

Leszek Mierzejewski Adam Szelaąg

Techniczne rozwiązania elektroenergetyki transportu szynowego w aglomeracjach

W ostatnich latach, ze względu na istotne zmiany w środowisku przekształcanym przez człowieka, w tym dużej koncentracji populacji w miastach i obszarach podmiejskich oraz zwiększenie ruchliwości ludzi, przy jednoczesnym zatłoczeniu miast i zanieczyszczeniu środowiska przez przemysł i pojazdy spalinowe, zwiększa się zainteresowanie systemami zelektryfikowanego transportu szynowego, jako praktycznie jedynym efektywnym rozwiązaniem problemów komunikacyjnych w dużych aglomeracjach.

Główne kierunki rozwoju tych systemów można przedstawić jako:

- dążenie do integracji systemów automatycznego prowadzenia pojazdów, zarządzania, diagnostyki, utrzymania, zwłaszcza w układach komunikacyjnych o dużej gęstości ruchu;
- efektywnego wykorzystania przesyłu informacji między podsystemami a centrum zarządzania, co jest możliwe dzięki szybkiemu rozwojowi technik komputerowych i transmisji danych;
- stosowanie inteligentnych układów komunikacji człowiek–maszyna w celu wspomaganego podejmowania decyzji;
- monitorowanie ruchu w celu uzyskania niezawodności, punktualności, bezpieczeństwa i przesyłu informacji do pasażerów oraz płynnego dostosowywania gęstości ruchu do zapotrzebowania na przewozy;
- wprowadzanie nowych rozwiązań technicznych w zakresie taboru, układów zasilania i infrastruktury, zapewniających spełnienie wymaganych standardów technicznych, komfortu i jednocześnie optymalizację wskaźników finansowych i ekonomicznych.

W tradycyjnych systemach transportu układy automatycznego sterowania ruchem bazowały na koordynacji między systemami sygnalizacji i sterowania przytorowego a systemami pokładowymi na pojazdach. Obecne podejście do tego zagadnienia w tworzonych dla kolei systemach typu ETCS czy ERTMS wymaga połączenia możliwości: nadrzędnego centrum sterowania, lokalizacji systemów przytorowych i pokładowych na pojazdach, elektroniki i energoelektroniki, systemów przesyłu informacji, sterowania lokalnego i scentralizowanego, logiki rozmytej i sieci neuronowych.

Wymagania w odniesieniu do rozwiązań systemów transportu aglomeracyjnego schematycznie przedstawiono na rysunku 1.

Układy elektroenergetyki transportu szynowego

W poprzednich latach większość rozwiązań technicznych i filozofia podejścia do układów elektroenergetyki trakcyjnej wynikała z przenoszenia do systemów trakcji miejskiej i podmiejskiej rozwiązań z bardziej rozwiniętej technicznie trakcji kolejowej. Kon-

kurencja z transportem indywidualnym przy trudnościach komunikacyjnych w miastach spowodowała zapotrzebowania na modyfikację tych rozwiązań w kierunku uwzględnienia specyfiki ruchu i uwarunkowań lokalnych. Rozwiązania kolejowe, np. budowa dużych podstacji znacznie zwiększa koszty budowy systemu elektroenergetycznego, co przy trudnościach z pozyskaniem terenu w miastach powoduje konieczność odejścia od schematów, szczególnie jeśli uwzględni się specyfikę zapotrzebowania na energię pojazdów w ruchu podmiejskim i aglomeracyjnym. Nowe technologie umożliwiają znaczne zmniejszenie wymiarów urządzeń i budowli oraz ułatwiają dopasowanie mocy zainstalowanych do rzeczywistych potrzeb energetycznych.

Charakterystyka układów zasilania

W trakcie prac nad projektem z zakresu elektryfikacji systemu transportu szynowego, jak tramwaj czy metro, projektant napotyka – zwłaszcza w fazie tworzenia projektu zupełnie nowego systemu transportowego – konieczność wyboru:

- systemu napięcia zasilania;
- sposobu odbioru prądu;
- struktury sieci elektrycznej, która ma być utworzona w celu zapewnienia dużej niezawodności i pewności zasilania oraz sposobu przyłączenia jej do systemu elektroenergetycznego.

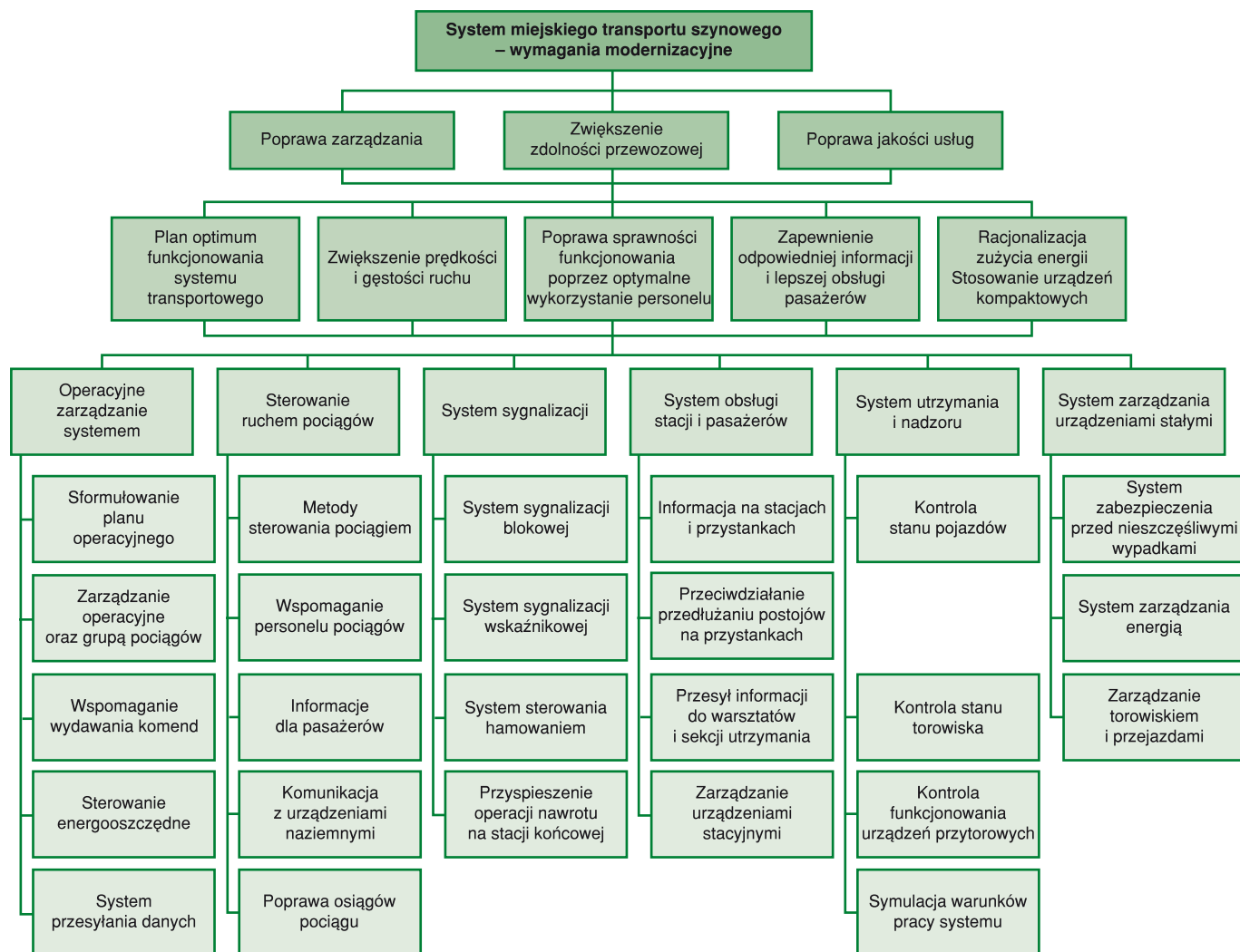
Jako że nie wszystkie rozwiązania techniczne zawsze są możliwe do realizacji, z powodów nieraz oczywistych – jak kompatybilność z istniejącą siecią – lub też nie wchodzi w grę ze względu na czynniki zewnętrzne (takie, jak np. polityka przemysłowa), każdy wybór musi zasadniczo wynikać z przeprowadzenia porównań techniczno-ekonomicznych i finansowych dla różnych możliwości do zrealizowania opcji. Oczywiście jest, że w praktyce problem integracji z istniejącą infrastrukturą jest szczególnie istotny w regionach zurbanizowanych i często prowadzi do zaadaptowania rozwiązań bardziej kosztownych, co ma późniejsze reperkusje w funkcjonowaniu i utrzymywaniu instalacji technicznych różnych typów.

