

Tadeusz Maciołek

Zmniejszanie zużycia przewodów sieci trakcyjnej dużych prędkości poprzez zmiany konstrukcji pantografów i sieci trakcyjnej

Rozwój elektrycznego transportu sieciowego – w szczególności szynowego – polega głównie na zwiększeniu prędkości pociągów i niezawodności pracy. Zapewnienie energii dla ruchu szybkich pojazdów szynowych opiera się najczęściej na dostarczaniu energii do pojazdu z nieruchomej górnej sieci trakcyjnej poprzez ślizgający się po niej pantograf. Sposób ten jest nadal podstawowym sposobem przekazywania energii do ruchomego pojazdu zarówno w stosunkowo wolnych tramwajach, jak i najszybszych pociągach (rekordowa prędkość prawie 575 km/h).

Konstruowane sieci trakcyjne i pantografy, dostosowane do współpracy z nimi, mają na celu spełnienie podstawowego warunku – przy założonej prędkości przejazdu pojazdu elektrycznego i poborze określonego prądu z sieci trakcyjnej powinna zostać zapewniona duża niezawodność i trwałość zarówno sieci trakcyjnej, jak i pantografu. Wiąże się to z minimalizowaniem kosztów systemu dostarczania energii i przede wszystkim kosztów jednostkowych transportu.

Czynniki wpływające na zużycie przewodów

W prawidłowo konserwowanej sieci trakcyjnej na jej trwałość ma istotny wpływ eksploatacyjne zużywanie przewodów jezdnych. Zużycie przewodów następuje przez:

- ścieranie się przewodu pod wpływem tarcia nakładki ślizgacza, co prowadzi do zmniejszenia przekroju przewodów, a po przekroczeniu minimalnych dopuszczalnych wartości przewody należy wymienić; decyduje o tym miejscowe maksymalne starcie przewodu lub średnia wielkość przekroju przewodów.
- miejscowe przegrzania i nadtopienia przewodu pod wpływem łuku elektrycznego, występującego podczas odrywania ślizgacza od przewodu podczas przepływu prądu, co może również prowadzić do powierzchniowej rekryształizacji miedzi i zmniejszenia jej twardości.

Oba zjawiska potęgują się przy dużej zmienności siły nacisku nakładki ślizgacza na przewody jezdne, nawet jeśli średnia siła nacisku pozostaje bez zmian. W miejscach nadtopienia pojawiają się nierówności na przewodzie, powodując pogłębienie zmian siły nacisku podczas następnym przejazdach. W miejscach sieci, w których występuje zwiększenie siły nacisku powtarzające się przy kolejnych przejazdach, również ścieranie przewodu jezdnych jest szybsze.

Jakość współpracy pantografu z siecią podczas przejazdu określają różne wskaźniki [6]:

- zmienność siły nacisku w styku

- zakres pionowych ruchów pantografu podczas współpracy
- uniesienie przewodu w czasie przejazdu
- względny czas przerw stykowych.

Uwzględniając te wskaźniki w funkcjonowaniu sieci trakcyjnej i pantografu należy:

- zapewnić stałą siłę nacisku nakładek stykowych ślizgacza na przewody jezdne, czyli minimalizować zmiany tej siły
- minimalizować ruchy sieci i pantografu podczas przejazdu pociągu.

Zmiany siły nacisku wynikają z ruchów ślizgacza pantografu i sieci podczas przejazdu pociągu. Punkt styku kół z szynami porusza się wraz z pociągiem pionowo w minimalnym zakresie, co wynika z dużej sztywności szyn. Punkt styku nakładki ślizgacza z przewodami przemieszcza się pionowo w zakresie kilkudziesięciu do ponad 100 mm na długości przęsła (rzędu 60 m) jeżeli przewód w stanie statycznym – bez nacisku pantografu, jest równoległy do szyn. Pantograf ma za zadanie zapewnienie stałego docisku, kompensowanie ruchów pionowych pudła pojazdu na którym jest zainstalowany, jak i zmian uniesień sieci. Oddziaływania dynamiczne, a zatem przyspieszenia działające na ślizgacz, które zmieniają statyczną siłę docisku, zwiększają się z kwadratem prędkości. Ze zwiększaniem prędkości eksploatacyjnej ważne są działania zmniejszające te oddziaływania. Przy prędkości 300 km/h *quasi* statyczna siła nacisku – z uwzględnieniem siły unoszenia aerodynamicznego – powinna wynosić 160 N w sieciach prądu przemiennego [8]

