchni – na terenie STP Kabaty – doprowadziły do wniosku, że sieć powrotna metra pracuje z jednym zwarcie występującym na terenie STP Kabaty. System sterowania ruchem kolejowym oparty na dławikach torowych umożliwia otwarcie obwodów torowych na styku dwóch obszarów zajętości, a tym samym dokonany

zostaje podział odcinka zasilania dwustronnego od strony sieci powrotnej na dwa odcinki jednostronnie zasilane, każdy i innej podstacji. Skorzystano z tej sposobności i w godzinach, kiedy tabor metra kursuje wewnątrz tunelu i nie są dokonywane żadne wjazdy lub wyjazdy składów z STP do tunelu, dokonano separacji torowisk na powierzchni ziemi od torowisk w tunelach. Analiza i pomiary sieci powrotnej na terenie STP Kabaty wykazała, że zwarcie tej sieci występuje dokładnie w hali postojowo – remontowej (elektrowozowni). Brak izolacji większości szyn zainstalowanych w tej hali od jej konstrukcji – uziomów fundamentowego i otokowego oraz brak złączy izolujących w szynach na wjeździe do tejże hali powodują zjawisko zwarcia uziomu hali z torowiskiem. Odcięcie torów w elektrowozowni na terenie STP od torów w tunelach metra powoduje istotne zmiany rozkładu wartości średnich napięcia ST występujących wzdłuż konstrukcji w analogicznych okresach czasu – zbliżonych obciążeniach podstacji trakcyjnych. Zastosowanie separacji galwanicznej – zwieralnych złączy izolujących w tunelu dojazdowym wymaga opracowania na podstawie wyników MPB wartości granicznych napięć ST i wartości ekstremalnych potencjału TC dla zmienionych warunków pracy sieci powrotnej.

W przypadku II linii metra każdej rozbudowie eksploatowanego odcinka towarzyszyć będzie weryfikacja parametrów sygnalizacji zwarcia dla całości, a zatem i dla już pracującego odcinka. W przeciwieństwie do I linii, gdzie rozbudowa odbywała się w jednym kierunku i kryteria sygnalizacji zwarcia wystarczyło ustalić dla nowego odcinka to na II linii będzie to ponowne ustalanie wartości granicznych z zarejestrowanych przez MPB danych także wobec już eksploatowanego odcinka.

Pojawienie się i występowanie zwarcia w sieci powrotnej zarówno na I jak i na II linii metra jest sygnalizowane na monitorach Dyspozytora Energetycznego metra. Alarm zawiera informację o obszarze na którym należy to zwarcie lokalizować podczas nocnej przerwy w ruchu pociągów. Dokładniej miejsce tego zwarcia pozwala określić analiza zarejestrowanych wielkości ST, TC i T [16].

W trzy lata po uruchomieniu sygnalizacji zwarcia na I linii pojawił się materiał [17] opisujący system sygnalizacji zwarć sieci powrotnej z konstrukcją w metrze Nunbergu oparty jedynie o wartości średnie ST wyliczane za kwadrans [17], czyli dla przedziału czasu o połowę krótszym niż w MPB. W tamtym przypadku rozpatrywano średnie piętnastominutowe, które to przedziały stosowane są w rozliczeniach elektroenergetycznych. Jeżeli po torach metra przemieszcza się tabor jednego typu to łatwiej jest dopasować wartości kryterialne sygnalizacji zwarcia, ale zawsze przy typowaniu z jednej zmiennej ST mogą nastąpić takie zaburzenia w rozkładowym ruchu składów, że może być sygnalizowane zwarcie, które wynika z braku obciążenia dla określonego miejsca w danym przedziale czasu. Nie zależnie od tych uwag wariant sygnalizacji zwarć w sieci powrotnej metra i innego transportu szynowego zelektryfikowanego prądem stałym poruszającego się po estakadach oparty o średnie napięcie pomiędzy szyna a konstrukcją zalecają światowa norma IEC [18] oraz europejska [19] zrewidowana w 2011 r.

## 6.2. Sprawdzenie aktywnej ochrony obiektów metra drenażem wzmocnionym

Przy rozbudowie metra w odcinku śródmiejskim wprowadzono do systemu MPB dodatkowo dwie wielkości –  $I_d$  prąd drenażu oraz  $U_d$  wyjściowe napięcie na zaciskach

drenażu wzmocnionego. Przewidywano, że będzie konieczne wprowadzenie aktywnej ochrony konstrukcji metra przed prądami źródeł zewnętrznych jakim są tory tramwajowe na ul. Marszałkowskiej i Mickiewicza. Zaprojektowano i przygotowano trzy punkty przyłączeniowe drenażu wzmocnionego w wentylatorniach szlakowych V13, V15 i V17. Najpierw sprawdzono skuteczność działania drenażu zainstalowanego w V13. Wymuszenie prądu ochrony na poziomie 50 A powodowało elektroujemne przesunięcie potencjału konstrukcji chronionej (tuneli metra) o 30 mV w okolicach przyłączenia przewodu drenażowego do szyn tramwajowych. Widoczny zasięg ochrony w postaci przesunięcia potencjału konstrukcji w czasie przepływu wymuszonego prądu drenażu o kilka mV przekraczał 3 km. Odcinek ten jest większy niż zalecana odległość pomiędzy podstacjami trakcyjnymi metra. Taki zasięg działania ochrony – wpływania na zmianę potencjału konstrukcji – przy tak dużych średnicach tuneli i powierzchniach styku korpusów stacji z elektrolitem glebowym potwierdza względnie słabą izolację pomiędzy ziemią zewnętrzną (elektrolitem glebowym) a zbrojeniem konstrukcji czyli magistralą uziemiającą. Próby wykonane podczas uruchamiania systemu MPB w CP 15 i CP 17 z tym samym drenażem zamontowanym w wentylatorni szlakowej V15 i później w V17 wypadły podobnie. Środek ochrony zgodnie z przewidywaniami okazał się być skutecznym, ale jego trwałe praktyczne zastosowanie wymagało oceny przesunięcia potencjału wszystkich podziemnych konstrukcji występujących pomiędzy szynami tramwajowymi a konstrukcją metra w okolicach przyłączenia drenażu. Przygotowanie takich badań w warunkach wielkowiejskiego ruchu i ich wykonanie nawet jedynie w czasie ciszy nocnej – przerwy w ruchu szynowych pojazdów trakcyjnych zasilanych napięciem prądu stałego – stanowi poważne wyzwanie techniczno-organizacyjne, którego można było uniknąć. Ponieważ zagrożenie konstrukcji pierwszej linii metra od prądów obcych źródeł bez pracującego wzmocnionego drenażu na odcinku przeprowadzania prób z drenażem było na poziomie technicznie akceptowalnym [20].

## 7. MODYFIKACJE TECHNICZNEJ REALIZACJI SYSTEMU MPB

---

Poczynając od stacji A18 w szafkach pomiarowych po przetwornikach PU 70 standaryzujących wielkości mierzonych napięć na sygnały prądowe +/- 20 mA pojawiają się karty przetworników A/C oraz mikroprocesorowy układ transmisji szeregowej po łączu RS pomiędzy szafką pomiarową a CP. Oznacza to, że warstwa konwersji sygnałów analogowych na cyfrowe została wprowadzona do szafek, które dotychczas tworzyły tylko warstwę fizycznych pomiarów.