Wybór napięcia zasilania

Napięcie znamionowe systemu trakcji transportu miejskiego należy wybrać zgodnie z normą PN-EN 50163 dla prądu:

- a) stałego – 750; 1500 i 3000 kV (dopuszczalne wahania +20%, –33%);
- b) przemiennego, jednofazowe 16^{2/3} Hz 15 kV (dopuszczalne wahania: 16,5 do 12 kV (minimum chwilowe – 11 kV);
- c) przemiennego jednofazowe 50 Hz 25 kV (dopuszczalne wahania: 27,5 do 19 kV, minimum chwilowe – 17,5 kV).

Należy podkreślić, że wiele miejskich systemów transportowych, zelektryfikowanych w systemie prądu stałego, ciągle utrzymuje napięcie znamionowe 600 V.



Rys. 1. Modernizacja systemów szynowego transportu miejskiego

Dotyczy to przede wszystkim systemów transportowych o małej lub średniej zdolności przewozowej takich, jak tramwaje czy trolejbusy, które eksploatują tabor klasyczny, a funkcjonujących od dziesięcioleci. Ten poziom napięcia nie jest obecnie uznawany za rozwojowy.

Głównymi czynnikami wpływającymi na wybór napięcia systemu są:

- zdolność przesyłu energii przez system zasilania,
- moc jednostkowa pojazdów (pociągów),
- metoda odbioru prądu i parametry sieci trakcyjnej,
- możliwości rozmieszczenia podstacji trakcyjnych,
- zakłócenia wprowadzane przez system transportu zelektryfikowanego do środowiska i infrastruktury technicznej,
- możliwość wykonania (nabycia) taboru o określonym napięciu znamionowym.

Zdolność przewozowa systemu zelektryfikowanego transportu miejskiego

Zdolność przewozowa linii transportu masowego w godzinach szczytu, wyrażona w liczbie pasażerów na godzinę na kierunku ruchu, jest decydującym czynnikiem wpływającym na obciążenie układu zasilania i wybór napięcia systemu. Wiadomo jest, że poziom napięcia w sieci zasilającej zależy ponadto od wymaganej mocy. Lekka kolej (LRT), obejmująca systemy szynowe zasilane

z sieci napowietrznej od klasycznego tramwaju, tramwaj szybki, po prąmetro oraz kolej regionalną i podmiejską, to ok. 350 systemów eksploatowanych w świecie, niektóre z nich o ponad 100-letniej tradycji. Są one w stanie obsłużyć strumień pasażerów od 2000 do 20 000 na godzinę, co odpowiada ruchowi w miastach o populacji od dwustu tysięcy do miliona mieszkańców. Z kolei liczba 50 tys. pasażerów na godzinę na kierunku ruchu jest uzasadnioną granicą do budowy metra zasilanego z trzeciej szyny.

W typowym systemie zużycie energii przez tabor typu metra mieści się między 15 a 20 Wh/km na pasażera. Zdolność przewozowa 50 tys. pasażerów na godzinę na kierunku ruchu daje zatem średnie obciążenie między 1500 a 2000 kW na km linii. Z punktu widzenia minimalizacji nakładów inwestycyjnych celowe jest zmniejszenie liczby podstacji przez koncentrację obciążeń i budowę zespołów przekształtnikowych dużej mocy (do 4 MW) – pozwala to na lokalizację podstacji trakcyjnych w odległościach rzędu 3,5 do 4,5 (2–2,5 km przy całkowitej rezystancji szyn jezdnych i trzeciej szyny 15–20 mΩ/km i linii dwutorowej oraz maksymalnym prądzie pociągu 3–4 kA) przy wyposażeniu podstacji w jeden zespół prostownikowy, zapewniając jednocześnie wykorzystanie pełnego zakresu dopuszczalnych napięć w sieci trakcyjnej. W przypadku napowietrznej sieci trakcyjnej, która z reguły ma mniejszą przewodność niż trzecia szyna, dopuszczalne zdolności przewozowe są mniejsze ze względu na mniejszą dopusz-

czalną wartość prądu w przewodach i większe wartości spadków napięcia. Moc napędów pojazdów trakcyjnych, gęstość ruchu, długość odcinków zasilania i prędkości mają wpływ na obciążenie układu zasilania. Duży wpływ na obciążenia układu zasilania ma także sposób formowania pociągów. Zestawy wielowagonowe, kursujące rzadziej, pogarszają warunki pracy układu zasilania w porównaniu do pociągów o mniejszej liczbie wagonów, kursujących odpowiednio częściej.

Przy projektowaniu systemów transportowych o małej lub średniej zdolności przewozowej (trolejbusy, tramwaje) napięcie znamionowe układu zasilania dobiera się spośród wielkości 750 a 1500 V. Dla dużych aglomeracji miejskich projektuje się zelektryfikowane układy transportu szynowego, obejmujące linie klasycznego tramwaju, metra i kolei regionalnej. Wymaga to stosowania taboru wielosystemowego pracującego przy napięciach stałych i przemiennych. Stosowane rozwiązania zmagają się z unifikacją istniejących środków transportu, powiązania ich z systemami nowoprojektowanymi przy jednoczesnym wykorzystaniu do maksimum istniejącej infrastruktury technicznej. Inwestycje transportowe charakteryzują się dużymi wielkościami nakładów finansowych, długimi okresami eksploatacji oraz małą (nawet ujemną) rentownością – co odpowiada długim okresom (lub nie daje) zwrotu poniesionych nakładów. Dlatego też wybór racjonalnego rozwiązania dokonywany jest w oparciu o wskaźniki techniczno-finansowe i ekonomiczne rozpatrywanych wariantów rozwiązań.

Klasyczny tramwaj i trolejbus wykorzystują wspólne z transportem drogowym jezdnie miejskie. Często w miarę istniejących możliwości torowiska tramwajowe są wydzielone na fragmentach ulic, jednakże skrzyżowania, rozjazdy, objazdy znajdują się na wspólnej płaszczyźnie jezdni. Zwykle sygnalizacja uliczna nie daje uprzywilejowania pojazdom tramwajowym, stąd ten sposób wydzielania ruchu tramwajowego i trolejbusowego na obszarach o gęstej zabudowie i sieci ulic praktycznie nie wpływa na zwiększenie prędkości komunikacyjnej i przepustowości linii.

Tramwaj szybki porusza się po wydzielonych torowiskach. Skrzyżowania z ruchem drogowym są najczęściej bezkolizyjne, a w przypadku skrzyżowań w jednej płaszczyźnie ruch tramwajowy jest uprzywilejowany przez system sygnalizacji i sterowania ruchem. Z zasady jest to jedna linia, bez skrzyżowań i rozjazdów.

Metro nie podlega ograniczeniom ruchowym typowym dla trakcji tramwajowej. Charakteryzuje się układem wydzielonych tras prowadzonych w części śródmieścia i centrum pod ziemią, na odcinkach peryferyjnych często trasy metra prowadzone są na wydzielonych torowiskach bądź po estakadach.

Szybka kolej regionalna jest typowym środkiem transportu eksploatowanym w aglomeracjach o rozbudowanych przedmieściach i miastach satelitach. Właściwym obszarem do budowy kolei regionalnej w Polsce jest Górnośląski Region Przemysłowy. Kolej podmiejska pełni funkcję przewoźnika w regionie, którego przykładem może być linia Gdańsk – Sopot – Gdynia – Wejherowo lub obszar Mińsk Mazowiecki, Otwock, Nasielsk, Grodzisk – Sochaczew z centralnie położoną Warszawą. Jak nadmieniono wcześniej we właściwie zaprojektowanym i wykonanym układzie transportowym każdy z wymienionych systemów stanowi uzupełnienie dla pozostałych, obsługuje określoną strefę i ma określone granice styku z innymi systemami (rys. 2). Spotyka się jednakże układy transportowe, w których strefy oddziaływania różnych sys-

temów nakładają się częściowo. Tworzy to skomplikowaną pod względem eksploatacyjnym sieć, ze wspólnymi dla różnych systemów układami torowymi i układami zasilania. W taki sposób rozwiązana jest między innymi komunikacja subkonurbacji paryskiej. W tabeli 1 zestawiono przeciętne parametry różnych systemów zelektryfikowanego transportu miejskiego.



