

Obliczenia metodami analitycznymi parametrów sieci zasilającej i powrotnej układu zasilania trakcji tramwajowej (1)

Obwód główny systemu zasilania prądu stałego szynowej trakcji elektrycznej obejmuje prostownikową podstawę trakcyjną wraz z zasilaniem elektroenergetycznym, rozdzielniami AC (średniego napięcia) i DC (napięcia dostarczanego do sieci trakcyjnej), przekształtnikami energii, kablami zasilającymi i powrotnymi oraz siecią trakcyjną i szynową.

W większości miejskich tramwajowych przedsiębiorstw komunikacyjnych w Polsce występuje dodatnia biegunowość sieci jezdnej (+), a ujemna sieci szynowej (-). Dla takiej polaryzacji sieć jezdna stanowi obwód zasilający, a sieć szynowa obwód powrotny. Sieć jezdna łącznie z siecią szynową określa się mianem sieci trakcyjnej. Zachodzi ścisły związek między wielkością obszaru (rejonu) zasilania wyrażonego w kilometrach bieżących długości sieci trakcyjnej, jej przekrojem elektrycznym oraz długościami i przekrojami kabli zasilających i powrotnych, intensywnością ruchu pociągów tramwajowych a możliwymi do wykorzystania mocami znamionowymi napędów tych pojazdów, ich zdolnościami przewozowymi i mocami zainstalowanymi w przyłączach i przekształtnikach podstawy trakcyjnych. Łącznie wszystkie wymienione elementy stanowią system miejskiej zelektryfikowanej trakcji tramwajowej, a skorelowanie ich parametrów elektrycznych, energetycznych, transportowych, mechanicznych i niezawodnościowych stanowi o właściwościach eksploatacyjnych systemu.

Kompleksowa analiza systemu jest zagadnieniem bardzo złożonym i w badaniach praktycznych o charakterze aplikacyjnym wykorzystywana jest możliwość dekompozycji całości do wydzielonych podsystemów, z określeniem wzajemnych sprzężeń (więzi) między podsystemami. Jednym z podsystemów, który można wydzielić jest system zasilania elektroenergetycznego. Sprzężeniami międzyelementowymi dla podsystemu zasilania są:

- charakterystyka potoków ruchu i intensywność przewozów,
- typy eksploatowanego taboru (masa, pojemność, prędkość maksymalna),

- charakterystyka tras (profile, łuki, przystanki, skrzyżowania kolizyjne),
- układ urbanistyczny obszaru objętego zasięgiem trakcji tramwajowej,
- konfiguracja publicznej sieci elektroenergetycznej,
- charakterystyka intensywności ruchu kołowego na trasach tramwajowych,
- zakładana eksploatacyjna prędkość jazdy pociągów tramwajowych.

Analizę systemu zasilania przeprowadza się w przypadkach:

- projektowania nowych linii,
- odnowy lub rehabilitacji istniejących systemów ze względu na ich wyeksploatowanie,
- modernizacji linii istniejących w przypadku wzrostu przewozów, wymiany taboru na tabor o innych parametrach (większe moce zainstalowane lub ostrzejsze wymagania co do poziomu napięcia w sieci trakcyjnej),
- konieczności określenia granicznej zdolności przepustowej systemu zasilania dla zmiennej (rosnącej) intensywności ruchu lub zwiększonych mocy.

Współczesne układy zasilania miejskiej trakcji tramwajowej w Polsce stanowią stadium rozwojowe z początków tramwaju elektrycznego w Europie na przełomie XIX i XX w. Dominują zcentralizowane układy zasilania zapoczątkowane w okresie, kiedy przedsiębiorstwo tramwajowe było właścicielem własnej elektrowni. Struktura z centralnie zlokalizowanym źródłem zasilania została w praktyce utrzymana do dzisiaj, z tym, że w miarę rozprzestrzeniania się miast (aglomeracji) powielano ją wielokrotnie budując wraz z rozwojem sieci przesyłowych energetyki zawodowej w miejsce własnych elektrowni, zasilane z publicznej sieci elektroenergetycznej przekształtnikowe podstawy trakcyjne. Każda z tych podstawy trakcyjnych zasila przypisany jej obszar sąsiadując z innymi podstawcami położonymi „centralnie” na własnym obszarze zasilania. Obszary stanowią autonomiczne części systemu nie współpracujące ze sobą nawzajem. Dzieje się tak za sprawą tradycyjnie przyjętego w trakcji tramwajowej jednostronnego systemu zasilania. Bardziej nowoczesny i mający wiele zalet w stosunku do systemu zcentralizowanego jest system „liniowy”, wdrożony w wielu krajach rozwiniętych, w którym odcinki zasilane są dwustronnie, dotychczas się w Polsce nie przyjęły [17, 20, 25].

Kryteria wymiarowania parametrów obwodów zasilających i powrotnych trakcji tramwajowej

Podstawowym zadaniem układu zasilania jest dostarczenie energii o wymaganych parametrach do pojazdów znajdujących się w obszarze zasilania, a także w przypadku eksploataowania taboru trakcyjnego z hamowaniem rekuperacyjnym, zapewnienie możliwości przesyłu energii rekuperacji między pojazdami.