Trendy rozwoju sieci trakcyjnych

W konstrukcji sieci trakcyjnej najistotniejsze jest zapewnienie prostoliniowej (równoległej do szyn) trajektorii ruchu punktu styku nakładki ślizgacza pantografu z siecią. Podstawowym zadaniem pantografu jest wtedy kompensacja ruchów pociągu i zmiennych oddziaływań aerodynamicznych. Jednocześnie istotne jest minimalizowanie ruchu przewodów sieci i zwiększenie możliwych przyspieszeń reakcji sieci na zmiany nacisku. W sieciach trakcyjnych dużych prędkości zastosowano trzy podstawowe metody zapewnienia poprawnej współpracy pantografu z siecią.

- Maksymalizacja naciągu przewodów jezdnych i liny nośnej przy ograniczaniu ich masy

Prowadzi to do zmniejszenia elastyczności – usztywnienia sieci trakcyjnej, szczególnie w środku przęsła. Zmniejsza się zakres uniesień przewodów pod wpływem sił nacisku nakładek stykowych. Przy niezmiennionej masie przewodów następuje szybsze obniżanie się przewodu po zmniejszeniu nacisku. Uniesienie przewodu pod wpływem siły stykowej następuje na większej długości sieci. Większe naciągi zwiększają prędkość rozchodzenia

się drgań w sieci. Wymagane jest wykonanie przewodów jezdnych z odpowiednich materiałów o wytrzymałości na rozrywanie większych niż czystej miedzi.

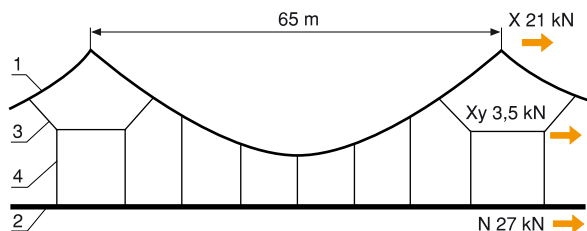
■ Wyrównywanie elastyczności wzdłuż przęsła

Zastosowanie podwieszenia typu Y zwiększa elastyczność sieci trakcyjnej w pobliżu konstrukcji wsporczej. Rozwiązanie to utrudnia regulację sieci.

■ Zwiększenie prostoliniowej trajektorii ruchu punktu styku ślizgacza i przewodów jezdnych

Wprowadzony zostaje zwis wstępny przewodów o wielkości 0,5 do 1‰ długości przęsła w środku przęsła, gdzie uniesienie przewodów jest największe.

Ze względu na komplikacje konstrukcji i regulacji sieci nie stosuje się w Europie wieszaków tłumiących. Obecnie eksploatowane szybkie pasażerskie pociągi elektryczne rozwijają prędkość do 330 km/h, a wkrótce będą osiągały 360 km/h. Wymagane moce do napędu zespolonych pociągów przekraczają 10 MW. Ze względu na dążenie do ograniczania prądu w sieciach trakcyjnych jedynie stosowanie napięcia systemowego 25 kV lub 15 kV umożliwia skuteczne zasilanie szybkiego pociągu. Dzięki wysokiemu napięciu maksymalny prąd pobierany z sieci przez pantograf jest mniejszy niż 1000 A. Przy tej wielkości prądu roboczego wystarczające jest stosowanie konstrukcji sieci tańcuchowej z jednym przewodem jezdny. Wymagania TSI [8] określają ten prąd na 1500 A przy napięciu 25 kV. Zapewnienie izolacji sieci trakcyjnej od konstrukcji wsporczych nie zależy od prędkości i nie jest to czynnik w istotny sposób wpływający na konstrukcję sieci. Na rysunku 1 przedstawiono przykładową niemiecką sieć prądu przemiennego dla dużych prędkości.