Rys. 2. Wspólny przystanek na styku różnych systemów trakcji

Źr. Mass Transit

Odbiór prądu i sieć trakcyjna

Sposób odbioru prądu i wybór typu sieci trakcyjnej dokonywany jest w oparciu nie tylko o kryteria wynikające z obciążeń elektrycznych. Wartość obciążeń elektrycznych sieci przy zadanym ruchu, typie taboru i prędkości jazdy można kształtować na etapie analiz wstępnych układu zasilania przez odpowiedni podział obszaru zasilanego z jednej podstacji na odcinki zasilania. Jako kryterium doboru służy dopuszczalna wartość zastępczego prądu obciążenia przyjętego typu sieci jezdnej (lub przekroju) oraz dopuszczalne wartości spadku napięcia. Oba parametry zależą od długości odcinka zasilania. Im dłuższe odcinki tym większy jest wymagany przekrój sieci jezdnej.

Tabela 1

Przeciętne parametry systemów zelektryfikowanego transportu miejskiego

System	Częstość kursowania [poc./h]	Odległość międzyprzystankowa [km]	Przewozy (górnogranica) [tys. pas./h]	Średnia prędkość [km/h]	Jednostkowe zużycie energii [Wh/t km]
Tramwaj	60–70	0,4–1,5	15	15–20	70–120
Tramwaj szybki	40	0,8–2,0	20	20–30	60–100
Metro	60	0,6–1,5	40	35–45	50–80
Szybka kolej regionalna	20	0,8–3,0	45	45–55	45–60
Kolej podmiejska	12	1,5–5,0	50	55–60	35–55

System trzeciej szyny (rys. 3, 4) stalowej lub stalowo-aluminiowej o dużym przekroju (np. stalowej w Metrze Warszawskim 6600 mm²) jest stosowany jako typowy w metrze, ale również na części linii kolejowych w Wielkiej Brytanii. Zastosowanie systemu trzeciej szyny jest uzasadnione mniejszymi kosztami w stosunku do sieci górnej, dla której tunel metra musiałby mieć znacznie większe rozmiary. Rozwiązanie to wymaga pełnego wygrozdzenia linii kolejowej ze względów bezpieczeństwa. Problemem są jednopoziomowe skrzyżowania z drogami. Stosuje się wtedy szlabany przekręcane, które w ruchu drogowym blokują jednocześnie wjazd i wejście na tory. W obszarze przejazdu drogowego i rozjazdu ciąg trzeciej szyny jest przerwany. Przykładowe rozwiązanie

trzeciej szyny przedstawiono na rysunku 3. Ze względu na wymaganą dużą wytrzymałość mechaniczną, szyny wykonywane są z materiałów o dużej rezystancji jednostkowej, co powoduje konieczność stosowania szyn o dużych przekrojach (rodzaje stosowanych przekrojów przedstawiono na rysunku 4). Stosowane są także szyny prądowe o zmniejszonej rezystancji, dzięki wykorzystaniu stopów lub dodatków metali zmniejszających rezystancję np. Al (rys. 5). Szyna prądowa stalowo-aluminiowa o przekroju 4775 mm², z nakładką ślizgową wykonaną ze stali o przekroju znamionowym 650 mm², stosowana jest w systemie Docklands i na nowych liniach metra w Londynie. Umożliwia to znaczne zmniejszenie rezystancji jednostkowej (do 0,0067 Ω/km w porównaniu np. do dotychczas stosowanej na pierwszej linii metra warszawskiego szyny stalowej o rezystancji 0,0182 Ω/km). W efekcie stosowania szyny stalowo-aluminiowej należy spodziewać się:

- mniejszych spadków napięć (o ok. 10–15%), co jest szczególnie istotne w okresie szczytowego ruchu lub awaryjnych warunków zasilania,
- mniejszych strat energii,
- poprawy efektywności rekuperacji.

W metrze w Londynie stosuje się, ze względu na wyłączenie szyn jezdnych z przewodzenia prądu (eliminacja prądów błądzących), dwie szyny prądowe przyłączone odpowiednio do biegunów plus i minus w podstacji trakcyjnej, w metrze w Paryżu na niektórych odcinkach kursuje tabor z kołami gumowymi (rys. 6, 7),

zmniejsza niekorzystne drgania i wibracje, odczuwane w rejonach trasy metra w Warszawie.

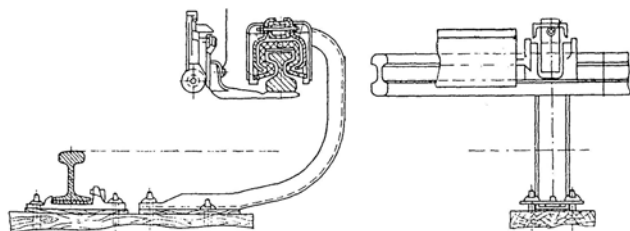


Rys. 6. Szyny prądowe i jezdne w metrze w Paryżu

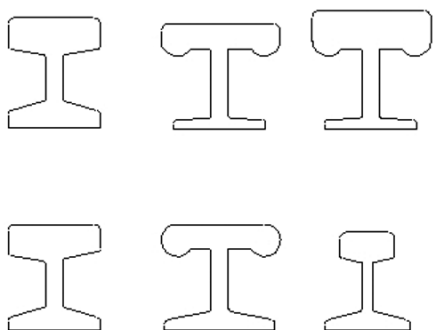


Rys. 7. Tabor na kołach gumowych w metrze w Paryżu

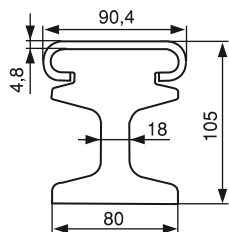
Rozwiązaniem, które może być stosowane w tunelach, na mostach, w lokomotywniach, jest napowietrzna szyna prądowa aluminiowo-miedziana. Przedstawiona na rysunku 8 szyna została opracowana przez firmę Balfour Beatty Rail. Przekrój poprzeczny części aluminiowej szyny wynosi 2214 mm², zaś dołączonego



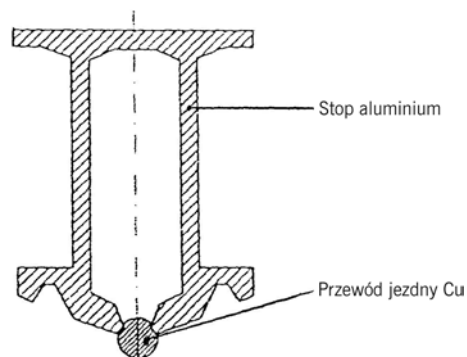
Rys. 3. Przykładowe rozwiązanie „trzeciej szyny” w ostonie ze stykającym się odbierakiem



Rys. 4. Stosowane przekroje szyny prądowej



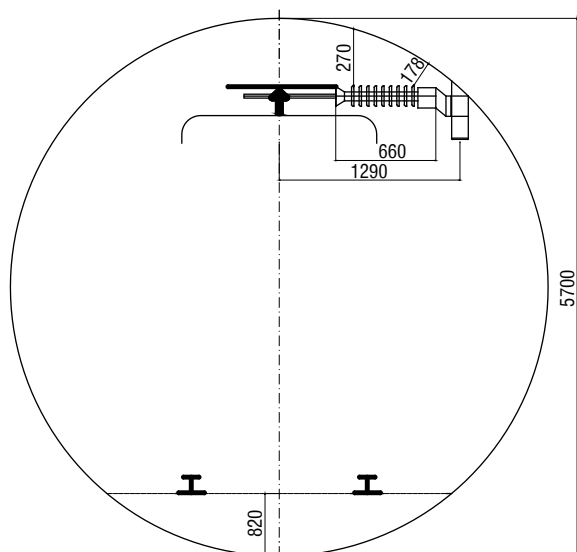
Rys. 5. Szyna aluminiowa pokryta nakładką stalową



Rys. 8. Szyna prądowa Al-Cu

przewodu miedzianego 107 mm². Jej zaletą jest mała rezystancja – duża obciążalność prądowa i mała podatność na uszkodzenie. Może być wykorzystana w lokomotywowniach, gdyż umożliwia pobór dużego prądu w warunkach ograniczonego chłodzenia. Szyna ta ma znaczne wady – wymagana duża gęstość podwieszenia, znaczna sztywność szyny ogranicza prędkość jazdy, bimetaliczne połączenie aluminium i miedzi jest narażone na korozję i odpajanie połączenia.

Sztywne zawieszenie napowietrznej sieci trakcyjnej zastosowano także w systemie metra w New Delhi w tunelu przy napięciu 25 kV (rys. 9).