Prawidłowo zaprojektowany układ spełnia wymagania efektywnego zasilania pojazdów w zakresie:

- utrzymania niezależnie od pobieranej mocy (w przedziale mocy roboczych) minimalnego napięcia na pantografie:
 - chwilowego: $U_p(t_i) \geq U_{\min}$;

– średniego: $U_{p\dot{s}r}(t_i) \geq U_{\min}$;

- utrzymywanie niezależnie od pobieranej lub oddawanej (rekuperacja) mocy roboczej dopuszczalnego maksymalnego napięcia na pantografie:

– chwilowego: $U_p(t_i) \leq U_{\max}$;

– średniego: $U_{p\dot{s}r}(t_i) \leq U_{\dot{s}r\max}$;

łącznie z przepięciami komutacyjnymi. Wielkości napięć i przepięć dopuszczalnych zestawione są w normie EN 50163.

Ograniczeniu podlegają następujące parametry energetyczne:

- wzdłużne spadki napięć, chwilowe i średnie szczytowe w obwodzie sieci jezdnej oraz chwilowe, średnie szczytowe i średnie roczne w obwodzie sieci szynowej (norma PN-92 E-05024).

- napięcia (potencjały) szynowej sieci powrotnej i elementów uszynionych w stosunku do otaczającej ziemi i uziemionych części (ze względu na warunki bezpieczeństwa).

Parametry te zależą od wartości prądów średnich i maksymalnych w obwodzie i od rezystancji obwodów.

W celu wyznaczenia przekrojów elektrycznych torów prądowych obwodu głównego układu zasilania niezbędna jest znajomość następujących parametrów prądów obciążeń:

- maksymalne szczytowe prądy zastępcze (średniokwadratowe) ze względu na nagrzewanie oraz straty energii i sprawność,
- maksymalne chwilowe prądy robocze ze względu na dobór nastaw wyłączników szybkich i określenie maksymalnych dopuszczalnych rezystancji obwodu (przekroje przewodów i długości odcinków zasilania) dla przepływu dopuszczalnych minimalnych prądów zwarcia:

$$I_{zwm\dot{n}} \geq I_{obc\dot{m}ac} + \Delta I \quad (1)$$

gdzie:

- ΔI – margines bezpieczeństwa między wartościami prądu zwarcia (minimalnego) i obciążenia (maksymalnego) uwzględniający fluktuację napięć zasilających [16], sezonowe zmiany rezystancji (w tym rezystancji szyn-ziemia), stabilność nastaw wyłączników szybkich oraz rozkład wartości chwilowych prądów obciążenia w funkcji liczności ich występowania (obszar prądów o dużych wartościach).

Moc zainstalowana znamionowa P_{Ninst} w podstacjach trakcyjnych powinna spełniać warunek:

$$P_{Ninst} k_p + P_R \geq \left\{ \sum_{k=1}^n P_k \right\} \max \quad (2)$$

gdzie:

k_p – współczynnik przeciążalności szczytowej urządzeń układu zasilania,

P_R – zainstalowana moc stanowiąca rezerwę,

P_k – moc pobierana przez pojazd w okresie szczytu ruchowego.

Długości odcinków zasilania sieci jezdnej, położenie punktów rozprywu prądów i punktów powrotnych w sieci szynowej oraz długości kabli zasilających i powrotnych powin-

ny spełniać wymagania dotyczące maksymalnych spadków napięć:

$$\Delta U_{dop} \geq I \cdot r \cdot L \quad (3)$$

gdzie:

I – wartość prądu (odpowiednio chwilowa lub średnia za dany okres),

r – rezystancja jednostkowa toru prądowego [Ω/km],

L – długość toru prądowego (odcinka) [km].

Maksymalne długości odcinków kabli i sieci trakcyjnej są ograniczone przez ich przekroje oraz wartości przesyłanych prądów. Liczba zasilanych z jednej podstacji odcinków ograniczona jest mocą zainstalowanych przekształtników oraz zdolnością przesyłu mocy przez linie elektroenergetyczne SN. Trakcja tramwajowa zasilana jest w Polsce napięciami: 6, 10, 15 i 20 kV. Wymagane moce zwarciovne na szynach zbiorczych AC podstacji trakcyjnych nie powinny być niższe niż 100 MVA [25].

Podstawowymi danymi niezbędnymi do obliczeń i analiz układu zasilania trakcji tramwajowej są:

- geometryczna konfiguracja tras tramwajowych, lokalizacja przystanków,
- parametry trakcyjno-ruchowe taboru (charakterystyki trakcyjne),
- wartości jednostkowego zużycia energii poszczególnych typów tramwajów,
- dane o natężeniu ruchu w przekroju doby oraz roku,
- parametry dostępnych zespołów prostownikowych: typy, napięcia znamionowe, moce, przeciążalności,
- warunki zasilania z sieci elektroenergetycznej (napięcia, moce zwarciovne, długości i typy linii).

Wymiarowanie urządzeń zasilania elektrycznej trakcji tramwajowej stanowi część procesu projektowania nowego systemu transportu zelektryfikowanego lub modernizacji systemu dla przewidywanej zmiany warunków ruchowych (nowy tabor, prędkości, częstotliwość ruchu). Celem jest dostosowanie parametrów układu zasilania do możliwości wykonania zadania przewozowego, aż do określenia granicznej zdolności efektywnego zasilania systemu zelektryfikowanego transportu miejskiego, przy maksymalnej granicznej wielkości ruchu pasażerskiego, prędkości komunikacyjnej oraz zagęszczonej lokalizacji przystanków. Poszukuje się wariantów dających racjonalne, z punktu widzenia technicznego i ekonomicznego, rozwiązanie układu zasilania: liczby i typów zespołów prostownikowych w podstacji trakcyjnej, liczby zasilaczy, konfiguracji sieci zasilającej (długości i przekroje kabli, lokalizacja punktów zasilania sieci trakcyjnej, sekcjonowanie) oraz rozwiązania struktury sieci powrotnej (długości i lokalizacja punktów powrotnych). Obszar, na którym operuje system komunikacji tramwajowej, podzielony jest na rejonny zasilania. Rozległość rejonów zasilania określa się według kryterium minimalnych kosztów inwestycyjnych i możliwości dostarczenia do pojazdu odpowiedniej energii oraz mocy (poziom napięcia na pantografie, niezawodność).