Jeszcze przed ukończeniem budowy I odcinka metra w systemie MPB wprowadzono zmiany przetworników A/C z typu integer na zmiennoprzecinkowe. Zmiana ta związana jest ze zwiększeniem przepustowości transmisji danych w całoliniowej światłowodowej sieci metra.

Doświadczenia zdobyte przy uruchamianiu systemu MPB na kolejnych budowanych odcinkach wskazywały, że np. zanik zasilania szafki koncentratora sygnałów na jednym z CP powodował odcięcie transmisji danych z kolejnych CP o wyższych numerach. Zjawisko to wykorzystano w diagnostyce działania MPB na pierwszej linii metra. Było ono też podstawą prac nad zmodyfikowaniem tego systemu dla II linii

metra. W efekcie napięciowe sygnały analogowe zbierane w szafce pomiarowej, analogicznie jak na I linii, są podawane bezpośrednio na wejścia kart przetworników A/C [21]. Zakres napięcia wejściowego karty, jest dobrany do oczekiwanej wielkości napięcia rejestrowanego sygnału, ale wielkość każdej karty wejściowej jest jednakowa niezależna od znamionowego napięcia wejściowego – patrz rysunek 5. W szafce pomiarowej na II linii następuje przetwarzanie sygnału do transmisji światłowodowej. Wejścia diagnostyczne stosowane w szafkach na I linii do weryfikacji prawidłowej pracy poszczególnych węzłów na styku warstw systemu MPB dopracowano i udostępniono dla eksploatacji. Komputer z oprogramowaniem i łączem Ethernetowym umożliwia podgląd stanu pracy poszczególnych szafek z dowolnej pracującej szafki w systemie II linii. Wybór szafki w systemie umożliwia obserwację na bieżąco rejestrowanych w czasie wielkości z tej wybranej szafki jak i pozostałych pracujących. Z każdej szafki można również pobrać wszystkie dane za ostatni miesiąc rejestracji w celu dokonania analizy. Dla celów analizy danych z II linii program ANPRB wymaga modyfikacji wektora sygnałów wejściowych systemu, który z oczywistych względów różni się od swojego odpowiednika na I linii. Dane wcześniejszego okresu czasu można pozyskać w serwerowni na CD podobnie jak jest to dla I linii. Przyjęte rozwiązanie systemu MPB na II linii umożliwia wcześniejszy dostęp do danych z bieżącego dnia, ale wymaga pobytu przy dowolnej szafce pomiarowej na tej linii. Personel na STP Kabatach ma dostęp do pełnych danych z poprzedniego dnia dla obu linii.



Rys. 5. Płyta czołowa w obrysie szafki pomiarowej stosowanej na II linii metra

## 8. POWIĄZANIE EWOLUCJI SYSTEMÓW Z ROZWOJEM – ZMIANAMI W METRZE

---

### 8.1. Sterowanie ruchem pociągów metra

---

Na pierwszej linii metra zasadniczo występują dwa sposoby sterowania ruchem kolejowym SRK. Sterowanie SRK z wykorzystaniem obwodów torowych separowanych dławikami torowymi od STP Kabaty do stacji A11, zaś na dalszych odcinkach wykorzystywane są obwody częstotliwościowe. W obu tych przypadkach szyny po których jeżdżą pociągi metra są wykorzystywane w SRK. W tej sytuacji podobnie jak na PKP stosowanie łączników międzytorowych jest determinowane przez SRK. Łączniki poprzeczne pomiędzy dwoma torami linii metra można zastosować w punktach węzłowych obwodów torowych w obu torach. W części śródmiejskiej od A07 do A20, gdzie tunele były drążone metodą górnictwem osobno dla każdego toru na etapie projektu budowlanego, torowego i sterowania ruchem uzgadniano węzły obwodów torowych częstotliwościowych i dławikowych na wysokości wentylatorni szlakowych, aby kable łączników między torowych były możliwie jak najkrótsze. Na drugiej linii metra do SRK nie są już wykorzystywane szyny jezdne metra jako elementy obwodów torowych. Ograniczeniem dla łączników poprzecznych międzytorowych jest w tym przypadku jedynie dostępność obu torów – prześwit pomiędzy tunelami na wysokości wentylatorni szlakowych lub przepusty na stacjach.

Pomiary napięć ST szyny – tunel dla odcinka do B13 wykonywane są zawsze względem najbliższego zestawu dławików torowych i złączy izolujących, a miejscem zainstalowania szafki pomiarowej. Przewód pomiarowy przyłączany jest zawsze do środka pomiędzy dławikami torowymi. Specyfika systemu SRK powoduje, że dławiki umieszcza się w pobliżu peronów pasażerskich czyli głowicach stacji. Ponieważ szafki pomiarowe są również w głowicach stacji to zarejestrowane napięcia umożliwiają ocenę zagrożenia porażeniowego pasażera wsiadającego lub wysiadającego do/z pojazdu metra.

Rezygnacja z systemu dławików torowych i wprowadzenie systemu częstotliwościowego spowodowało, że przyłączenie pomiarowe do szyn jest możliwe bezpośrednio do szyny na wprost zainstalowanej szafki pomiarowej. Mierzone napięcie ST ze względu na instalowanie szafek pomiarowych w głowicach stacji również umożliwia ocenę zagrożenia porażeniowego pasażerów na peronie przemieszczających się z/do pojazdu. Oba warianty SRK i realizowanego pomiaru ST utrudniają prawidłowy pomiar spadku napięcia S w szynach, ponieważ szafki pomiarowe nie zawsze wypadają na tej samej ścianie kolejnych stacji oraz w miejscach zainstalowania łącznika poprzecznego i dlatego pomiar S wymaga wybrania toru na którym będzie realizowany pomiar ST. Ekwiwipotentjalizacja sieci powrotnej obu torów jest lepsza w przypadku systemu z dławikami torowymi i połączeniami międzytorowymi stosowanymi także w obu głowicach stacji pasażerskich bez podstacji trakcyjnej, niż przy połączeniach międzytorowych jedynie w wentylatorniach szlakowych jakie zdarza się przy częstotliwościowych obwodach SRK. Dodatkowo przy systemie bez dławików torowych szczególnie istotnym staje się przyłączenie wszystkich pomiarów ST do tej samej szyny wybranego toru, aby pomiar spadku napięcia w szynach

był miarodajny. Rozwiązanie to niesie w sobie pewne zagrożenie co do pewności pomiarów ST i S w przypadkach pęknięć szyny wybranego toru do której przyłączono przewody pomiarowe z szafek.