Rys. 1. Sieć tańcuchowa prądu przemiennego Re 330
1 - lina nośna, brąz 120 mm², 2 - przewód jezdny, miedź stopowa 120 mm², 3 - lina Y, brąz 35 mm², 4 - wieszak, brąz 16 mm²

Przewody

Ze względu na odporność na czynniki środowiskowe, wymagane przewodnictwo elektryczne i odporność na ścieranie, na przewody sieci trakcyjnej stosuje się miedź. Zwiększenie naciągów w sieci trakcyjnej jest możliwe tylko przez zwiększenie wytrzymałości mechanicznej materiału. Zwiększenie wytrzymałości uzyskuje się przez modyfikację miedzi za pomocą domieszek. Ponieważ domieszki miedzi zmniejszają jej przewodność, to ilość domieszek musi być ograniczona.

Zastosowanie miedzi stopowej z dodatkiem magnezu umożliwia zwiększenie zastosowanego naprężenia do 225 N/mm². Naprężenie to jest dwukrotnie większe, niż stosowane w polskich sieciach trakcyjnych.

W sieci Re330, stosowanej w kolejach DB w Niemczech, zastosowano przewody z CuMg 120 mm², które umożliwiły zastosowanie naciągu 27 kN. Również na liny nośne stosuje się brąz co umożliwia zwiększenie naciągu.

Zwiększona twardość przewodów ogranicza szybkość ścierania przewodów.

W polskich sieciach trakcyjnych, np. YC150-2CS150, wprowadza się przewody srebrowe. Większy przekrój przewodów jezdnych, sięgający 150 mm² (sieć polska, hiszpańska) również wpływa na zwiększenie sztywności sieci i wydłużenie ich eksploatacji.

Przewody srebrowe CuAg0,1 zastosowane w Polsce mają domieszkę srebra do 0,1%

Przewody srebrowe w stosunku do miedzianych wykazują [3]:

- mniejsze ścieranie o 15–22% w układzie anizotropowym bez prądu, a przy ścieraniu wzdłuż kierunku ciągnięcia drutu do 30–45% przy przepływie prądu.
- wyższą temperaturę rekrytalizacji połówkowej 350°C w porównaniu do 210°C
- wygrzewane przez 1000 godz. zaczynają tracić wytrzymałość od 200°C, a miedziane od 60°C
- większą wytrzymałość na rozrywanie o 6%
- mniejszy 4–10% współczynnik tarcia w stanie po zgnieciu
- mniejsze pełzanie 10-letnie o 13%
- większą rezystancję o 1,5%.

W efekcie przewody srebrowe w warunkach eksploatacyjnych zapewniają znacznie większą trwałość sieci ze względu na większą odporność na ścieranie, przegrzanie, możliwość zastosowania większego naciągu. Zwiększenie trwałości w warunkach eksploatacyjnych może być znaczne ze względu na większą termiczną odporność przewodów srebrowych.

Trendy rozwoju pantografów

W szybkich pociągach stosuje się pantografy o konstrukcjach połówkowych. Związane jest to z mniejszą masą konstrukcji w stosunku do konstrukcji pełnej. Pantograf połówkowy ma mniejszy opór aerodynamiczny niż pantograf pełny, co przekłada się na mniejsze zużycie energii. Przy prędkości 300 km/h moc strat, spowodowanych oporem aerodynamicznym, różni się o kilkadziesiąt kilowatów. Tłumienie ruchów ramy odbieraka odbywa się za pomocą amortyzatorów ramy dolnej lub odrębnych dla ramy górnej i dolnej.

Sterowany napęd pneumatyczny wykorzystywany jest do unoszenia, jak również zapewnia siłę nacisku nakładek do sieci, zmienną w zależności od prędkości.