Podobnie dobiera się długości sekcji (odcinków) zasilania. Długość sekcji jest w ścisłej korelacji z wartościami

maksymalnego spadku napięcia w kablach zasilaczy i w sieci, maksymalnego prądu roboczego oraz minimalnego prądu zwarcia.

W przypadku zbyt rozległych rejonów zasilania, np. gdy podstacja zasilająca kilka nie stykających się ze sobą odcinków sekcyjnych, oprócz dużych spadków napięć w sieci jezdnej mogą być przekroczone dopuszczalne spadki napięć w sieci szynowej, co jest przyczyną nadmiernego upływu prądu z szyn do ziemi (prądy błędzące).

Obliczenia parametrów układu zasilania opierają się na dwóch zasadniczych metodach, w zależności od przyjętego sposobu opisu obciążeń trakcyjnych [1, 12, 16, 17, 19]:

- metoda zakładająca skupiony charakter obciążeń układu zasilania (dogodna do obliczeń odcinków o małej częstotliwości ruchu; dla różnych typów taboru znacznie różniących się między sobą parametrami trakcyjnymi);
- metoda zakładająca równomierność obciążeń na poszczególnych odcinkach zasilania (zwłaszcza w przypadku ruchu równomiernego o dużej częstotliwości kursowania, prowadzonego pojazdami o zbliżonych parametrach).

Pod względem funkcjonalnym metody obliczeń można podzielić na trzy grupy:

- 1) metody klasyczne, wykorzystujące często zależności empiryczne, dostosowane do określonych warunków ruchowych [8, 15, 19],
- 2) obliczenia komputerowe bazujące na metodzie potencjałów węzłowych lub prądów oczkowych [13],
- 3) symulacyjne obliczenia komputerowe – programy komputerowe wykorzystujące model systemu transportowego skojarzony z układem zasilania, w sposób dość wierny odzwierciedlający rzeczywiste warunki ruchu i zasilania [5, 6, 12].

Trzeci z wymienionych sposobów obliczeń znacznie różni się od pozostałych i sprowadza się do badań symulacyjnych na modelu cyfrowym układu komunikacyjnego zorientowanym na jego parametry energetyczne.

- Celem obliczeń jest wyznaczenie podanych parametrów:
- spadki napięć w sieci zasilającej (kable zasilaczy i sieć jezdna) i powrotnej (szyny i kable powrotne) dla warunków szczytowego ruchu i obciążeń średnich rocznych;
 - obciążenia kabli zasilających i powrotnych oraz podstacji (zastępcze, maksymalne, chwilowych) w warunkach szczytowego ruchu;
 - minimalne prądy zwarcia, maksymalne prądy obciążenia zasilaczy.

Uzyskane wyniki:

- prądów średnich rocznych umożliwiają określenie spadków napięć w sieci szynowej oraz potencjałów punktów powrotnych,
- prądów średnich ruchu szczytowego pozwalają na określenie spadków napięć w sieci trakcyjnej i kablach,
- prądów zastępczych ruchu szczytowego pozwalają ocenić obciążenia sieci i kabli,
- prądów maksymalnych chwilowych zasilaczy i minimalnych prądów zwarcia umożliwiają ocenę warunków pracy wyłączników szybkich (nastawy, wyłączalność prądów zwarcia dalekich, niewyłączenie prądów roboczych),

– prądy średnie szczytowe podstacji umożliwiają określenie wymaganej mocy ciągłej zespołów prostownikowych zainstalowanych w podstacji,

– prądy zastępcze obciążenia podstacji pozwalają na dobór aparatury i przekrojów torów prądowych,

– prądy maksymalne chwilowe podstacji umożliwiają ocenę przeciążalności zespołów prostownikowych.

Obliczanie sieci górnej (jezdnej i kabli zasilających), ze względu na jednoznacznie określone obszary zasilania i zwykle niezbyt złożoną konfigurację dzielnic jest dość proste. Z kolei analiza parametrów elektrycznych sieci powrotnej (szyn jezdnych i kabli powrotnych), ze względu na brak sekcjonowania jest zagadnieniem bardziej złożonym.

Obecnie obowiązująca norma PN-92 E-05024 *Ochrona przed korozją. Ograniczanie upływu prądów błędzących z trakcyjnych sieci powrotnych prądu stałego w odniesieniu do linii tramwajowych* nakłada następujące wymagania:

- rozmieszczenie punktów powrotnych powinno być wykonane na podstawie obliczenia średniego rocznego spadku napięcia w szynach przy następujących założeniach:
 - brak upływu prądu z szyn do ziemi;
 - równomierny rozkład obciążenia odcinków sieci;
 - rezystancja szyn zwiększona o 15%, uwzględniająca ich średnie zużycie;
- średni roczny spadek napięcia w szynach obliczany przy powyższych założeniach na drodze od punktów powrotnych do punktów rozpląwu lub do krańców sieci szynowej nie powinien przekraczać wartości zestawionych w tabelicy 1.