## 8.2. Torowisko – sieć powrotna metra

W porównaniu do I linii, gdzie w tunelach są ułożone szyny S60 (UIC60), na II linii metra zastosowano szyny S49, które są lżejsze, a zatem mają większą rezystancję jednostkową [22]. Pomimo zastosowania na II linii jednolitego taboru o mniejszym poborze energii niż tabor stosowany od początku na I linii zdecydowano się na wprowadzenia kabla wzmacniającego w tory na II linii – połączenia zmniejszającego spadki napięć w szynach. Do szyn każdego toru przyłączany jest miedziany kabel  $630 \text{ mm}^2$  wzmacniający co ok. 400 m. Odległości pomiędzy poszczególnymi stacjami nie są stałą wielokrotnością 400 m dlatego przyłączenia kabli wypadają w różnych miejscach. Na centralnym odcinku II linii zachowano połączenia międzytorowe w wentylatorniach szlakowych. Wprowadzenie w głowicach stacji wentylatori stacyjnych wyrównujących ciśnienie powietrza przemieszczanego ruchem składów metra uniemożliwiło zastosowanie połączeń między torowych, zwłaszcza jeżeli wcześniej w projekcie budowlanym nie uwzględniono przepustów kablowych dla tych połączeń. Brak kompletu połączeń międzytorowych dodatkowo utrudniło sytuację z pomiarem napięcia ST, a zwłaszcza spadku napięcia w szynach, szczególnie jeżeli przyłączenia pomiaru ST nie występują w węzłach – wspólnych punktach kabla wzmacniającego z szynami. W projekcie systemu MPB można zaproponować oddzielne przyłącza od szyn do pomiaru spadku napięcia w szynach oraz napięcia szyny-tunel, ale wobec trudności technicznych związanych przy uruchomieniu z praktyczną weryfikacją kolejnych połączeń do szyn i zapewnieniem trwałości tych połączeń oraz istotnie zmniejszonym znaczeniem spadku napięcia w szynach przy analizie wyników i weryfikacji kierunków przemieszczania się składów w tunelach podjęto decyzję o rezygnacji z rejestracji wielkości S na pozostałych odcinkach II linii metra.

Na kolejnych odcinkach II linii przewiduje się więcej przejść pomiędzy tunelami metra, w których będą wykonane połączenia międzytorowe. Dzięki temu odcinki przyłączania kabla wzmacniającego ulegną skróceniu.

## 8.3. Spadek napięcia na konstrukcji metra

W początkowym okresie budowy ursynowskiego odcinka realizowano wspólny tunel dla obydwu torów dopiero od stacji A06 pojawiają się dwa oddzielne tunele. Rejestracje spadku napięcia na konstrukcji realizowano poprzez przyłączenia przewodów pomiarowych do jednej ze ścian, sprawdzano również krzyżowy układ połączeń. Jak stwierdzono konfiguracja ułożenia przewodów pomiarowych w obiekcie ma znakomity wpływ na generowanie zakłóceń pochodzących od  $di/dt$  prądu trakcyjnego własnych składów metra. Stromości zmian prądu trakcyjnego nie wydają się zbyt duże (kilkanaście A na milisekundę), ale ze względu na obszar (powierzchnię) utworzoną pomiędzy przewodem a ścianą przy rejestracjach wielkości o miliwoltowych wartościach występują wyraźne zakłócenia. Badania spadków napięć na powstającej konstrukcji ursynowskiego



odcinka metra, kiedy wewnątrz nie było jeszcze układów torowych, przy różnych konfiguracjach połączeń przewodów pomiarowych na ścianach tuneli i stacji nie wykazywały istotnych różnic w spadkach mierzonych (rejestrowanych) jednocześnie na obu zewnętrznych ścianach konstrukcji jak również po przekątnych. Późniejsze doświadczenia przy jeżdżących składach metra wskazują, że techniczna realizacja układu pomiarowego wielkości  $T$  o minimalnych zakłóceniach od prądu trakcyjnego metra wymaga poprowadzenia przewodu pomiarowego jak najbliżej ściany do której przyłączono przewód. Zasadę tą stosowano na później budowanych odcinkach I linii niezależnie czy były dwa oddzielne czy też pojedynczy tunel jak na odcinku Bielańskim. Zasadę tą stosowano również na centralnym odcinku II linii metra.

Tylko w przypadku stacji A13, która w swoim korpusie zawiera również rozdzielnię 110/15 kV RPZ „Pałac” [23] koniecznym okazało się w czasie eksploatacji wymiana przetworników U/I wielkości  $T$  ze względu na zbyt mały zakres pomiarowy. Wpływ na to zjawisko miała rozbudowa rozdzielni 15 kV na RPZ i przyłączenie kolejnych kabli, których ekrany są łączone bezpośrednio z uziomem RPZ, a ten z kolei jest połączony z konstrukcją stacji i tuneli. Jest to przykład potwierdzający zakaz w normie [19] o łączeniu konstrukcji metra z RPZ we wspólnym korpusie. W przypadku RPZ „Pałac” podczas sprawdzania rezystancji uziomu RPZ okazało się, że konduktancja przejścia korpusy stacji A13 jest zbyt mała pomimo znaczących gabarytów samej stacji, aby zapewnić bezpieczeństwo przeciwporażeniowe obsługi w rozdzielni WN/SN. W celu zmniejszenia rezystancji uziomu RPZ do zbrojenia stacji dołączono magistrale uziemiające zachodnich tuneli B13 i B14 zwierając ich dylatacje z izolacją świadomie rezygnując ze zwiększonej ochrony przed prądami błędzającymi, ponieważ w przepisach pierwszeństwo przed ochroną oddziaływania prądów błędzających ma ochrona przeciwporażeniowa.

#### 8.4. Potencjał konstrukcja metra ziemia

W pierwszym etapie zabudowywano po dwie pary elektrod jedna para – cynkowe druga para – siarczano-miedziowe. Doświadczenia na etapie uruchamiania metra w latach 1992-95 wykazały, że elektrody klasyczne z siarczanem miedzi zainstalowane wraz z cynkowymi w konstrukcji na początku lat dziewięćdziesiątych ulegały w tak krótkim czasie rozstworzeniu i wypłukiwaniu siarczanu z elektrody. O wypłukiwaniu siarczanu miedzi świadczą elektrody rezerwowe, które nie obciążone rezystancją wejściową przetwornika traciły potencjał [8]. Biorąc pod uwagę wielkość prądu rzędu kilku  $\mu\text{A}$  obciążającego elektrodę pomiarową, zdecydowano się w obwodach pomiarowych elektrod cynkowych podnieść wartość rezystancji wejściowej przetwornika z wielkości 1 do 2  $\text{M}\Omega$ . Dzięki temu zmniejszono dwukrotnie prąd pobierany z elektrody przy pomiarze potencjału, a to zwiększy jej żywotność pomiarową.

Realizowany w systemie MPB pomiar/rejestracja potencjału konstrukcji zapewnia ocenę zagrożenia elektrochemicznego tej konstrukcji od prądów błędzających pochodzących z wszystkich źródeł. Kryterium stosowanym do oceny zagrożenia to:

$$\text{DTC} = \text{TC}_{\text{szyt}} - \text{TC}_{\text{noc}} < + 100 \text{ mV}$$

gdzie:

DTC – przyrost wartości średniej potencjału konstrukcji;

$TC_{\text{szczyt}}$  – wartość średnia potencjału konstrukcji z godzin szczytu porannego 06:30 – 08:30 lub popołudniowego 14:30 – 17:00;

$TC_{\text{noc}}$  – wartość średnia potencjału konstrukcji z godzin ciszy nocnej 01:00 – 03:00.