W celu ograniczenia możliwości awarii po uszkodzeniu nakładki lub ślizgacza stosowany jest układ automatycznego opuszczania pantografu po pęknięciu lub przetarciu nakładki stykowej. Na rysunku 6 przedstawiono rozwiązanie ślizgacza i górnych ramion pantografu dla prędkości 400 km/h

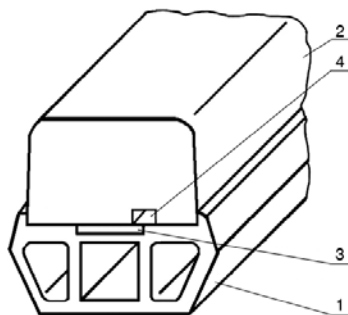
Ślizgacze

Dążąc do zmniejszenia masy ślizgaczy producenci zastosowali na konstrukcję nośną zamiast stalowych profile aluminiowe z wieloma komorami [10, 11, 12]. Ślizgacz taki stanowi element wymienny z przyklejoną nakładką stykową. Kanał powietrzny stosowany jest w pantografach, które są wyposażone w układ automatycznego opuszczania pantografu po uszkodzeniu ślizgacza. W nowoczesnych rozwiązaniach ślizgaczy to masa nakładek stykowych stanowi większość masy całego ślizgacza. Masa profili aluminiowych wynosi 0,6 do 0,8 kg/m, a masa nakładek – 1,1 do 4 kg/m. Dalsze zmniejszenie masy ślizgaczy ograniczone jest

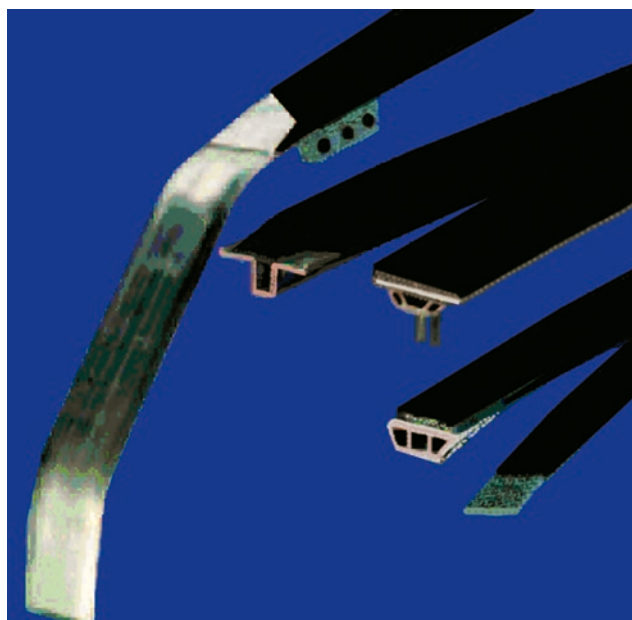
wytrzymałością stopów aluminium jak i przede wszystkim masą nakładki. Zmniejszenie długości ślizgacza do sieci trakcyjnych interoperacyjnych do 1600 mm (w Polsce, Niemczech – 2 m) również wpłynęło na zmniejszenie jego masy

Nakładki stykowe

Materiały nakładek stykowych decydują w dużym stopniu o jakości współpracy pantografu z siecią. Stosowane są nakładki miedziane, grafitowe i spiekane na bazie grafitu. Ze względu na przewodnictwo elektryczne i ciepłne najlepsze są nakładki miedziane. W celu poprawy właściwości miedzi stosuje się dodatki cyrkonu, manganu.