Rys. 9. Sieć napowietrzna sztywna w systemie 25 kV 50 Hz w tunelu metra w New Delhi (Indie)

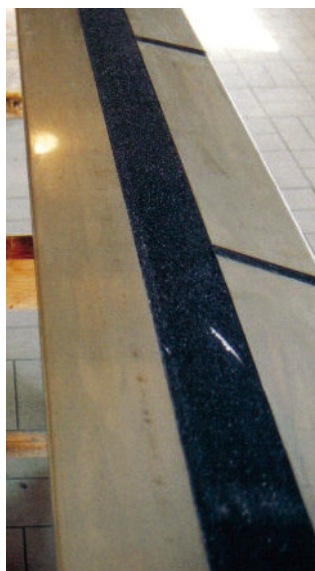
Z kolei w naziemnych systemach transportu wykorzystujących drogi i skrzyżowania w jednym poziomie z innymi środkami transportu zasadniczo jest stosowany system zasilania z górnej sieci jezdnej. Przyjęte rozwiązania konstrukcyjne narzuca liczbę i wytrzymałość konstrukcji wsporczych. W trakcji tramwajowej przekrój sieci płaskiej może wynosić 80, 100, 150 mm² Cu, a stosowane przekroje sieci łańcuchowej nie przekraczają 170 mm² Cu (rys. 10). Kolej regionalna i podmiejska jest na ogół wyposażona w typowe sieci kolejowe o przekrojach 170–440 mm² Cu (w zależności od napięcia systemu). Dla prędkości do 80 km/h wystarczająco dobre właściwości współpracy z odbierakiem jest w stanie zapewnić sieć płaska. Ze względu na estetykę i prostotę



Rys. 10. Nowa sieć trakcyjna w Elblągu

konstrukcji możliwe i celowe wydaje się usunięcie z miast sieci łańcuchowej i zastąpienie jej siecią płaską.

Rozwieszenie sieci trakcyjnej na terenach gęstej zabudowy budzi kontrowersje urbanistów, szczególnie w historycznych centrach miast. Stąd pojawiają się próby umieszczenia sieci trakcyjnej w jezdni. Przykładem takiego rozwiązania jest system typu STREAM firmy Ansaldo Transporti czy podobne rozwiązanie zasilania tramwaju w Bordeaux. Energia trakcyjna dostarczana jest poprzez umieszczony pod pojazdem ślizgowy odbierak, który styka się z dwiema szynami umieszczonymi w jezdni (rys. 11). Jedną z nich, przyłączoną do bieguna minusowego podstacji jest niesekcjonowana, sekcje drugiej szyny, znajdujące się pod pojazdem są przyłączane do bieguna dodatniego podstacji poprzez przyciągany magnetycznie przewód w miarę przemieszczania się pojazdu wzdłuż trasy. Wraz z siecią układany jest kabel sterowniczy, który umożliwia przesył informacji i sterowanie pojazdem. Wadą tego systemu jest duża wrażliwość sieci na warunki atmosferyczne, głównie opady i zanieczyszczenia.



Rys. 11. Sieć dolna do zamontowania w jezdni autobusu systemu typu STREAM (Ansaldo Transporti, Włochy – na rysunku w laboratorium)

Lokalizacja podstacji trakcyjnych

W wielu przypadkach prawidłowe umiejscowienie podstacji może być utrudnione ze względu na brak terenu lub odległe położenie zasilających linii energetycznych lub punktów przyłączenia do sieci elektroenergetycznej. Jeśli podstacje rozmieszczone są zbyt daleko jedna od drugiej, to wymagane jest większe napięcie zasilania. Zwykle jednak jest możliwe znalezienie wymaganej lokaty na podstację trakcyjną, czasami o bardzo uproszczonym charakterze (np. typu kontenerowego, rys. 13). W skrajnym przypadku można szukać innych rozwiązań, jak np. zainstalowanie prostownika o regulowanej charakterystyce lub wyprowadzenie długich zasilaczy (o dużym przekroju) z istniejącej podstacji do sieci trakcyjnej w miejscu, gdzie wymagane jest postawienie podstacji. Nowe technologie w konstrukcji wyposażenia podstacji trakcyjnych (wyłączniki SF6, suche transformatory, rys. 15, kompaktowe wyłączniki szybkie, cyfrowe układy zabezpieczeń, zastosowanie światłowodowego przesyłania sygnałów sterujących) powodują, że można uzyskać znaczne zmniejszenie wymiarów urządzeń i pomieszczeń do ich zainstalowania. Ponadto systemy sterowania

i zarządzania urządzeniami elektroenergetyki trakcyjnej, często zintegrowane z systemami zarządzania całym systemem transportowym umożliwiają efektywne wykorzystanie zainstalowanych urządzeń zarówno w warunkach normalnych, jak i awaryjnych. Montaż gotowych, przetestowanych wcześniej przez producenta w fabryce, kompaktowych urządzeń (rys. 12, 14) zmniejsza koszty instalacji, prac uruchomieniowych i zwiększa niezawodność funkcjonowania. Układy diagnostyki umożliwiają szybką wymianę uszkodzonego modułu. Doświadczenia użytkowników [10, 13, 15, 16] dotyczące wyposażenia podstacji kompaktowych są bardzo pozytywne, z sugestiami, by konstruować raczej zintegrowane jednostki specjalizowane pod kątem elektroenergetyki trakcyjnej, niż traktować elementy wyposażenia jako zbiór dostępnych urządzeń elektroenergetycznych, z których „składa” się podstację trakcyjną.

Prostowniki trakcyjne

Współczesne prostowniki trakcyjne są w większości wykonane z chłodzeniem naturalnym powietrzem (choć spotyka się prostowniki z chłodzeniem wymuszonym powietrzem, jak też z zastosowaniem innych mediów chłodzących, jak olej czy freon), w układzie trójfazowym mostkowym. Połączenie mostków szeregowo lub równoległe umożliwia uzyskanie napięcia wyprostowanego 12-pulsowego oraz optymalizację liczby diod w ramieniu mostka. Dla napięcia 1,5 oraz 3 kV zasadniczo wybierany jest szeregowy układ połączeń, dla napięcia 750 V preferowane jest połączenie równoległe. Szeregowy połączenie ma tę zaletę, że pozwala uniknąć nierównomierności obciążeń mostków, co może stać się problemem, szczególnie przy nieodpowiednio zaprojek-



Rys. 14. Prostownik kompaktowy o mocy 750 kW

Źr. Mass Transit

towany transformatorze lub asymetrii czy odkształceniu napięcia po stronie zasilania elektroenergetycznego. Nowoczesne metody wytwarzania ograniczają asymetrię uzwojeń. Stosowane są także bardziej bezpieczne transformatory suche, szczególnie istotne, gdy podstacja znajduje się pod ziemią (rys. 15).



Rys. 15. Transformator suchy w Metrze Warszawskim

Rozwój techniki półprzewodnikowej umożliwił konstrukcję prostowników sterowanych, kosztują one znacznie więcej, są bardziej zawodne, zwiększają zawartość harmonicznych tak po stronie AC jak i DC oraz pobierają moc bierną. Generalnie dąży się do uproszczenia konstrukcji zespołów prostownikowych, ograniczenia ich oddziaływania zakłócającego i minimalizację wskaźnika wymiary/moc.

Zasilanie elektroenergetyczne

Struktura sieci zasilającej zelektryfikowanego transportu miejskiego może być bardzo różnorodna. Zależy ona od:

- rozmiarów sieci transportowej i zapotrzebowania mocy w czasie ruchu szczytowego,
- możliwości przesyłu mocy i energii z lokalnej sieci elektroenergetycznej,
- jakości i ilości energii zapotrzebowanej przez pojazdy trakcyjne i obwody pomocnicze.

System transportowy średnich rozmiarów, w warunkach ograniczonych możliwości rozwoju, może być zasilany z energetyki napięciem średnim, którego linie w miastach zwykle są dobrze



Rys. 12. Przewóz podstacji w Londynie

Źr. Mass Transit



Rys. 13. Podstacja kontenerowa w USA

Źr. Mass Transit

rozwinęte. W takim przypadku, poziom tego napięcia jest stałym parametrem przyjmowanym w analizach technicznych.

Z kolei w przypadku gęstego i intensywnie rozwijanego systemu transportowego, należy przewidzieć zasilanie z linii wysokich napięć (110 kV). Zapewni to niezawodność zasilania oraz dużą moc zwarciovą źródła zasilającego.