Tablica 1

Dopuszczalny średnioroczny spadek napięcia w szynach według normy PN-92/E-05024

Konstrukcja toru	Średnioroczny spadek napięcia w szynach [V]
Tor w jezdni lub na torowisku wydzielonym, lecz w bardzo złym stanie – szyny zakryte po główkę asfaltem lub ziemią, podłoże z betonu lub piasku	1,0
Tor w jezdni lub na torowisku wydzielonym – na podkładach drewnianych lub betonowych na tłuczniu	2,5
Tor na rozgałęzionym odcinku wybiegowym – torowisko wydzielone, na podkładach drewnianych na tłuczniu	10,0

Średni maksymalny (roczny) spadek napięcia na odcinku sieci szynowej wynosi:

$$\Delta U_{\max \text{ srr}} = \Delta i_{\text{ srr}} r_s \leq \Delta U_{\text{ dop srr}} \quad (4)$$

gdzie:

- $\Delta i_{\text{ sr}}$ – średni roczny okład prądowy [A/km],
- r_s – rezystancja jednostkowa sieci szynowej [Ω/km],
- $\Delta U_{\text{ dop}}$ – dopuszczalny średnioroczny spadek napięcia w szynach (tabl. 1).

Problemy związane z wpływem prądów błędnych w systemach szynowego transportu miejskiego i środki zaradcze

Zagadnienie przepływu prądów ziemnopowrotnych w obwodzie zasilania trakcji elektrycznej w obwodzie zasilania trakcji elektrycznej ma bogatą literaturę [1, 2, 9, 11, 13, 16, 17, 21, 22], dotyczącą nie tylko tramwajów.

W zelektryfikowanych systemach transportu miejskiego zasilanego z sieci prądu stałego na skutek niskiej wartości rezystancji przejścia szyny–podtorze ziemia stanowi znaczący element obwodu dla przepływu powrotnych prądów trakcyjnych (tzw. prądy upływu lub prądy błędne). Prąd w ziemi przenika do metalowych konstrukcji podziemnych, które stanowią elektrody, przy wilgotnej ziemi tworzącej elektrolit. Punkty wpływu do struktur podziemnych stanowią strefę katodową, a punkty wypływu z danej konstrukcji podziemnej (do innej konstrukcji podziemnej lub z powrotem do szyn jezdnych) – strefę anodową. Prądy błędne wypływające z konstrukcji metalowych w strefach anodowych stanowią zagrożenie korozyjne dla tych konstrukcji.

Problem prądów błędnych znany jest od początków istnienia trakcji elektrycznej. W systemach transportu tramwajowego wprowadzono wiele modyfikacji strukturalnych w celu zmniejszenia korozji elektrolitycznej w otaczającym linie tramwajowe środowisku. Przy uruchamianiu linii prowadzonych w zbrojonych tunelach i wiaduktach okazało się, że problem prądów błędnych stanowi zagrożenie funkcjonowania tych systemów. Prowadzone prace badawcze i wdrożeniowe miały na celu zmniejszenie upływu prądów błędnych u ich źródła, ochronę konstrukcji oraz zmniejszenie szkodliwego oddziaływania na środowisko. W praktyce proponowane środki zaradcze sprowadzają się do następujących działań:

- utrzymywania wysokiej wartości izolacji szyny–ziemia do takiego poziomu, jaki jest możliwy ze względu na dopuszczalne napięcie szyna–ziemia (ze względów bezpieczeństwa),
- wprowadzenia efektywnej strategii uziemiania i uszyniania,
- łączenia szyn równolegle, stosowania łączników podłużnych, utrzymywania ciągłości szyn,
- instalowania ochrony od prądów błędnych (tam gdzie jest to niezbędne),
- doboru szyn o odpowiednich parametrach elektrycznych, aby stanowiły obwód o małej rezystancji dla trakcyjnych prądów powrotnych,
- utrzymywania małych odległości międzypodstacyjnych,
- stosowania zasilania dwustronnego,
- izolowania konstrukcji metalowych od szyn, w szczególności stosowania systemu ochrony od penetracji otoczenia torowiska przez prądy błędne poprzez stosowanie systemu sztucznego toru upływu prądów, tak aby wpływał on wyznaczoną drogą specjalnych konstrukcji ochronnych,
- zapewnienia efektywnego systemu odwodnienia wody z torowiska.

Izolacja szyny–ziemia

Jest to pierwszy i podstawowy element strategii ograniczenia upływu prądów błędnych u źródła ich powstawania – poprzez utrzymywanie odpowiednio wysokiej wartości izolacji szyn od ziemi, z uwzględnieniem spadków napięć w szynach w dopuszczalnych przedziałach. Typową metodą utrzymywania dobrej izolacji jest uzyskanie dużej rezystancji między szynami a podkładami lub podtorzem. Dostępne obecnie w świecie elementy mocowania szyn pozwalają na stosowanie podwójnej izolacji: między szyną i elementem mocującym oraz między elementem mocującym a podkładem. Podkłady betonowe (w większości samoczyszczące) zwykle zapewniają lepszą izolację od podsypki niż podkłady drewniane, które z upływem czasu tracą właściwości izolacyjne i coraz lepiej przewodzą na skutek zużycia i starzenia powierzchni, a następnie wnętrza. Nowoczesne systemy transportu szynowego z torowiskiem w jezdni są konstruowane z sprężynujących polimerów, którymi otoczone są szyny jezdne nie tylko jako elementów zmniejszających hałas i wibracje szyn, lecz także stanowiących dobrą izolację szyn od ziemi.