Zastosowanie tego kryterium umożliwia ocenę skutków wprowadzanych zmian w układzie połączeń ochrony przed prądami błądzącymi konstrukcji metra.

Pomiędzy konstrukcją I i II linii metra w Warszawie są istotne różnice. Dotyczy to szczególnie tuneli wykonywanych podobną metodą drążenia przy pomocy tarczy. Większość drążonych tuneli na I linii wykonana jest z segmentów żeliwnych, tylko niewielkie odcinki pod tunelem średnicowym oraz testowy odcinek zachodniego tunelu B09 wykonano z tubingów żelbetowych. Przestrzeń pomiędzy zewnętrzną ziemią a tubingami wypełniano w czasie budowy bentonitem, który generalnie służy do uszczelnienia przed wodą. Mieszanka ta nie zapewniała dobrej izolacji elektrycznej. Na centralnym odcinku II linii metra drążone tunele wykonane są z tubingów żelbetowych, których poszczególne segmenty tworzące pierścień są od siebie izolowane elektrycznie masą (wkładką), która również zapewnia wodoszczelność na stykach wszystkich elementów. Żelbetowa konstrukcja każdego z segmentów pierścienia zapewnia także elektryczną izolację zbrojenia znajdującego się wewnątrz betonu. Oznacza to, że II linia metra ma tunele w których metalowe instalacje są izolowane elektrycznie od elektrolitu glebowego – ziemi zewnętrznej. Bentonit znajdujący się pomiędzy segmentami a ziemią zewnętrzną; podobnie jak to realizowano na I linii; nie ma na II linii wpływu na izolację elektryczną i wodną. Wszystkie stacje i wentylatornie szlakowe centralnego odcinka II linii metra budowane były metodą ścian szczelinowych. Metodą tą wykonywane były stacje na części centralnej i północnej I linii. Wyniki pomiarów konduktancji przejścia zbrojenia korpusu stacji względem elektrolitu glebowego (ziemi zewnętrznej) wykonane na stacji A15 sugerowały, że metoda ścian szczelinowych – (zastosowane materiały do ich wykonania), nie zmieniły w znaczący sposób izolacji zbrojenia w porównaniu z konstrukcjami na „ursynowskim” odcinku metra, gdzie ściany korpusów były pokrywane warstwami papy i lepiszcza przed zasypaniem. Na centralnym odcinku II linii nie wykonano izolowanych elektrycznie dylatacji konstrukcji największych stacji, dzięki czemu nie można zrealizować porównawczych pomiarów konduktancji przejścia na nowych obiektach. Brak dylatacji z izolacją w korpusach większych stacji na centralnym odcinku II linii metra pozbawił eksploatację wpływu na zmiany rezystancji wzdłużnej konstrukcji, a tym samym wpływu na rozptył prądów błądzących z wszystkich źródeł w obszarze podziemnych konstrukcji tego odcinka.

## 8.5. Prąd w sieci trakcyjnej metra

Pomiar prądu poszczególnych zasilaczy (pole rozdzielni prądu stałego z wyłącznikiem) realizowany był z wykorzystaniem boczników – sygnał pomiarowy musiał być separowany (izolowany) na przetworniku. Ze względu na możliwość wyniesienia napięcia trakcyjnego do pozostałych sygnałów systemu rejestracji prądów błądzących w danej szafce pomiarowej, to przetworniki prądu trakcyjnego były instalowane w polach rozdzielni prądu stałego w podstacjach trakcyjnych na A01, A03 i A05. Rejestracje prądów pól zasilających (zasilaczy) na małym obszarze rejestracji umożliwiają orientację o „położeniu” w czasie jeżdżących składów metra. Jednak sygnały te były również zakłócone pomimo

stosowania skrętki i ekranów w kabelkach transmisyjnych do CP. Pomiary tej wielkości, o ile nie były by zakłócone, pozwoliłyby na obserwację rozwoju zjawiska rekuperacji po wprowadzeniu taboru z napędem asynchronicznym – składów Alstomu.

Tylko pomiar zbiorczego prądu trakcyjnego wracającego do prostowników w Szafie Kabli Powrotnych nie był zakłócony i jest realizowany na każdej podstacji trakcyjnej chyba, że wykonawca wprowadzi jakiś błąd nie do wykrycia, lub pominię pomiar prądu wymienianego pomiędzy siecią trakcyjną, czy też zasobnikiem superkondensatorowym na II linii metra. Rejestracja prądu podstacji umożliwia ocenę/oszacowanie energii elektrycznej [24] oraz ładunku elektrycznego wpływającego do systemu zasilania pociągów metra. Zgodnie z prawem Faradaya to właśnie ładunek elektryczny upływający z szyn przyczynia się do ubytku materiału. W początkowym okresie, gdy po torach poruszał się tabor z klasycznym oporowym rozruchem, ładunek pobrany z podstacji w całości był konsumowany przez tabor i energia związana z tym ładunkiem wytracana była na opornikach hamowania. Tabor z napędem asynchronicznym – rekuperacją energii kinetycznej na sieć staje się źródłem energii (z przepływem ładunku elektrycznego w przeciwnym kierunku) w trakcyjnej sieci metra. W takim przypadku następuje przepływ energii oraz ładunku elektrycznego od pojazdu w kierunku podstacji trakcyjnej i poprzez szyny rozdzielni prądu stałego do sąsiednich pojazdów. W sieci powrotnej ze względu na połączenia poprzeczne międzytorowe, a szczególnie między punktami powrotnymi obu torów przepływ energii rekuperacji tylko w części następuje do SKP przez kable powrotne toru na którym znajduje się rekuperujący pojazd.

Na kablach powrotnych pomiar ten będzie zafałszowany ze względu na to, że w sieci powrotnej punkty powrotne obu torów są zwarte łącznikiem międzytorowym. Przy połączeniach poprzecznych międzytorowych na szlaku pomiędzy podstacjami pobierany prąd z jednego pola zasilającego wraca dwoma kablami powrotnymi z odcinka zasilania. Połączenia międzytorowe są instalowane, ponieważ przyczyniają się do zmniejszenia spadku napięcia w szynach, a tym samym napięcie ST.