Rys. 2. Ślizgacz zespolony z nakładką
1 - profil aluminiowy, 2 - nakładka grafitowa, 3 - kontakt elektryczny, 4 - kanał powietrzny



Rys. 3. Przykładowe profile ślizgaczy z nakładkami firmy Schunk

Miedź sprawdza się szczególnie w wysokoprądowych systemach prądu stałego. Wadą nakładek miedzianych jest silne ścieranie przewodów jezdnych dwa do trzech razy większe niż podczas eksploatacji nakładek grafitowych w tych samych warunkach. Z tego względu stosowanie ich jest ograniczone. Nakładki miedziane zapewniają niskie straty energii w styku z przewodem [6]. Spadek napięcia około 0,25 V. Nakładki grafitowe w mniejszym stopniu ścierają przewody ze względu na właściwości smarne. Nakładki grafitowe powodują większe straty podczas przepływu prądu przez styk ze względu na spadek napięcia do 1,5 V. Grozi to silnym punktowym nagraniem przewodu przy poborze prądu podczas postoju. Stosowanie spieków grafitu z miedzią, otworem

zapewnia niższą ścieralność przewodów, a jednocześnie obniża spadek napięcia w styku z przewodem do 0,5–1 V. Nakładki grafitowe mimo silniejszego nagrzewania są odporniejsze na łuk elektryczny – nie występuje zjawisko nadtopienia.

Nakładki stykowe, zależnie od wymagań, mogą mieć różne właściwości w zależności od zawartości dodatków metalicznych [10,12]. Otów, mimo że poprawia właściwości smarne, stosowany jest w nakładkach w ograniczonym zakresie [12]

Tabela 1

Przykładowe właściwości materiałów nakładek firmy Morgan

		Materiał nakładki		
		węglowo-grafitowa	grafitowa metalizowana	spiekana silnie metalizowana
Gęstość prądu w ruchu	[A/mm ²]	6	10	20
Gęstość prądu na postoju	[A/mm ²]	1	2	5
Rezystancja właściwa	[μΩm]	38	10	<1
Masa właściwa	[g/cm ³]	1,6	2,4	3,2

Rezystancja właściwa miedzi jest wielokrotnie mniejsza i wynosi 0,018 μΩm.

Ze względu na bardzo małą odporność aluminium na łuk elektryczny proponowane są rozwiązania, w których nakładka grafitowa ostania profil aluminiowy. Nakładka może mieć profil odwróconego U i ostania również boki profilu aluminiowego. Opracowano również ślizgacz węglowy z wewnętrznym profilem metalowym na rys poniżej [12]. Wadą takiego ślizgacza jest jego duża masa. Ścieranie powierzchni górnej powoduje zmianę grubości i elastyczności całej belki ślizgacza, co może prowadzić do pęknięcia dolnej warstwy grafitu.



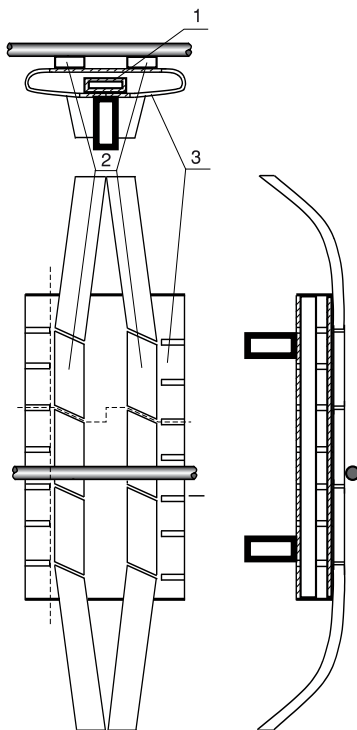
Rys. 4. Ślizgacz grafitowy z wewnętrznym metalowym profilem

Jakość współpracy pantografu z siecią będzie rostać wraz ze zużywaniem nakładek ślizgacza. Masa nakładek zmniejsza się z powodu zużycia a jednocześnie zwiększa się siła nacisku na przewody. Stosunek siły docisku do masy nieodsprężynowanej się zwiększa. Jednocześnie zmniejszenie masy nie jest kompensowane w układzie siły unoszenia pantografu. Stosunek siły nacisku do masy nieodsprężynowanej może podczas eksploatacji zwiększyć się o ponad 50%. Powoduje to niepotrzebne zwiększenie zużycia przewodów jezdnych. Celowe jest wprowadzenie zmniejszenia siły nacisku pantografu wraz ze zużywaniem się nakładek stykowych. Wystarczające jest zmniejszenie siły docisku

wraz ze zwiększającym się przebiegiem nakładek stykowych. Może to zmniejszyć zużycie przewodów jezdnych o kilkadziesiąt procent, bez dodatkowych nakładów, a tylko przez regulację siły uniesienia.