Postęp technologiczny pozwala na wzrost rezystancji przejścia szyny–ziemia dla nowych torowisk. Wartości rezystancji będą jednak się zmieniać w zależności od warunków pogodowych i wraz z upływem czasu, na skutek starzenia i zanieczyszczenia torowiska.

Rezystancja szyn jezdnych

Drugim ważnym czynnikiem, pozwalającym na zmniejszenie upływu prądów błędnych u ich źródła, jest dobór przekroju szyn jezdnych, zapewniających niskorezystancyjną drogę dla prądu trakcyjnego, np. przez wykorzystanie najcięższych szyn jezdnych. Tego typu podejście odpowiednie jest zarówno w odniesieniu do planowanych nowych systemów, jak i modernizowanych, a będących w eksploatacji.

Należy jednak zauważyć, że szyny utwardzane, odporne na zużycie (ścieranie) zwykle stanowią większą rezystancję dla prądów trakcyjnych. Zużycie szyn jezdnych również zwiększa rezystancję, dlatego do obliczeń projektowych przyjmuje się zwykle 15–30-procentowe zmniejszenie przekroju poprzecznego szyny.

Odprowadzanie wody z torowiska

Torowisko z podsypką może osiągnąć dość duże wartości izolacji od ziemi pod warunkiem, że podtorze będzie czyste, a podsypka znajdować się będzie poniżej poziomu szyn. Ze względu na znaczący wpływ wilgotności na izolację szyn od ziemi, należy zapewnić dobry odpływ wody z toru.

Położenie podstacji trakcyjnych

Struktura i konfiguracja elektryczna obszaru zasilania wpływają znacząco na rozkład potencjałów i spadki napięć w obwodzie szyny–ziemia. Zdecydowanie korzystniejszy pod tym względem od układu „centralizowanego” jest układ liniowy z dwustronnym zasilaniem odcinków.

W celu zmniejszenia upływu prądów błędnych oraz zmniejszenia napięć dotykowych (krokowych), przy projekto-

waniu systemów zelektryfikowanego transportu szynowego obserwuje się trend do stosowania mniejszych, ale gęściej rozmieszczonych podstacji – przy danym obciążeniu daje to efekt polegający na zmniejszeniu napięcia szyny–ziemia. Wyższy koszt dodatkowych podstacji jest częściowo zrównoważony poprzez wyposażenie ich w mniejszą liczbę zespołów prostownikowych o mniejszej mocy oraz uproszczone wyposażenie takich podstacji, które mogą być wykonywane jako kontenerowe.

W przypadku zastosowania tego typu rozwiązania nie jest konieczne zapewnienie skupionej rezerwy mocy do utrzymania pełnego ruchu przy awarii dowolnej, pojedynczej podstacji, lecz dobranie takich odstępów między podstacjami, przy których wypadnięcie z pracy jednej z nich nie spowoduje znaczących ograniczeń ruchowych (obciążenia zostaną przejęte przez podstacje sąsiednie – zasada „N-1”).

System wychwytywania prądów błędnych (tworzenia sztucznej drogi przepływu prądów błędnych)

Nawet w przypadkach uzyskania stosunkowo dobrej izolacji w obwodzie szyny–ziemia, część prądu trakcyjnego przepływa do podstacji poza szynami jezdnymi. Aby chronić najbardziej istotne konstrukcje czy elementy infrastruktury podziemnej, coraz częściej wprowadza się sztuczne elementy tworzące wymuszoną drogę przepływu prądów błędnych poprzez zastosowanie elektrycznie przewodzących elementów w podtorzu pod szynami jezdnymi (maty przewodzące) lub do tego celu wykorzystuje się stalowe zbrojenie betonowych płyt torowiska. Elementy te nie tworzą zwykle ciągłej sieci przyłączonej do szyny minusowej podstacji, ale są separowane na odcinki długości ok. 300 m każdy i przyłączane do izolowanego przewodu powrotnego prowadzonego równoległe do szyn jezdnych, a przyłączonego do szyny minusowej podstacji (rys. 1).

Taki podział na sekcje ma wiele zalet:

- wykorzystuje instalacje specjalnie zainstalowanych elementów w podtorzu lub zbrojenie płyt,

- pozwala na przeprowadzanie przeglądów i pomiarów okresowych przy uruchamianiu systemu i w trakcie jego eksploatacji,
- możliwość nadzoru obszarów dużego upływu prądów błędnych i wymiany uszkodzonych elementów.

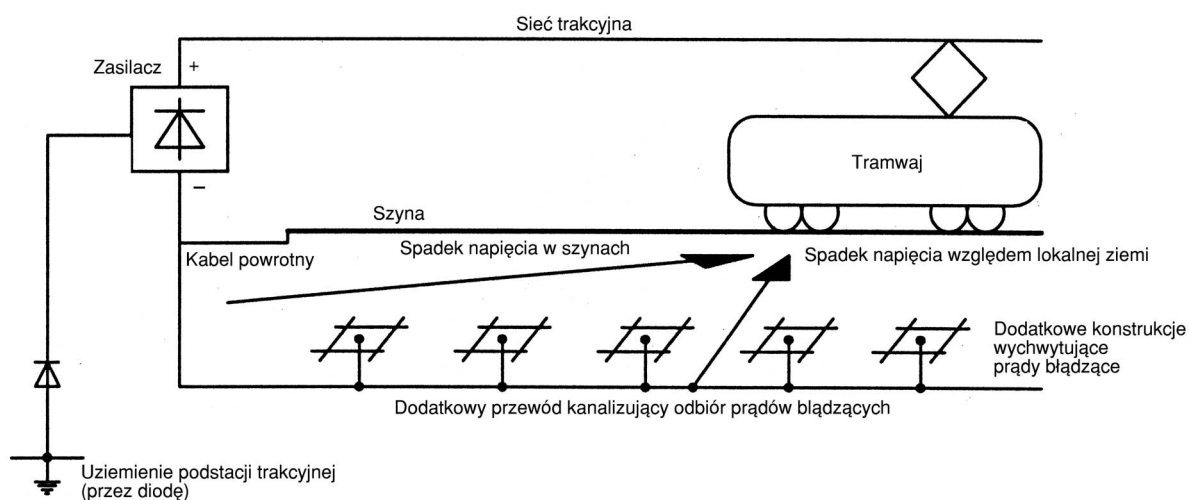
Sekcje powinny być przyłączane do izolowanego przewodu powrotnego każdego toru i nie mogą być lokalnie łączone do szyn jezdnych.