## 8.6. Ewolucja przyłączania przewodów od szyn torów tramwajowych

W przypadku konstrukcji o słabej izolacji pomiędzy zbrojeniem (magistralą uziemiającą) a otaczającym gruntem – elektrolitem glebowym – możliwe było przyłączenie do szyn tramwajowych w pobliżu punktów powrotnych sieci tramwajowej, podobnie jak uczyniono to z elektrodami pomiarowymi. Dotyczy to głównie tuneli, natomiast stacji, jedynie w przypadkach, gdy takowe punkty były w obrębie korpusu danej stacji. Izolowanie zewnętrznej powierzchni tuneli z tubingów żelbetowych od elektrolitu glebowego, zastosowane na centralnym odcinku II linii metra spowodowało, że istnienie tramwajowego punktu powrotnego nad konstrukcją tych tuneli nie wywołuje przepływu istotnych prądów z takiej konstrukcji do sieci tramwajowej. Dlatego też pomiar napięcia szyn (STrT) może być realizowany w najbliższym możliwym miejscu, np. przy wentylatorni lub stacji. W czasie eksploatacji I linii metra w kilku miejscach prowadzono remonty torowisk tramwajowych. W jednym z przypadków na ul. Marszałkowskiej stracono połączenie pomiarowe. W kilku innych udało się zareagować na czas i odtworzyć przyłącze do szyn, których torowiska często w ramach remontu zmieniają konstrukcję nawet z typu otwartej na zamkniętą.

## 8.7. Przyłącza pomiarowe względem szyn torów kolejowych

---

Zagadnienie przyłącza pomiarowego względem szyn kolejowych wynika z faktu, że występują zbliżenia i skrzyżowania konstrukcji I i II linii metra do torów kolejowych, które są zelektryfikowane prądem stałym i stanowią źródło prądów błądzących. Projektowane było zelektryfikowanie połączenia pomiarowego pomiędzy tymi torami a konstrukcją w celu określenia stref oddziaływania kolejowego prądu trakcyjnego. Praktycznie w każdym z czterech przypadków występują perturbacje związane z samym przyłączeniem jak i ewentualnym odtworzeniem przyłączenia po przebudowie jaka miała już miejsce na dworcu Warszawa Gdańska w latach 2010-11.

Przyłączenie przewodu pomiarowego względem konstrukcji metra wprowadzało obawy u kolejowych automatyków srk, że w sterowaniu blokowym z wykorzystaniem szyn jako obwodów torowych, po przyłączeniu nastąpi wprowadzenie zakłóceń do systemu sterowania, albo osłabienie roboczego sygnału i błędne funkcjonowanie sterowania. W przypadku linii średnicowej tak się złożyło, że przyłączenie do szyn kolejowych w przypadku I i II linii metra nastąpiło zawsze do toru linii dalekobieżnej po którym pociągi jadą w kierunku z W-wy Wschodniej. Na dworcu Warszawa Gdańska przyłączono przewód do szyn toru boczniczy równoległego do toru przy peronie. Podczas przebudowy Dworca Warszawa Gdańska zlikwidowano tor boczniczy i nie przedłużono przewodu pomiarowego do zewnętrznej szyny toru przy peronie pasażerskim.

## 9. PODSUMOWANIE

---

Prace związane z projektami celowymi [4, 5] finansowanymi z KBN były kontynuowane wraz z rozbudową I linii metra i finansowane w ramach budowy każdego z odcinków. Dzięki zapisom w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury [25] system MPB został zabudowany i uruchomiony na centralnym odcinku II linii metra. Doświadczenia uzyskane w ramach projektów [4, 5] umożliwiły wprowadzenie systemu biernej ochrony podziemnej konstrukcji przed oddziaływaniem prądów błądzących oraz ocenę skuteczności tej ochrony na obu liniach metra w Warszawie w zależności od konfiguracji zwartych i rozwartych poprzecznych dylatacji w ich konstrukcjach. Istotną zmianą jaka nastąpiła w systemie rejestracji było wprowadzenie światłowodów do systemu metra, to zwiększyło zakres RPB do monitorowania prądów błądzących umożliwiając „szybkie” wykrywanie przypadkowych zwarć sieci powrotnej z konstrukcją metra. W systemie RPB przy rejestracji zalecanej nie rzadziej niż dwa razy do roku na każdej z CP zwarcia wykrywano jedynie podczas analizy wyników – danych – uzyskanych w ramach wykonanej rejestracji. Wymagało to od służb eksploatacji dużego doświadczenia nabywanego z każdym rokiem. W początkowym okresie eksploatacji służby metra zostały wyposażone w przenośny komputer typu Portable z zainstalowanymi kartami przetworników co znakomicie ułatwiło przemieszczanie się zespołu pomiarowego pomiędzy poszczególnymi CP.

Dokonywana archiwizacja danych z monitoringu daje podstawę prowadzenia szeregu prac analitycznych wpływu zmian np. rozkładów jazdy Metra, PKP czy Tramwajów Warszawskich związanych z remontami torowisk lub wymianą taboru i innych zjawisk losowych na rozkład potencjałów podziemnej konstrukcji albo odpowiednich

napięć względem tej podziemnej konstrukcji. System MPB mógł wspomóc analizy obciążenia zasilania po wprowadzeniu zmian mających na celu zwiększenie efektywności rekuperacji składów METROPOLIS. W rękach eksploatacji metra zarówno I jak i II linii znajduje się narzędzie służące do sygnalizacji niekorzystnych stanów pracy sieci powrotnej metra oraz oceny zmian i samego zagrożenia korozyjnego konstrukcji w czasie. Dodatkowo MPB jest systemem którego wykorzystanie umożliwia podejmowanie decyzji mających na celu skuteczność ochrony obiektu przed wprowadzanymi zmianami jakim była np. budowa łącznika z centralnym odcinkiem II linii.

Zupełnie oddzielnym zagadnieniem jest w jaki sposób eksploatacja korzysta z dodatkowych możliwości, które stwarza MPB.

Chronologia oddawania do eksploatacji poszczególnych wybudowanych odcinków I i II linii metra w Warszawie [26]:

- data uruchomienia odcinka metra do stacji A11 „Politechnika”: 7 kwietnia 1995 r.
- data uruchomienia odcinka metra do stacji A13 „Centrum”: 26 maja 1998 r.
- data uruchomienia odcinka metra do stacji A15 „Ratusz”: 11 maja 2001r.
- data uruchomienia odcinka metra do stacji A17 „Dw. Gdański”: 20 grudnia 2003 r.
- data uruchomienia odcinka metra do stacji A18 „Pl. Wilsona”: 8 kwietnia 2005 r.
- data uruchomienia odcinka metra do stacji A19 „Marymont”: 29 grudnia 2006 r.
- data uruchomienia odcinka metra do stacji A20 „Słodowiec”: 23 kwietnia 2008 r.
- data uruchomienia odcinka metra do stacji A23 „Młociny”: 25 października 2008 r.
- data uruchomienia centralnego odcinka II linii metra C09-C15: 8 marca 2015 r.