Elastyczne zawieszenie nakładek

Dalszy rozwój ślizgaczy pantografów o sztywnej konstrukcji napotyka na barierę materiałową. Aby poprawić dynamikę działania ślizgacza proponuje się zastosowanie dzielonych nakładek elastycznie mocowanych do ślizgacza.



Rys. 5. Ślizgacz elastyczny z dzielonymi nakładkami zmniejsza masę
1 - profil nośny, 2 - nakładki stykowe, 3 - elastyczne zawieszenie nakładek

Rozwiązanie to w skokowy sposób zmniejsza masę nieodprężynowaną, stykającą się z przewodem jezdny. Ze względu na małą masę krótkiej nakładki i elastyczność jej mocowania poprawia się dynamika współpracy ślizgacza z przewodem. Zmiany siły nacisku w punkcie styku znacznie maleją. Pozwoli to na zmniejszenie średniej siły nacisku i zużycia przewodów oraz nakładek pantografu, lub zwiększenie prędkości, przy której odbiór prądu będzie poprawny. Rozwiązanie to może być stosowane zarówno dla nakładek miedzianych, jak i grafitowych.

Wprowadzane nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne sieci trakcyjnej i pantografu umożliwiły osiągnięcie przez pociąg TGV prędkości prawie 575 km/h. Dalsze zmiany konstrukcji, poprawa parametrów materiałów spraw, że nie będzie to tylko rekord, ale eksploatowane pociągi będą jeździły coraz szybciej, a sieć trakcyjna – poprzez pantograf – niezawodnie będzie dostarczała energię do pociągu.



Rys. 6. Ślizgacz i rama górna pantografu do 400 km/h firmy Schunk

Literatura

- [1] Kaniewski M., Rojek A., Knych T., Mamala A.: *Badania nowej sieci trakcyjnej YC120-2CS150 i YC150-2CS150*. XII Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2006. Zakopane X 2006.
- [2] Kaniewski M., Maciołek T.: *Sieci dużych prędkości jazdy na PKP*. Materiały konferencyjne MET. Warszawa 2003.
- [3] Kawecki A.: *Dobór cech materiałowych przewodów jezdnych przeznaczonych do szybkich pojazdów szynowych*. Praca doktorska AGH. Kraków 2006
- [4] Maciołek T. i zespół: *Rozwiązania konstrukcyjne sieci trakcyjnej w rejonie rozjazdu dla $v=250$ km/h dla linii CMK*. Warszawa 1997.
- [5] Maciołek T., Rostkowski W.: *Weiterentwicklung der Oberleitungen in Polen*. Elektrische Bahnen 1-2/2006.
- [6] Roman Z.: *Współpraca dynamiczna odbieraka prądu z siecią trakcyjną i jej wpływ na warunki odbioru prądu poprzez silnie obciążony zestyk ślizgowy*. Rozprawa habilitacyjna. Prace COBiRTK Z75/76. Warszawa 1980.
- [7] Siemiński T., Jarosz T.: *Odbieraki prądu i ich współpraca z siecią jezdnią*. WKŁ 1993.
- [8] Dyrektywa 96/48 (art. 5(3)b) i z nią związane TSI (technical specification for interoperability). Energy; (2002/733/WE).
- [9] *Standardy techniczne do prędkości 200/250 km/h*. Zasilanie. CNTK Warszawa 2003.
- [10] *Morgan Carbon Current Collector*. Materiały informacyjne producenta Morgan Carbon
- [11] *Schunk Bahn- und Industrietechnik GmbH*. Materiały informacyjne producenta.
- [12] *Schunk Kolehstofftechnik*. Materiały informacyjne GmbH.

Autor

dr inż. Tadeusz Maciołek

Politechnika Warszawska, Instytut Maszyn Elektrycznych