Uziemianie i uszynianie – wpływ na prądy błędne

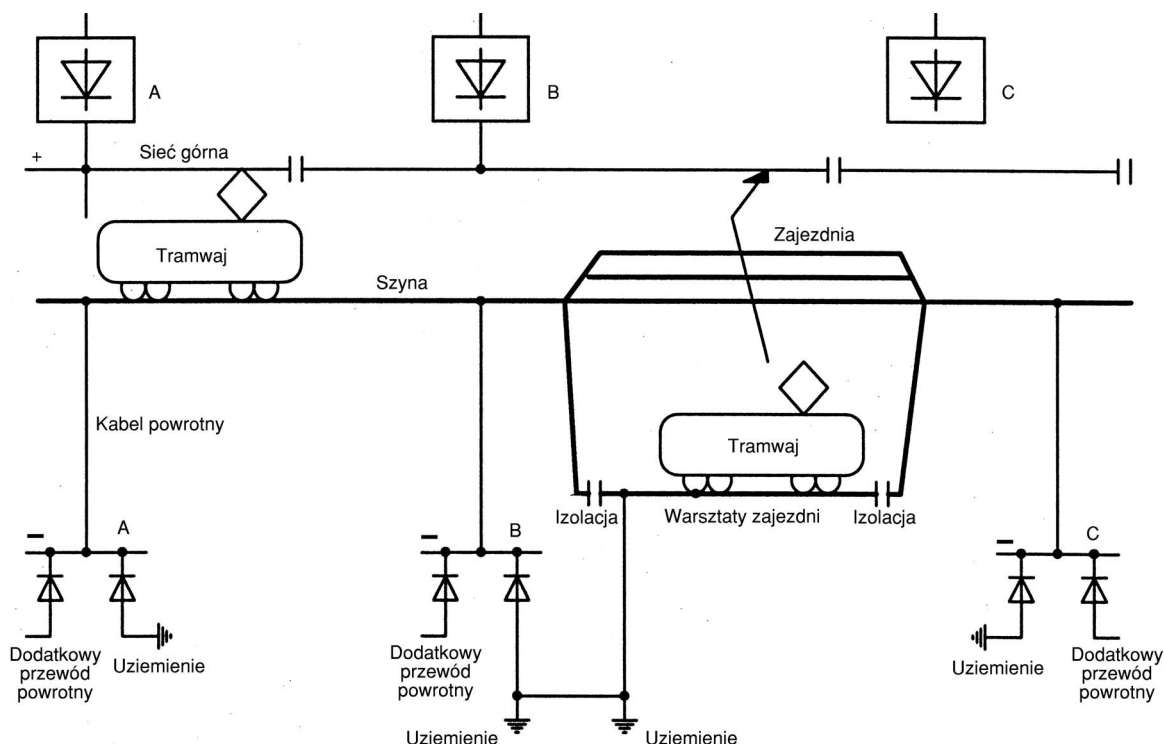
Szynowa sieć powrotna i inne obce elementy mogące tworzyć dodatkową drogę przepływu dla prądów błędnych mają różny potencjał i muszą być od siebie separowane zgodnie z wymaganiami dotyczącymi uziemień i uszynień. Wyposażenie toru (w tym słupy trakcyjne) nie powinno być bezpośrednio przyłączone do szyn (uszynione), jeśli urządzenie nie jest izolowane od ziemi. Izolacja tego typu urządzeń powinna być duża (10 k Ω km), nawet w warunkach dużego zawiłocenia.

W nowoczesnych rozwiązaniach zelektryfikowanego transportu miejskiego (tramwaj szybki, metro) w świecie (W. Brytania, USA, Daleki Wschód) szyny jezdne, stanowiące drogę powrotną prądów trakcyjnych, są połączone z ziemią (uziemiene) w podstacji poprzez diody. Wiele eksploatowanych w Europie systemów pracuje jako systemy nieuziemiene. W tym przypadku potencjał szyn jezdnych jest zmienny („pływa”) w stosunku do ziemi przyjmując wartości ujemne i dodatnie.

Wykorzystanie wspólnego punktu uziemiającego dla całości wyposażenia podstacji upraszcza układ urządzeń uziemienia w podstacji i zapewnia minimalizację napięć krokowych w przypadku wystąpienia zwarcia. Szyny jezdne są izolowane i przyłączone do szyny minusowej podstacji za pomocą izolowanych kabli. Elementy tworzące sztuczny obwód przepływu prądów błędnych są separowane od innych uziemionych elementów i przyłączone do szyny minusowej podstacji poprzez izolowany kabel i diodę (rys. 2).