**TABELA 1**

Zestawienie dokumentacji technicznych Instytutu Elektrotechniki autorstwa lub współautorstwa dr inż. Władysława Dziuby związanych tematycznie z warszawskim metrem

Lp.	Tytuł	Nr arch.
1.	Dziuba W.: Badanie rezystancji zbrojenia tuneli oraz rezystancji uziemień w obiektach metra w aspekcie ochrony przed działaniem prądów błędnych oraz ochrony przeciwporażeniowej. Wstępne badania rezystancji zbrojenia tunelu	nr arch.: 45/84
2.	Dziuba W.: Badanie rezystancji zbrojenia tuneli oraz rezystancji uziemień w obiektach metra w aspekcie ochrony przed działaniem prądów błędnych oraz ochrony przeciwporażeniowej	nr arch.: 37/85
3.	Dziuba W.: Badanie rezystancji zbrojenia tuneli oraz rezystancji uziemień w obiektach metra w aspekcie ochrony przed działaniem prądów błędnych oraz ochrony przeciwporażeniowej. Badania rezystancji wzdłużnej i rezystancji przejścia tunelu. Propozycje badań eksploatacyjnych	nr arch.: 57/86
4.	Dziuba W.: Badanie rezystancji zbrojenia tuneli oraz rezystancji uziemień w obiektach metra w aspekcie ochrony przed działaniem prądów błędnych oraz ochrony przeciwporażeniowej. Założenia do badań eksploatacyjnych prądów błędnych i sposobu ich pomiarów	nr arch.: 35/87
5.	Dziuba W.: Badanie rezystancji zbrojenia tuneli oraz rezystancji uziemień w obiektach metra w aspekcie ochrony przed działaniem prądów błędnych oraz ochrony przeciwporażeniowej. Badania rezystancji wzdłużnej i rezystancji przejścia tunelu oraz potencjałów zbrojenia tunelu	nr arch.: 75/87
6.	Dziuba W.: Badanie rezystancji zbrojenia tuneli oraz rezystancji uziemień w obiektach metra w aspekcie ochrony przed działaniem prądów błędnych	nr arch.:

	oraz ochrony przeciwporażeniowej. Ocena przydatności rejestratorów NS 01 oraz W+W500SP do badań prądów błędnych w metrze	74/89
7.	Dziuba W.: Badanie rezystancji zbrojenia tuneli oraz rezystancji uziemień w obiektach metra w aspekcie ochrony przed działaniem prądów błędnych oraz ochrony przeciwporażeniowej. Opracowanie systemu ochrony przed prądami błędymi. Etap VIII Model analogowy trasy metra na odcinku B1-A7	nr arch.: 45/90
8.	Nurek S., Dziuba W.: Badanie rezystancji zbrojenia tuneli oraz rezystancji uziemień w obiektach metra w aspekcie ochrony przed działaniem prądów błędnych oraz ochrony przeciwporażeniowej. Opracowanie wstępnych programów oceny wyników badań prądów błędnych w metrze na mikrokomputer IBM-PC	nr arch.: 47/90
9.	Dziuba W.: Badanie rezystancji zbrojenia tuneli oraz rezystancji uziemień w obiektach metra w aspekcie ochrony przed działaniem prądów błędnych oraz ochrony przeciwporażeniowej. Opracowanie systemu ochrony przed prądami błędymi. Etap VI Badania rezystancji wzdłużnej tunelu i rezystancji przejścia oraz prądów błędnych pochodzenia tramwajowego	nr arch.: 48/90
10.	Nurek S., Dziuba W.: Badanie rezystancji zbrojenia tuneli oraz rezystancji uziemień w obiektach metra w aspekcie ochrony przed działaniem prądów błędnych oraz ochrony przeciwporażeniowej. Wielokanałowy mikroprocesorowy rejestrator wyników prądów błędnych Wymagania i oprogramowanie	nr arch.: 49/90
11.	Dziuba W.: Uwagi do projektu technicznego instalacji dla systemów pomiarowych prądów błędnych i przeciwporażeniowych, wykonanych przez METROPROJEKT	nr arch.:3/91
12.	Dziuba W., Nurek S.: Opracowanie modelu cyfrowego linii metra do badań prądów błędnych Analiza, założenia i wybór najwłaściwszego sposobu obliczeń	nr arch.: 6/91
13.	Dziuba W., Nurek S.: Opracowanie systemu ochrony metra przed prądami błędymi. Badanie oddziaływania zewnętrznych prądów błędnych na tunele metra na odcinku B1 – B7	nr arch.: 21/91
14.	Dziuba W.: Instrukcja ochrony obiektów metra przed działaniem prądów błędnych	nr arch.: 5/92
15.	Dziuba W.: Opracowanie systemu ochrony metra przed prądami błędymi. Badania prądów błędnych odgałęzionych przy próbnym pociągu	nr arch.: 9/92
16.	Dziuba W., Nurek S.: Opracowanie systemu ochrony metra przed prądami błędymi. Zadanie 6: Uruchomienie i sprawdzenie działania systemu zdalnego monitorowania prądów błędnych na odcinku B1-A6 po wprowadzeniu próbnego ruchu pociągów, wykonanie badań i ocena wyników	nr arch.: 8/93
17.	Dziuba W., Dąbrowski J.: Komputerowy system zdalnych pomiarów prądów błędnych w tunelach metra na odcinku od Kabat do Politechniki. Zad. 3. Rejestracja obcych prądów błędnych we wszystkich centralach pomiarowych przy braku pociągów metra	nr arch.: 1/95
18.	Dziuba W., Dąbrowski J.: Komputerowy system zdalnych pomiarów prądów błędnych w tunelach metra na odcinku od Kabat do Politechniki. Zad. 2 Sprawdzenie niektórych obwodów pomiarowych w centralach CP3 i CP5 i uruchomienie central CP7, CP9 i CP11 oraz urządzeń ciągłej kontroli napięć rażenia na stacjach A7 do A11	nr arch.: 2/95