Przy rozpatrywaniu systemu przetwarzania i rozdziału energii trakcyjnej należy wziąć pod uwagę następujące struktury:

- pierwszą, wykorzystującą koncepcję podstacji zcentralizowanych, co umożliwi utrzymanie większych odległości między podstacjami, ale wymaga większej mocy zainstalowanej w podstacji oraz większej pewności zasilania;
- drugą, opartą o koncepcję zasilania zdecentralizowanego, co wymaga większej liczby podstacji; zaletą tego rozwiązania jest to, że awaria jakiegokolwiek podstacji nie powoduje konieczności wprowadzenia ograniczeń ruchowych w systemie ze względu na ograniczenia w przesyle mocy.

Konfiguracja sieci potrzeb nietrakcyjnych i oświetlenia zwykle obejmuje jedną ze struktur:

- bezpośrednie połączenie podstacji do lokalnej sieci niskiego napięcia,
- instalowanie w podstacjach trakcyjnych transformatorów SN/NN do potrzeb własnych i nietrakcyjnych.

Układy projektowane są typowe – podwójna szyna obejmująca, pojedynczy lub podwójny odłącznik na kablu SN, standardowe zasilanie rezerwowe NN.

Struktura układu zasilania sieci trakcyjnej

Jako kryterium dyspozycyjności operacyjnej zasilania sieci trakcyjnej zwykle wykorzystuje się kryterium $N-1$, co oznacza że system musi w pełni funkcjonować nawet przy uszkodzeniu jednego dowolnego elementu struktury czy instalacji (podstacja, zasilacz). Kryterium to jest decydujące dla systemów kolei podziemnej (metra) i nie można uruchomić systemu, dopóki nie zostanie ono spełnione.

Obliczanie i wymiarowanie parametrów sieci trakcyjnej wymaga znalezienia *optimum* dla następujących parametrów, z uwzględnieniem specyfiki taboru i jego funkcjonowania:



Rys. 16. Jedna z dwu podstacji elektroenergetycznych 220/25 kV do zasilania trzech linii metra w New Delhi o łącznej długości 63 km (jedna z dwóch linii na estakadzie, trzecia linia w tunelu)

- liczby i położenia podstacji trakcyjnych;
- cykli obciążenia trakcyjnego;
- charakterystyki sieci jezdnej;
- parametrów znamionowych aparatury elektrycznej (wyłączników, odłączników itp.);
- liczby i przekroju kabli.

Metoda wymiarowania zwykle wykorzystuje proces kolejnych przybliżeń (iteracji) po wstępnym zdefiniowaniu wartości pewnych parametrów – takich, jak rezystancja elektryczna sieci trakcyjnej, charakterystyki prostowników, położenie podstacji. Za pomocą symulacji komputerowej ruchu pojazdów trakcyjnych i obciążenia sieci trakcyjnej sprawdza się zakres dopuszczalnych spadków napięcia w sieci trakcyjnej dla kryterium $N-1$, tzn. przy całkowitym wyłączeniu jednego z prostowników lub zasilaczy.

Obciążenie trakcyjne prostowników determinuje ich parametry i wymaganą przeciążalność. Należy sprawdzić, czy wymagane parametry są możliwe do osiągnięcia. Jeśli nie, wymagana do dostarczenia moc może zostać przesłana tylko po zmniejszeniu odległości międzypodstacyjnych – ograniczenie w możliwości dostawy mocy będzie wtedy czynnikiem najbardziej znaczącym.

Należy również sprawdzić, czy przekrój sieci trakcyjnej jest odpowiedni ze względu na nagrzewanie przepływającym prądem. W przypadku napowietrznej sieci trakcyjnej należy również sprawdzić długość sekcji, aby nie został przekroczony dopuszczalny spadek napięcia. Sprawdzeniu podlega też poziom napięcia szyny–ziemia.

Należy tu podkreślić, że wykrywanie zwarc w sieci jest ściśle powiązane z rezystancją i długością sieci trakcyjnych i może – w pewnych przypadkach – wymagać zmiany (zmniejszenia) odległości międzypodstacyjnych lub długości odcinków zasilania.

Nowoczesny tabor trakcyjny wyposażony jest w układy hamowania rekuperacyjnego. Efektywność rozwiązań hamowania rekuperacyjnego zależy nie tylko od profilu linii i ruchu pociągów, ale również od zdolności systemu do przesylu i absorpcji energii oddawanej do sieci trakcyjnej [9].

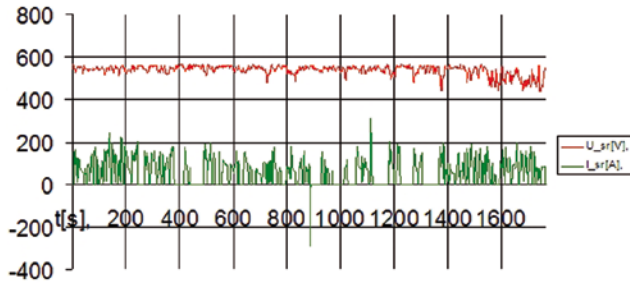
Sieć trakcyjna, przy stosowaniu taboru ze zwrotem energii, musi charakteryzować się następującymi cechami:

- zapewnienie ciągłości połączeń różnych sekcji sieci trakcyjnej, przy utrzymaniu elektrycznej niezależności między liniami (niezależność operacyjna);
- unikanie występowania pracy jałowej prostowników;
- stosowanie połączeń wyrównawczych między torami i zmniejszenie rezystancji sieci trakcyjnej oraz połączeń kablowych.

Przykładowo, w systemach transportu zelektryfikowanego, jak paryskie metro, naturalna zdolność systemu do odbioru energii rekuperacji zbliża się do 100% (praktycznie każde hamowanie może być z rekuperacją) w godzinach szczytu i zmniejsza się do 80% średnio w ciągu całego dnia.

W szczególnych przypadkach, takich jak linie o znacznym profilu lub słabo obciążone, zastosowanie podstacji trakcyjnych wyposażonych w zasobniki energii (wirujące lub superkondensatorowe) lub falowniki, spowoduje zwiększenie efektywności rekuperacji. Powinno to jednak, jako rozwiązanie kosztowne, zostać dokładnie przeanalizowane. Należy podkreślić, że zastosowanie hamowania rekuperacyjnego, zwłaszcza w miejskich systemach transportowych, wpływa na zmniejszenie zużycie energii w granicach 10–15%. Efektywność rekuperacji wymaga poniesienia dodatkowych kosztów inwestycyjnych na zwiększenie przekrojów sieci jezdnej, kabli oraz dodatkowe połączenia poprzeczne. Wpro-

wadzenie nowego taboru na trasy o istniejącej infrastrukturze elektroenergetycznej może nie tylko nie dać spodziewanych oszczędności energii, ale wręcz uniemożliwić osiągnięcie zakładanych parametrów ruchowych czy zwiększyć awaryjność układów zasilania (zbyt częste zadziałania wyłączników szybkich, zbyt wysokie napięcia, przeciążenia elementów), gdyż nowoczesny tabor ma zwykle większe moce niż wcześniej eksploatowany. Dlatego dla przykładowego odcinka sieci tramwajowej, na którym przeprowadzono pomiary (rys. 17) – gdzie już przy niewielkim prądzie pobieranym przez tramwaj napięcie na odbieraku spada do wartości ok. 420–450 V (czaszy 1500–1600 s) – bez istotnej modernizacji układu zasilania nie będzie można wprowadzić taboru o większej mocy.



Rys. 17. Wyniki pomiaru prądu jednej sekcji napędu tramwaju i napięcia na jego odbieraku

Oddziaływania systemów zelektryfikowanego transportu na infrastrukturę techniczną i środowisko

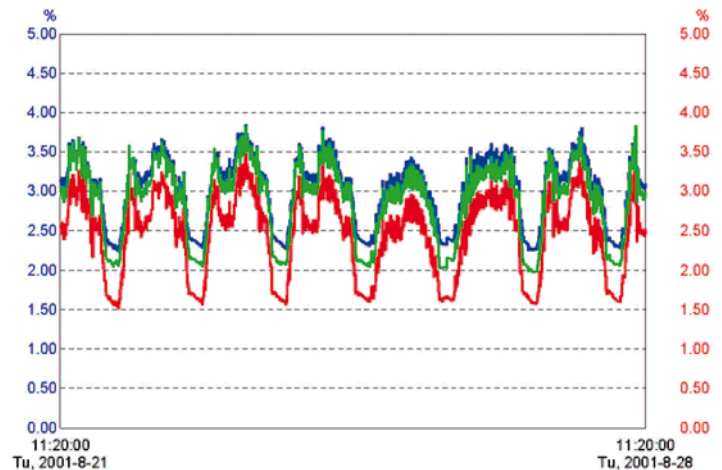
Środowisko miejskie wprowadza specyficzne wymagania i ograniczenia. Dotyczy to geometrii, mas, poziomu hałasu, wibracji, emisji ciepła itp. Podobnie dodatkowe ograniczenia nakładane są na lokalizację podstacji trakcyjnych. Ochrona środowiska wymusza na projektantach uzyskanie kompromisu często sprzecznych wymagań, co generuje dodatkowe koszty. Poza mechanicznymi czy akustycznymi aspektami, należy przede wszystkim wziąć pod uwagę problemy związane z elektrycznym oddziaływaniem systemu transportowego.