Rys. 1. Schemat układu zasilania sieci powrotnej trakcji miejskiej z dodatkowym układem ochrony od prądów błędnych



Rys. 2. Przykład rozwiązania układu uzemień i uszynień w zajezdni tramwajowej

Uziemienie podstacji jest przyłączone oddzielnie. Ważne jest, aby układ uzemień podstacji i obwód wymuszonego przepływu prądów błądzących były separowane od siebie. Jakiegokolwiek dodatkowe uzemień mogą być dokonywane tylko do układu uzemień podstacji, a nie do obwodu przepływu prądów błądzących. System uzemień przez diodę ma tę wadę, że występuje zwiększone ujemne napięcie do ziemi (dotykowe), co w rezultacie może wymagać zmniejszenia odległości międzypodstacyjnych lub zwiększenia przekroju sieci powrotnej.

Uszynienia konstrukcji wsporczych i innych metalowych konstrukcji wokół torowiska

Sposób rozwiązania uszynień urządzeń metalowych, znajdujących się w strefie oddziaływania trakcji elektrycznej, ma istotny wpływ na bezpieczeństwo osób i urządzeń znajdujących się w tej strefie. Wiele zarządów przedsiębiorstw tramwajowych bada różne systemy uzemień i uszynień poszukując rozwiązań efektywnych. Jednym z nich jest stosowanie pojedynczej izolacji napowietrznej sieci trakcyjnej, pod warunkiem, że konstrukcje wsporcze są łączone grupowo specjalnym przewodem do uzemień podstacji. W przypadku uszkodzenia izolatora zwarcie doziemne zostanie wykryte przez stwierdzenie przepływu prądu w tym przewodzie. Ze względu na fakt, że przewód ten nie przewodzi prądów roboczych, czas trwania zwarcia doziemnego jest bardzo krótki, a przekrój dodatkowego przewodu będzie niewielki. Z doświadczeń wynika, że typowym, wymaganym przekrojem tego dodatkowego przewodu uzemiającego będzie $80 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$. Należy się spodziewać, że taki napowietrzny dodatko-

wy przewód nie zawsze będzie do zaakceptowania przez urbanistów, stąd może on być umieszczony w ziemi, co jednak zdecydowanie podniesie koszt instalacji, a ponadto spowoduje trudności podczas kontroli jego stanu technicznego. Stąd w wielu eksploatowanych systemach zelektryfikowanego transportu regulą było stosowanie podwójnej izolacji, aby uniknąć konieczności prowadzenia przewodu uzemiającego. Jest to zgodne z wymaganiami IEC dotyczącymi systemów zasilania 750 czy 1500 V DC.

W eksploatowanych systemach metra czy szybkiego tramwaju zasilanych z sieci prądu stałego nie stosuje się skomplikowanych systemów uzemień w podstacji. Konstrukcje metalowe znajdujące się przy torowisku (konstrukcje wsporcze itp.) nie są bezpośrednio przyłączone do szyny minusowej podstacji czy szyn jezdnych. W celu zapewnienia bezpieczeństwa ich użytkowania (na wypadek przebicia izolacji) są one uzemiane lub przyłączone do szyn jezdnych poprzez zawory napięciowe (iskierniki) [11, 17, 18]. Zaletą takich nieuzemionych bezpośrednio systemów jest obniżenie napięcia dotykowego przez zawory, a w normalnej eksploatacji zmniejszony wpływ prądów błądzących, ponieważ obwód uszynień jest otwarty. Wadą tego typu systemów jest to, że zwarcie doziemne, w przypadku dużej rezystancji obwodu zwarcia, może utrzymywać się przez dłuższy czas, jako że nie można prowadzić pomiaru prądu upływu przez ziemię. Stanowi to pewne zagrożenie dla personelu i pasażerów i wymaga stosowania dodatkowych środków ochrony, np. urządzeń ziemnozwarciowych działających w oparciu o ciągły pomiar napięcia szyny minusowej podstacji trakcyjnej – uzemień.

Systemy z podwójną izolacją

Dość rozpowszechniony jest system z podwójną izolacją sieci trakcyjnej od konstrukcji wsporczej – dwa izolatory połączone zwykle metalową rurą. Taki system izolacyjny zapewnia wymagane parametry izolacji zgodnie z przepisami IEC. Stan izolatorów nie jest sygnalizowany, co jest wadą tego rozwiązania. W przypadku uszkodzenia drugiego izolatora następuje przeniesienie napięcia sieci trakcyjnej do konstrukcji wsporczej. Konstrukcje wsporcze w tym systemie nie są uziemione, a ich rezystancja przejścia do ziemi jest zwykle większa niż 20Ω . W takim przypadku (uszkodzenie obu izolatorów) ciągły prąd zwarcia doziemnego przy napięciu zasilania ok. 600 V wyniesie ok. 30 A. Jest to przypadek nie do przyjęcia z punktu widzenia bezpieczeństwa (wysoki potencjał konstrukcji wsporczej, znajdującej się w miejskiej ulicy i ciągły wpływ prądu doziemnego – błędzącego). W celu identyfikacji tego zjawiska stosuje się systemy monitoringu prądu doziemnego w podstacjach (co może być trudne przy dużej rezystancji przejścia do ziemi konstrukcji wsporczej) lub stosuje się dodatkowy przewód uszyniający (połączony z szynami jezdnyymi lub z minusem podstacji), który łączy wstawki neutralne między izolatorami. Uszkodzenie izolatora bliższego sieci trakcyjnej powoduje przepływ prądu zwarcia w tym przewodzie, co jest łatwe do wykrycia przez pomiar tego prądu, lub też spowoduje wystąpienie zwarcia metalicznego o tak dużej wartości, że zostanie ono wyłączone przez wyłącznik szybki zasilacza. Systemy tego typu wymagają okresowej kontroli stanu izolatorów.