19.	Dziuba W., Dąbrowski J.: Komputerowy system zdalnych pomiarów prądów błędnych w tunelach metra na odcinku od Kabat do Politechniki. Zad. 1. Rozbudowa cyfrowego modelu metra o odcinki B7-A11, wykonanie obliczeń symulacyjnych dla ruchu pociągów wg planowego rozkładu jazdy	nr arch.: 3/95
20.	Dziuba W., Dąbrowski J.: Komputerowy system zdalnych pomiarów prądów błędnych w tunelach metra na odcinku od Kabat do Politechniki. Zad. 4 Rejestracja prądów błędnych we wszystkich centralach pomiarowych przy docelowym ruchu pociągów metra	nr arch.: 4/95
21.	Dziuba W., Dąbrowski J.: Komputerowy system zdalnych pomiarów prądów błędnych w tunelach metra na odcinku od Kabat do Politechniki. Zad. 5. Ustalenie wartości granicznych rejestrowanych wielkości. Opracowanie i wdrożenie instrukcji wykonywania niezbędnych pomiarów przez służby eksploatacyjne metra	nr arch.: 5/95
22.	Dziuba W., Dąbrowski J.: Komputerowy system zdalnych pomiarów prądów błędnych w tunelach metra na odcinku od Kabat do Politechniki. Zad. 6. Ocena zagrożenia korozyjnego tuneli metra	nr arch.: 7/95
23.	Dziuba W., Dąbrowski J.: Badanie korozyjnego zagrożenia rurociągów w pobliżu torów metra w Kabatach wskutek oddziaływania prądów błędnych. Wskazanie ewentualnych środków zaradczych. Instrukcja wykonywania badań eksploatacyjnych	nr arch.: 18/95
24.	Dziuba W., Dąbrowski J.: Uruchomienie centrali pomiarowych CP 11 i CP13 oraz badania oddziaływania obcych prądów błędnych na tunele B12 i A13 metra	nr arch.: 19/98
25.	Dziuba W., Dąbrowski J.: Instrukcja ochrony obiektów metra przed działaniem prądów błędnych w fazie projektowania, budowy i eksploatacji	nr arch.: 6/2000
26.	Dziuba W., Dąbrowski: Badania oddziaływania prądów błędnych na tunele metra na odcinku A11-A13 podczas rozkładowego ruchu pociągów metra	nr arch.: 7/2000
27.	Dziuba W., Dąbrowski: Analiza celowości izolowania torów metra na powierzchni ziemi od torów w tunelach	nr arch.: 80/2000
28.	Zamojski J., Dziuba W.: Koreferat do pracy Politechniki Warszawskiej pt.: Analiza efektywności technicznej hamowania rekuperacyjnego wagonów METROPOLIS serii TC/M w aspekcie możliwości obecnego systemu zasilania w Metrze Warszawskim	nr arch.: 9/2001
29.	Dziuba W., Dąbrowski: Pomiary parametrów układu i weryfikacja pracy monitoringu prądów błędnych oraz badanie ich oddziaływania na tunele metra od B14 do A15	nr arch.: 29/2001
30.	Dziuba W., Dąbrowski J.: Pomiary prądów błędnych wprowadzanych do tuneli metra za pośrednictwem żył kabli powrotnych i kabli energetycznych stacji 110/15 kV RPZ „Pałac”	nr arch.: 74/2001
31.	Dąbrowski J., Dziuba W., Mrówka M., Suwart C: Opracowanie nowej wersji urządzeń ciągłej kontroli napięć rażenia (UCKNR) spełniających wymagania norm PN-EN 50122 cz. 1 i cz. 2	nr arch.: 10/2002
32.	Dziuba W., Dąbrowski J.: Analiza występowania przypadkowych zwarcí między siecią powrotną i tunelami w Metrze Warszawskim plus Załącznik 1	nr arch.: 17/2002 i 17a/2002

33.	Dziuba W., Dąbrowski J.: Pomiary parametrów układu i weryfikacja działania monitoringu prądów błędnych oraz badanie oddziaływania prądów błędnych na tunele metra na odcinku od tuneli B16 do stacji A17	nr arch.: 31/2003
34.	Dziuba W., Dąbrowski J.: Ustalenie przyczyn korozji i opracowanie zasad wykonania ochrony przeciw korozyjnej pomp w przepompowni tranzytowej na stacji A2 metra	nr arch.: 42/2003
35.	Dziuba W., Dąbrowski J., Kupniewski P.: Badanie oddziaływania prądów błędnych na tunele metra pomiędzy B16 i A17 podczas rozkładowego ruchu pociągów metra (załącznik 1)	nr arch.: 9/2004
36.	Dąbrowski J., Dziuba W.: Pomiary parametrów układu i weryfikacja monitoringu prądów błędnych oraz badanie ich oddziaływania na tunele metra od B18 do A18 Etap I	nr arch.: 2/2005
37.	Dąbrowski J., Dziuba W., Szyszko R.: Pomiary prądów błędnych wprowadzanych do tuneli metra za pośrednictwem żył powrotnych kabli elektroenergetycznych stacji 110/15 kV RPZ „Pałac”	nr arch.: 8/2005
38.	Dąbrowski J., Dziuba W.: Pomiary parametrów układu i weryfikacja monitoringu prądów błędnych oraz badanie ich oddziaływania na tunele metra od B18 do A18 Etap II	nr arch.: 13/2005
39.	Dziuba W., Dąbrowski J.: Ustalenie kryteriów sygnalizacji przypadkowych zwarć między „ziemią szyn” (ZS) i „ziemią tunelu” (ZT) w metrze warszawskim po zmianach w układzie zasilania, związanych z hamowaniem	nr arch.: 14/2005
40.	Dąbrowski J., Dziuba W.: Pomiary parametrów i weryfikacja pracy monitoringu prądów błędnych oraz badanie ich oddziaływań na tunele metra od B19 do A19 Etap I	nr arch.: 12/2006
41.	Dąbrowski J., Dziuba W., Szyszko R.: Analiza przyczyn występowania nadmiernych napięć ST między szynami i tunelami metra	nr arch.: 59/2006
42.	Dąbrowski J., Szyszko R.: Pomiary parametrów i weryfikacja pracy monitoringu prądów błędnych oraz badanie ich oddziaływań na tunele metra od B19 do A19 Etap II	nr arch.: 2/2007
43.	Dąbrowski J., Dziuba W.: System 2 lub 3 ziem odniesienia w Metrze Warszawskim – ocena porównawcza	nr arch.: 58/2007
44.	Dąbrowski J., Dziuba W., Szyszko R.: Pomiary parametrów układu i weryfikacja monitoringu prądów błędnych na odcinku A19 – B20 – A20 oraz wykonanie pomiarów zagrożenia korozyjnego tuneli na tym odcinku Etap I	nr arch.: 1/2008
45.	Dąbrowski J., Dziuba W., Szyszko R.: Pomiary parametrów układu i weryfikacja monitoringu prądów błędnych na odcinku A19 – B20 – A20 oraz wykonanie pomiarów zagrożenia korozyjnego tuneli na tym odcinku Etap II Oddziaływanie prądów obcych źródeł na tunele metra	nr arch.: 2/2008
46.	Dąbrowski J., Dziuba W., Szyszko R.: Pomiary parametrów układu i weryfikacja monitoringu prądów błędnych na odcinku A19 – B20 – A20 oraz wykonanie pomiarów zagrożenia korozyjnego tuneli na tym odcinku Etap III Ocena zagrożeń konstrukcji tuneli i stacji przez prądy błędne podczas eksploatacji metra, ustalenie kryteriów sygnalizacji przypadkowych zwarć	nr arch.: 9/2008



**Podziękowania**

Na zakończenie autor pragnie podziękować współpracownikom zakładu NTE i pracownikom Metra Warszawskiego z którymi realizował badania na STP Kabaty i uruchamianie poszczególnych odcinków od A01 do A23, a także od C09 do C15 oraz pracownikom firm: AGAT, Elektrobudowa, Elektromontaż, MEGA, Metroprojekt, Kontron, Rail-Mil, dzięki którym system MPB powstał w 2000 roku i był rozbudowywany na I linii oraz zmodyfikowany na centralnym odcinku II linii metra w Warszawie. Dzięki udostępnieniu sprzętu komputerowego przez kolegów z Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej udało się zarchiwizować dane od grudnia 1999 r.

Artykuł poświęcam pamięci dr inż. Władysława Dziuby, prof. IEL, ur. 1929, zm. 2015 r., pracownikowi Zakładu Trakcji Elektrycznej w latach 1952 – 2007.