■ Powodowanie przepływu przez ziemię prądów błędzących, wypływających z szyn jezdnych (stanowiących szyny powrotne), co jest szczególnie niebezpieczne dla konstrukcji podziemnych jak rurociągi, kable itp. (dotyczy systemów prądu stałego). Przepływy prądów błędzących zwiększają się w przypadku niewielkich rezystancji izolacji szyn jezdnych od ziemi i podłoża oraz dużych wzdłużnych spadków napięcia w szynach. Ograniczenie przepływu prądów błędzących jest możliwe przez utrzymywanie wymaganej rezystancji szyn od ziemi, zmniejszanie odległości między podstacjami i rezystancji sieci powrotnej [11]. Problemy w prądami błędzącymi mogą wymagać wprowadzenia oddzielonej od szyn jezdnych izolowanej od ziemi szyny powrotnej (np. w londyńskim metrze).

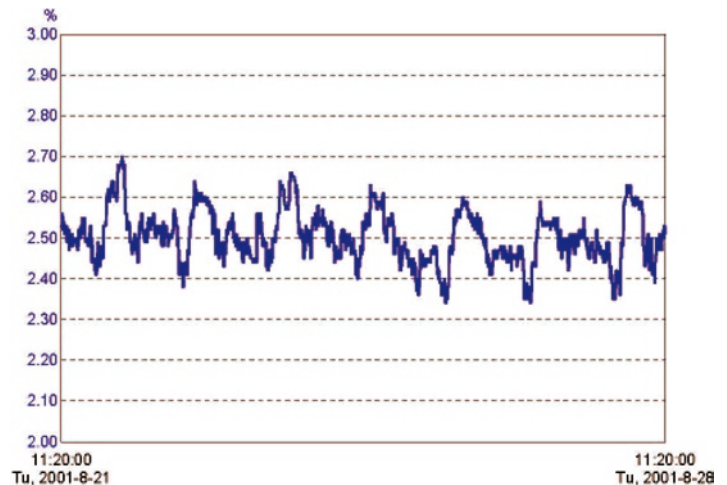
■ Wytwarzanie pól elektromagnetycznych przez obwody przepływu prądów trakcyjnych (odbieraki prądu i sieci trakcyjne, pojazdy trakcyjne, podstacje trakcyjne), rozwiązanie systemu zasilania (napowietrzne czy z trzeciej szyny w tunelu), wpływa znacząco na generację zakłóceń radioelektrycznych.

■ Odształcenia prądów i napięć przez wyższe harmoniczne (powoduje to konieczność budowy prostowników 12-pulsowych lub nawet 24-pulsowych, to ostatnie rozwiązanie, jako bardzo kosztowne, powinno zostać szczegółowo przeanalizowane np.

przez analizy teoretyczne czy przeprowadzenie pomiarów – rys. 18 i 19 – wyniki pomiarów w podstacji tramwajowej z prostownikami 6-pulsowymi).



Rys. 18. Wyniki pomiarów współczynnika odształceń napięcia THD U na szynach 15 kV w podstacji tramwajowej z prostownikami 6-pulsowymi



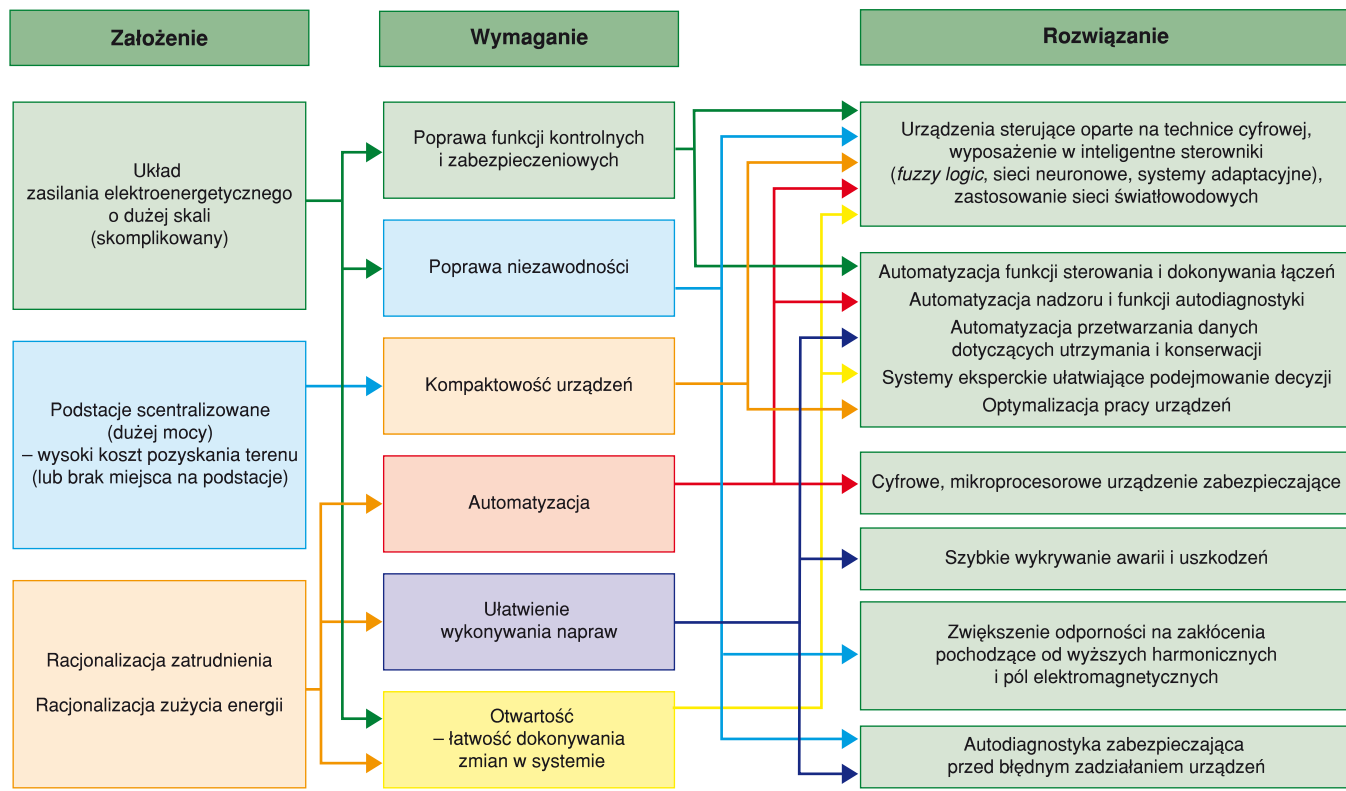
Rys. 19. Wyniki pomiarów współczynnika asymetrii napięć na szynach 15 kV w podstacji tramwajowej z prostownikami 6-pulsowymi

Systemy monitoringu, sterowania i zarządzania

Układy zasilania do ciągle dopasowujących się do rosnących wymagań transportowych systemów zelektryfikowanego transportu miejskiego, będą efektywnie spełniać swe funkcje dzięki integracji urządzeń technicznych i układów sterowania (rys. 20) [13, 16]. W chwili obecnej trudno sobie wyobrazić systemy sterowania i nadzoru nad układami elektroenergetyki trakcyjnej bez zastosowania komputerów. Wymagania dla takich systemów oraz możliwości realizacji zestawiono w tablicy 2.