Literatura

- [1] Afanasjev S. A., Dolaberidze G.P., Szewczenko W.W.: *Kontaktnyje i kablennyje sieti tramwajev i trolleibusov*. Moskwa, Izd. Transport, 1979.
- [2] Bahra K.S., Catlow R.B.: *Control of stray currents for DC traction systems* – Int. IEE Conf. Electric Railways in a United Europe, 27-30 III 1995, Amsterdam.
- [3] Nene V.: *Advanced propulsion systems for urban rail vehicles*. 1986.
- [4] Delattre D., Seiler W.: *Electrification of an urban transit system*. *Revue Generale des Chemins de Fer* 7-8/1983, 102e.
- [5] Drązek Z.: *Symulacyjna metoda analizy systemów zasilania elektrycznej trakcji miejskiej prądu stałego*. Rozprawa doktorska, PW 1998.
- [6] Drązek Z.: *Symulacja obciążenia zasilaczy podstacji tramwajowej w rejonach o skomplikowanej konfiguracji sieci*. *Przeгляд Elektrotechniczny* 10-11/1991.
- [7] Drązek Z.: *Kompleksowy macierzowy model obciążenia obszaru zasilania komunikacji tramwajowej*. SEMTRAK'94.
- [8] Dytberner W.: *Uproszczona metoda obliczeń układu zasilania trakcji tramwajowej*. *Postępy Napędu Elektrycznego*. Warszawa, 1976 (red. J. Podoski).
- [9] Dzikowski J., Kruciński Z.: *Zasilanie trakcji elektrycznej*. Wyd. Pł 1953.
- [10] Dziuba W.: *Sieć powrotna i prądy błędzące*. Wydawnictwo Instytutu Elektrotechniki, Warszawa 1995.
- [11] Maciołek T., Mierzejewski L., Szelağ A.: *Analiza porównawcza zwirników napięciowych w obwodach uszynienia konstrukcji w strefie oddziaływania trakcji elektrycznej*. XII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo elektryczne”, 15–17 IX 1999, Politechnika Wroclawska, Wrocław.
- [12] Kniat L.: *Model matematyczny tramwajowej sieci powrotnej*. *Prace IT PW*, z. 23/1984.
- [13] Mierzejewski L., Szelağ A., Drązek Z.: *Metoda projektowania układów zasilania trakcji tramwajowej – nowelizacja*. RPBR - 9.2.04.03. Warszawa 1987–1990.
- [14] Mierzejewski L., Szelağ A., Drązek Z.: *Studium układu zasilania trakcji tramwajowej MZK Warszawa*. 1985–1987.
- [15] Mierzejewski L., Szelağ A., Drązek Z.: *Warunki wprowadzenia zasilania dwustronnego w trakcji tramwajowej*. Warszawa 1989.
- [16] Mierzejewski L., Szelağ A., Galuszewski M.: *System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego*. Skrypt PW, 1989.
- [17] Mierzejewski L. (kier.) z zespołem: *Niezawodność, dyspozycyjność i oszczędność energii w systemach trakcji elektrycznej dużych aglomeracji miejskich*. Projekt badawczy KBN nr 8 S 502 030 05, IME PW 1993–1996.
- [18] Mierzejewski L., Szelağ A. i inni: *Analiza ochrony ziemnozwarciowej i przeciwporażeniowej urządzeń sieci trakcyjnej 3 kV – uszynienia konstrukcji wsporczych*. Praca IME PW na zlec. DG PKP, Warszawa 1994–1995.
- [19] Podoski J.: *Tramwaj szybki – projektowanie i eksploatacja*. WKiŁ, Warszawa 1980.
- [20] Mierzejewski L., Szelağ A.: *Zagadnienia racjonalizacji zużycia energii elektrycznej w systemie zelektryfikowanego transportu kolejowego*. *Technika Transportu Szynowego* 5/2001.
- [21] Szczepanik K.: *Zagrożenia korozyjne metalowych konstrukcji podziemnych*. *Transport Miejski* 7/1987.
- [22] Szelağ A.: *Obliczanie tramwajowej sieci powrotnej*. *Transport Miejski* 2-3/1990.
- [23] Szelağ A.: *Obliczanie tramwajowej sieci powrotnej w celu zmniejszenia wpływu na szyn jezdnych prądów błędzących*. TRAM'96, Konferencja Naukowo-Techniczna „Trakcja elektryczna w miastach”, Gdańsk 1996.
- [24] Szelağ A.: *Wymiarowanie granicznych zdolności przesyłu energii w sieci zasilającej i powrotnej trakcji tramwajowej*. Konferencja PK SEMTRAK'96, Zakopane, X, 1996.
- [25] Mierzejewski L., Szelağ A.: *Układy zasilania zelektryfikowanego transportu miejskiego*. *Technika Transportu Szynowego* 11/1999.
- [26] Rozenfeld V. E., Isajew I. P., Sidorow N.N.: *Elektriceskaja tiasa*. Moskwa 1962.
- [27] Wdowiak J., Mierzejewski L., Szelağ A.: *Projektowanie układów zasilania trakcji elektrycznej*. Skrypt WPW 1993.

Autorzy:
dr inż. Zbigniew Drązek
dr inż. Leszek Mierzejewski
dr inż. Adam Szelağ
Zakład Trakcji
Instytut Maszyn Elektrycznych
Politechnika Warszawska