**LITERATURA**

1. Dziuba W.: Model analogowy trasy metra na odcinku B1-A7. Dok. IEL, nr arch.: 45/90.
2. Dziuba W., Nurek S.: Badania symulacyjne prądów błędnych w metrze. Międzynarodowa Konferencja Naukowa Badania modelowe i symulacyjne w Trakcji Elektrycznej, Tom 1, s. 83-98, Warszawa, 18-20 listopada, 1993 r.
3. Sokółski W., Sokółski P.: Inteligentnie sterowany drenaż elektryczny. Materiały Konferencyjne, XII Krajowa Konferencja Pomiary Korozyjne w Ochronie Elektrochemicznej, s. 155 – 166, Ostróda, 2012 r.
4. Projekt Celowy nr 8 8205.91/C 181. Opracowanie systemu ochrony metra przed prądami błędymi.
5. Projekt Celowy nr 8 8262.94/C1954. Komputerowy system zdalnych pomiarów prądów błędnych w tunelach metra na odcinku od Kabat do Politechniki.
6. Dąbrowski J.: Rozwój techniki zautomatyzowanego pomiaru prądów błędnych w warszawskim metrze. Materiały Konferencyjne, VI Konferencja Naukowo – Techniczna Zkwe'2001 Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice, Tom 1, s 335-338, Poznań/Kiekrz, 23-25 kwietnia, 2001 r.
7. Dziuba W., Hanasz M.: Mikroprocesorowy 16-kanałowy rejestrator R16A do badania prądów błędnych. Materiały Konferencyjne, III Krajowa Konferencja Pomiary Korozyjne w Ochronie Elektrochemicznej, 1991 r.
8. Dziuba W., Dąbrowski J.: System rejestracji prądów błędnych w tunelach warszawskiego metra. Materiały Konferencyjne, IV Krajowa Konferencja Pomiary Korozyjne w Ochronie Elektrochemicznej, s. 33-40, Jurata, 1996 r.
9. Dąbrowski J.: Uruchomienie bielańskiego odcinka I linii metra warszawskiego i zmiany potencjału tej podziemnej konstrukcji. TTS, nr 7-8, s. 33-41, 2010 r.
10. Dąbrowski J., Jasiński S., Magdalińska A.: System monitorowania prądów błędnych warszawskiego metra sprzęt i oprogramowanie. Materiały Konferencyjne, VI Krajowa Konferencja Pomiary Korozyjne w Ochronie Elektrochemicznej, s. 195 – 202, Jurata, 2000 r.
11. Dąbrowski J., Jasiński S., Kochan A., Magdalińska A.: Monitorowanie prądów błędnych w tunelach warszawskiego metra. MWK'2001 V Szkoła-Konferencja Metrologia Wspomagana Komputerowo, Tom 3, Granty i projekty celowe referaty, s. 149-156, Rynia k/Warszawy, 21-24 maja, 2001 r.

12. Dąbrowski J., Jasiński S., Kochan A., Magdalińska A.: The stray current comute destrubited real-time monitoring system in the Warsaw Metro tunnels – hardware and software. RTS – Railway traction systems conference Capri, Italy, 15-17 may, 2001.
13. Dąbrowski J., Dziuba W.: Kontrola prądów błędzących w tunelach warszawskiego metra. MET 2003 Nowoczesna Trakcja Elektryczna w Zintegrowanej Europie XXI w., Pułtusk, 2003 r.
14. Dąbrowski j., Dziuba W.: Wykrywanie przypadkowych zwarć pomiędzy szynami a tunelem w metrze warszawskim. V Międzynarodowa Konferencja Nowoczesny Elektryczny Transport Regionalny i Miejski MET'2001, s. 24-1-24-8, 2001 r.
15. Dąbrowski J.: Ocena skuteczności diagnozowania zwarć pomiędzy siecią powrotną a tunelem metra za pomocą systemu monitoringu prądów błędzących. V Krajowa Konferencja Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów Diag03, Ustroń, s. 317, 13-17.10.2003 r.
16. Dąbrowski J.: Systemy ochrony przed prądami błędzącymi i ich monitoringu oraz ochrona przeciwporażeniowa na II linii metra. Referat wygłoszony na konferencji INFRASZYN'2017, Zakopane, 26-28.04.2017 r.; publikacja w miesięczniku Przegląd Komunikacyjny, nr 6, s. 28-36, 2017 r.
17. Altmann M., i in.: Streustromueberwachung bei der U-Bahn Nuernberg Elektrische Bahnen. Vol. 102, H5, s. 223-230, 2004 r.
18. IEC 62128-2:2013 Railway applications – Fixed instalations – Electrical safety, earthing and the return circuit – Part 2 Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems.
19. PN-EN 50122-2:2002 – Zastosowanie kolejowe. Urządzenia stacjonarne. Część 2: Środki ochrony przed oddziaływaniem prądów błędzących wywołanych przez trakcję elektryczną prądu stałego.
20. Dąbrowski J., Dziuba W., Magdalińska A.: Zagrożenia korozyjne tuneli Metra Warszawskiego, ich kontrola i środki ochrony. Prezentacja na Konferencji Instytutu Mechaniki Precyzyjnej „Ochrona przed Korozją w mieście stołecznym Warszawa”, 2001 r.
21. Kalembe J.: Prądy błędzące – system ochrony i monitoringu rozwiązania stosowane w metrze i próba ich przeniesienia do kolei, Przegląd Komunikacyjny, nr 1, s. 16-20, 2014 r.
22. Dziuba W.: Sieć powrotna i prądy błędzące. Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa, 1995 r.
23. Dąbrowski J., Dziuba W.: Wpływ kabli RPZ „Pałac” na prądy błędzące w tunelach metra warszawskiego. X Jubileuszowa Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i II Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie SEMTRAK, s. 427-436, 2002 r.
24. Ber P., Dąbrowski J., Magdalińska A.: Analiza rzeczywistego obciążenia systemu elektroenergetycznego warszawskiego metra. V Międzynarodowa Konferencja Nowoczesny Elektryczny Transport Regionalny i Miejski MET'2001, s. 50-1-50-7, 2001 r.
25. Dziennik Ustaw nr 144 z 2011 poz. 859 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane metra i ich usytuowanie.
26. <http://www.metro.waw.pl/dane-techniczne-i-eksploatacyjne-istniejacego-odcinka-metra> stan z dn.22.05.2017.

## EVOLUTION OF WARSAW METRO STRAY CURRENT MONITORING SYSTEMS

Józef DĄBROWSKI

**ABSTRACT** *In this article an overview of works related to DC electric traction as well as stray current protection systems were described. Differences between first and second metro lines were shown. An overview of stray current monitoring system structure was shown, step-by-step upgrades from registration to monitoring system on the entire line were described. Evaluation criteria of the connection arrangement in the protection system was shown. Expansion of the metro system was accompanied by the mentioned modernizations of the stray current monitoring system, data acquisition and storage was upgraded. Signaling system of undesirable states in the return circuit captured by the monitoring system was described. The article describes modifications of the system on both metro lines and its adaptations to the changing conditions.*

**Keywords:** *stray current, metro stray current monitoring systems*

**Mgr inż. Józef DĄBROWSKI** w 1981 r. ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej o specjalności maszyny elektryczne. Pracownik IEL od 1981 r. w Zakładzie Maszyn Elektrycznych, a od 1983 r. w Zakładzie Trakcji Elektrycznej. Tematyką prądów błędnych zajmuje się od 1990 r.