Przykładowe rozwiązania układów zasilania systemów transportu w aglomeracjach System zasilania w Londyńskim Metrze

1. Metro w Londynie zasilane jest poprzez system ponad 130 podstacji trakcyjnych z dwóch szyn prądowych: zasilającej (trzecia szyna) i powrotnej (czwarta szyna), między którymi napięcie wynosi 630 V DC (szyny plusowa i minusowa są uziemione poprzez rezystancję w wybranych podstacjach). Z podstacji trakcyjnych zasilane są również systemy sygnalizacji (630 V 125 Hz AC) oraz sieć niskiego napięcia 415 V AC 3~. Dwie trzecie mo-



Rys. 20. Uwarunkowania rozwiązań technicznych systemów elektroenergetyki trakcyjnej

cy dostarczanej do sieci zasilającej 22 kV AC pochodzi z własnych elektrowni metra (180 MW elektrownia z turbinami parowymi, 77 MW elektrownia szczytowa z turbinami gazowymi), a 1/3 z sieci publicznej poprzez podstację energetyczną 132/22 kV.

Tablica 2

Wymagania oraz realizacja zadań systemów sterowania elektroenergetyki trakcyjnej

Wymaganie	Wykonanie
Poprawa funkcjonowania systemu nadzoru i sterowania	Rozwinięcie komunikacji i funkcji interfejsu człowiek-maszyna: – czytelność przekazywanej informacji, ekrany wysokiej rozdzielczości, system przewijanych okien, rejestracja zdarzeń, systemy eksperckiego wspomaganie podejmowania decyzji itp. Rozszerzenie automatycznych funkcji sterowania Przeniesienie części funkcji inteligentnego sterowania do odległych (lokalnych) jednostek i sterowników
Elastyczność systemu i możliwość rozszerzenia zakresu sterowania	Otwartość systemu na zmiany: – sprzętowe (<i>hardware</i>) – programowe (<i>software</i>) – funkcje symulacji pracy systemu i autodiagnostyki
Zwiększenie niezawodności systemu	Zwielokrotnienie systemów komputerowych (zwykle dwa niezależne pracujące równolegle systemy)
Automatyzacja przygotowania i nadzoru prac utrzymania oraz konserwacji systemu	Określenie prac do wykonania, nadzór nad wykonaniem, przedstawienie harmonogramu i zakresu, kontrola wykonania pracy i jej poprawności
Połączenie z innymi systemami	Stworzenie globalnego systemu nadzoru poprzez systematyzację połączeń pomiędzy komputerami. Automatyzacja zbierania, przetwarzania i przesyłu informacji dotyczących pracy systemu elektroenergetyki trakcyjnej
Wyposażenie centrum i odległych (lokalnych) jednostek w sprzęt	System komputerowy w centrum, terminal komputerowy w jednostce lokalnej
Wysokie sprawny i niezawodny system przesyłu informacji	Sieci światłowodowe Szybkie systemy przesyłu dużej liczby danych, systemy abonencje

Następnie napięcie jest transformowane do poziomu 11 kV do zasilania podstacji trakcyjnych. Sterowanie podstacjami trakcyjnymi zapewnia monitoring i dokonywanie operacji łączeniowych (np. wszystkie odbiory trakcyjne są wyłączane po godzinach ruchu (ponad 500 wyłączników w podstacjach trakcyjnych). Do 1930 r. wszystkie operacje prowadzone były ręcznie, od 1930 r. do 1979 r. stosowano różne metody zdalnego sterowania, w 1979 r. wprowadzono pierwszy komputerowy system sterowania w 5 podstacjach na Linii Centralnej, obecnie obsługujący całą sieć trakcyjną. Doświadczenia z eksploatacji tego systemu były wzięte pod uwagę przy wprowadzaniu nowych rozwiązań

2. Układ zasilania dla przedłużenia linii Jubilee Line
Przy budowie przedłużenia odcinka linii Jubilee Line w metrze londyńskim (16 km, z tego 10 km w tunelu) wprowadzono nowe rozwiązania techniczne zapewniające prowadzenie ruchu przy maksymalnych prądach rozruchu sięgających 4,5 kA:

- zastosowanie jako szyny prądowej kompozytowej szyny stalowo-aluminiowej zamiast szyny ze stali walcowanej (zmniejszenie do połowy rezystancji jednostkowej), co umożliwi ograniczenie liczby podstacji trakcyjnych (trudności z lokalizacją);

- wyposażenie podstacji trakcyjnych w 2 zespoły prostownikowe o mocy 2,25 MW każdy, w układzie szeregowo połączonych mostków z transformatorem Dd0y11 o mocy 2,4 MVA, z zastosowaniem przesunięcia fazowego o +7,5% lub -7,5% po stronie zasilania napięciem 22 kV, co w efekcie daje oddziaływanie 24-pulsowe na sieć zasilającą dwóch prostowników, z których każdy ma układ 12-pulsowy (wstępne analizy wykazały możliwość przekroczenia dopuszczalnych poziomów dla 11 i 13 harmonicznej w kablowych sieciach zasilających 22 kV);

- transformatory w podstacjach naziemnych są wykonane jako olejowe, w podziemnych żywiczne, ze względu na wysokie wymagania bezpieczeństwa przeciwpożarowego;

- wyłączniki szybkie o zdolności łączeniowej 100 kA ze sterowanymi mikroprocesorem wyzwalaczami nadprądowymi, przystawkami i ochroną termiczną, umożliwiały to rozróżnienie prądów rozruchu od prądów zwarć, dodatkowo stosowana jest ochrona podnapięciowa, co jest istotne ze względu na wprowadzenie taboru z rekuperacją energii;
- nowy odcinek miał być częściowo zasilany przez jedną ze starszych podstacji sąsiedniej linii, na której nie kursuje tabor z rekuperacją energii. Mogło to spowodować w czasie rekuperacji zwiększenie poziomu napięcia w sieci zasilającej tabor starego typu powyżej wartości dopuszczalnych (co z kolei groziło przekroczeniem dopuszczalnych prędkości) – próby rozwiązania tego problemu poprzez modyfikację systemu sterowania ruchem nie okazały się możliwe, dlatego zastosowano rozdzielenie układów zasilania nowej i starej linii;
- zapotrzebowanie mocy szacowane jest na poziomie 55 MW, z czego 14 MW na potrzeby trakcyjne, 100% rezerwę zapewnia zasilanie z dwóch punktów, o mocy 85 MVA każdy, co nie było uzasadnione aktualnym zapotrzebowaniem mocy, ale dawało rezerwę na wzrost potrzeb w przyszłości.

System transportu miejskiego na estakadzie w Bangkoku (BERTS)

Wykorzystując estakadę istniejącej linii kolejowej zaproponowano uzyskanie linii kolei aglomeracyjnej, nad którą poprowadzona będzie trzypasmowa autostrada. Pierwsza faza projektu obejmowała 45 km odcinek linii w aglomeracji Bangkoku, zelektryfikowanej w systemie jednofazowym 25 kV, potrzeby nietrakcyjne zasilane napięciem 3–22 kV, zasilanych z trzech podstacji energetycznych 230 kV o mocy zwarciowej 10000 MVA. Wstępne założenia ruchowe przewidywały czterowagonowe składy pociągów z następstwem co 3 min, docelowa zdolność przepustowa – składy 9-wagonowe co 2 min. W późniejszym okresie przewiduje się elektryfikację linii pasażerskich i towarowych, przebiegających w pobliżu linii aglomeracyjnej. Wybór napięcia zasilania podstacji energetycznej 230 kV wynikał z dostępności i uwarunkowań techniczno-ekonomicznych. Pierwotne koncepcje przewidywały zastosowanie systemu 750 V DC z trzeciej szyny. Jednak po przeprowadzeniu analiz wybrano system 25 kV ze względu na:

- zgodność z systemem stosowanym na kolejach;
 - eliminację rozdzielczych kabli podziemnych;
 - brak zagrożenia od prądów błądzących;
 - zwiększenie niezawodności;
 - znaczne oszczędności w nakładach inwestycyjnych i kosztach funkcjonowania, np. większa efektywność rekuperacji (dłuższe sekcje zasilania), nie ma konieczności stosowania falowników (tak jak w podstacjach prądu stałego) aby wykorzystać energię w wewnętrznej sieci prądu przemiennego (bez zwrotu do sieci publicznej), lżejsza sieć trakcyjna, mniejsza liczba podstacji (mogą znajdować się poza centrum miasta).
- Należało jednak mieć na uwadze wady tego systemu:
- asymetrię wprowadzaną do systemu zasilającego (stąd wymóg napięcia zasilania 230 kV) i wymagany wysoki poziom mocy zwarciowej (10000 MVA), co pozwoliło uniknąć stosowania urządzeń do symetryzacji obciążeń (szacowana asymetria na poziomie 0,4% w warunkach normalnych i 0,8% w warunkach awaryjnych), przy wartościach dopuszczalnych 2% przez minutę i 1% przez 30 min (zalecenia brytyjskie); dla porównania proszę zwrócić uwagę na asymetrię przekraczającą 2,5% na poziomie napię-

cia 15 kV na szynach SN w postaci tramwajowej w Polsce – rys. 18),

- zwiększenie masy taboru (transformatory), co powoduje zwiększenie zużycia energii, będzie ono jednak kompensowane zmniejszeniem strat;
- zakłócenia od harmonicznych – zastosowanie przekształtników 4QS umożliwia wyeliminowanie pewnych, najbardziej niekorzystnych harmonicznych (np. 5. czy 7.); obliczono, że najbardziej znaczące harmoniczne to 17. i 3. przy rekuperacji;
- wahania napięcia w sieci zasilającej przy zmianach obciążenia trakcyjnego – wysoki poziom napięcia zasilania 230 kV i mocy zwarciowej zapewnił, że nie będą przekraczane dopuszczalne wartości 3% (zalecenia brytyjskie), z obliczeń uzyskano maksymalnie 0,64%;
- zakłócenia elektromagnetyczne – wewnątrz konstrukcji żelbetonowych natężenie pola elektrycznego od sieci trakcyjnej było minimalne, na peronach i na otwartych odcinkach nie przekraczało 1 kV/m przy dopuszczalnych wartościach (IRPA) 5 kV/m; natężenie pola magnetycznego zależy od wartości prądu i konfiguracji sieci, poprowadzenie przewodów powrotnych w pobliżu przewodu zasilającego i ograniczenie wartości prądu pobieranego z podstacji do 2 kA umożliwiło uzyskanie wartości 20 μ T na peronach i 1 μ T w odległości 25 m od sieci trakcyjnej, bez stosowania transformatorów odsysających typu *booster* (dopuszczalne według IRPA – 100 μ T); urządzenia kolejowe powinny być odporne na zakłócenia tej wartości, inne urządzenia mogą być zakłócane polem magnetycznym już o wartości powyżej 1 μ T;
- zwiększone wymagania co do wymiarów, izolacji i zabezpieczeń;
- system 25 kV zwiększa napięcia między szynami a ziemią; poziom prądów zwarcia sieci zasilającej 230 kV sięga 40 kA, spowodowało to konieczność zwiększenia przekrojów oraz liczby połączeń uziemiających szyn i konstrukcji aby uzyskać odpowiednio małe napięcia dotykowe i krokowe w warunkach awaryjnych.

Podsumowanie

W ostatnim okresie realizowanych jest w Polsce wiele projektów współfinansowanych z UE, dotyczących modernizacji tras i taboru tramwajowego (Elbląg, Kraków, Warszawa, Łódź, Wrocław). W ramach tych projektów modyfikowane są – w miarę dostępnych środków – układy zasilania elektroenergetycznego. Jest to niezwykle istotne, biorąc pod uwagę stopień wyeksploatowania urządzeń w wielu systemach tramwajowych (rys. 21, 22). Projektanci i służby eksploatacyjne systemów transportu zelektryfikowanego często orientują się tylko w ich własnych, wewnętrznych problemach, bez uwzględniania wzajemnych sprzężeń i oddziaływań między taborem, siecią zasilającą, systemami sterowania i sygnalizacji oraz otaczającym środowiskiem. Prawidłowe podejście wymaga kompleksowego traktowania systemu elektroenergetyki trakcyjnej, z uwzględnieniem wieloaspektowości zjawisk występujących w każdym z podsystemów.

Niekiedy organizowane są przetargi z podziałem na oddzielne zadania dla sieci trakcyjnej, torowiska, sieci kablowych czy podstacji. Wykonawcy poszczególnych zadań, dążąc do minimalizacji kosztów, nie traktują elektroenergetyki trakcyjnej całościowo, nie zawsze dokonują analizy układu zasilania po modernizacji i opracowania studium, wymaganego normą PN-EN 50122-2, co może odbijać się na późniejszym funkcjonowaniu zmodernizowa-



Rys. 21. Wyeksploatowany transformator w jednej z podstacji tramwajowych



Rys. 22. Aparatura prądu przemiennego także wymaga wymiany



Rys. 23. Sieć kabli powrotnych zaprojektowana nieodpowiednio (góra – nierównomiernie obciążenie) i prawidłowo (dół – równomierne obciążenie)

nego systemu (rys. 23 – przykład sieci kabli powrotnych zaprojektowanej nieodpowiednio i prawidłowo) i występowaniu zagrożeń dla infrastruktury technicznej, np. z powodu upływu z szyn prądów błądzących. Wiele zależy tu od profesjonalizmu osób przygotowujących specyfikacje techniczne do przetargu i nadzorujących jego realizację oraz firm opracowujących projekty i prowadzących prace wykonawcze. Jeśli jedynym kryterium wyboru wykonawcy jest cena, można mieć wątpliwości co do końcowego efektu.



Literatura

- [1] Afanasjew S.A., Dotaberidze G.P., Szewczenko W.W.: *Kontaktynje i kabelnyje sieti tramwajew i trolejbusow*. Moskwa, Izd. Transport 1979.
- [2] Buchanan I.D.: *Computer-based control of London Underground's power network*. Power Eng. Journal, July 1990.
- [3] Delattre D., Seiler W.: *Electrification of an urban transit system*. Revue Generale des Chemins de Fer, 7/8 1983, 102e).
- [4] Dziuba W.: *Prądy błądzące*. Wydawnictwo Iel. Warszawa, 1995.
- [5] Mierzejewski L., Szelağ A.: *Sieci powrotne zelektryfikowanego szynowego transportu miejskiego*. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowoczesne rozwiązania techniczne w komunikacji tramwajowej”, Wrocław, 31 V–2 VI 2000.
- [6] Mierzejewski L., Szelağ A., Drażek Z.: *Niezawodność, dyspozycyjność i oszczędność energii w systemach trakcji elektrycznej dużych aglomeracji miejskich*. Projekt bad. KBN nr 8 S 502 030 05, 1993–1996
- [7] Mierzejewski L., Szelağ A.: *Układy zasilania zelektryfikowanego transportu miejskiego*. Technika Transportu Szynowego 11/1999.
- [8] Mierzejewski L., A. Szelağ A.: *Wpływ taboru z rekuperacją energii na warunki funkcjonowania systemu elektroenergetyki trakcyjnej prądu stałego*. V Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Modern Electric Traction” MET'2001, Gdańsk, 30 V–2 VI 2001.
- [9] Murphy F.: *Power system design for the Jubilee Line extension*. IEE Conf. Developments in Mass Transit Systems, London, 20–23 April 1998.
- [10] Podoski J.: *Tramwaj szybki – projektowanie i eksploatacja*. WKŁ Warszawa, 1980.
- [11] Szelağ A.: *Obliczanie tramwajowej sieci powrotnej w celu zmniejszenia upływu z szyn jezdnych prądów błądzących*. TRAM'96, Konferencja Naukowo-Techniczna Trakcja elektryczna w miastach, Gdańsk, 1996.
- [12] Wallis P.R.: *Bangkok elevated road and train system 25kV traction voltage for a mass transit railway*. IEE Conf. Developments in Mass Transit Systems, London, 20–23 April 1998.
- [13] Watanebe K., Kono S.: *Recent Technology for DC Traction Power Supply Systems*. Hitachi Review Vol. 37 (1988), No 6.
- [13] Wdowiak J., Mierzejewski L., Szelağ A.: *Projektowanie układów zasilania trakcji elektrycznej*. WPW 1993.
- [14] Worwood M.J.: *Developments in DC traction power rectifiers*. IEE Conf. Developments in Mass Transit Systems, London, 20–23 April 1998.
- [15] Rowe E., Young T.: *The Case for Compact Power*. Mass Transit, May/June 1995.
- [16] Yasunami M.: *Transportation Systems: Their Technical Trends*. Hitachi Review Vol. 40 (1991), No 4.
- [17] Mierzejewski L., Szelağ A.: *Rozwiązania techniczne elektroenergetyki transportu szynowego na liniach regionalnych i aglomeracyjnych*. Materiały Konferencji MET 2001, IX 2001.

Autorzy:

dr. inż. Leszek Mierzejewski

prof. Adam Szelağ

Zakład Trakcji Elektrycznej, Instytut Maszyn Elektrycznych
Politechnika Warszawska