

Tadeusz Knych, Artur Rojek

Stanowisko do badań odporności przewodów jezdnych na ścieranie

Wzrastające wymagania stawiane sieciom trakcyjnym są bezpośrednio związane i wynikają z ciągle wzrastającej prędkości jazdy pociągów. Obecnie prędkości jazdy wynoszą powyżej 250 km/h. Dochodzą do tego dodatkowo wymagania dotyczące pewności pracy sieci jezdnej linii kolejowych wchodzących w skład europejskiego układu połączeń w zakresie obowiązywania odpowiednich umów. Stąd zapotrzebowanie na nowe rozwiązania techniczne i technologiczne w obrębie całego środowiska sieci trakcyjnych, którego centralny i najtrudniejszy element stanowi przewód jezdny o wysokich i ściśle określonych właściwościach.

Wymagania techniczne stawiane przewodom jezdnych definiowane są siłą zrywającą oraz wydłużeniem przy zrywaniu, twardością, technologiczną plastycznością kontrolowaną w testach na skręcanie, przeginanie i nawijanie, podwyższoną wartością temperatury rekrytalizacji oraz wysoką przewodnością.

Wymagania te są ściśle określone w normie PN-E-90090:96, a także w odpowiednich normach zagranicznych. Istnieje duże zróżnicowanie parametrów kształtu i wymiarów oraz własności przewodów jezdnych opracowanych przez różne zagraniczne wydawnictwa normalizacyjne. Nie ujęty przepisami jest natomiast problem ścieralności przewodu – parametr, który decyduje o jego żywotności.

Identyfikacja zużytego przewodu jezdnego – charakterystyka problemu

O tym, że przewody jezdne znajdują się w centrum zainteresowania światowej energetyki kolejowej świadczyć może nieustająca aktywność zawodowa największych laboratoriów świata w dziedzinie praktycznego rozwiązywania różnych problemów z zakresu eksploatacji sieci trakcyjnej. Na rysunku 1 przedstawiono liczbę patentów, jakie ukazały się w tej dziedzinie w ostatnich 20. latach. Poniżej przedstawiono wybraną grupę ich twórców.

Furukawa Electric Co Ltd

Hitachi Cable Ltd Railway Technical Res Inst
2001–1997

Furukawa Electric Co Ltd

Mitsubishi Cable Ind Ltd Fujikura Ltd
East Japan Railway Co 1996–1992

Furukawa Electric Co Ltd

Fujikura Ltd Railway Technical Res Inst
1991–1987

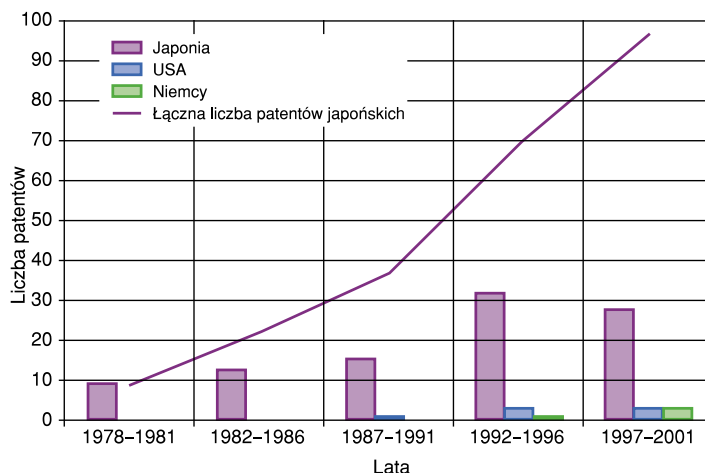
Furukawa Electric Co Ltd

Hitachi Densen Sumitomo Electric Ind Ltd
1986–1982

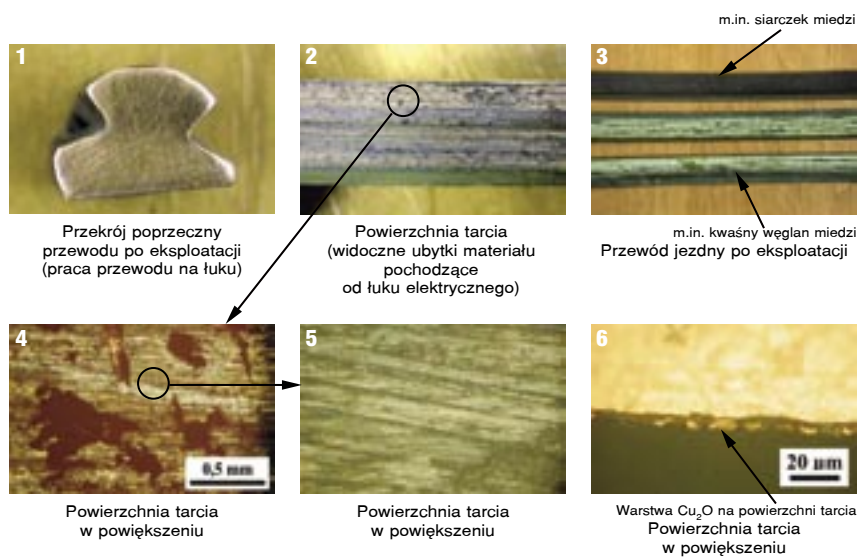
Furukawa Electric Co Ltd

Hitachi Cable Ltd Sumitomo Electric Ind Ltd Showa
Electric Wire & Cable Co Ltd 1981–1978.

Na fotografii 1 przedstawiono obrazy zużycia przewodu jezdnego Djp 100 po jedenastu latach eksploatacji, z których wynika, że przewód jezdny może zużywać się nierównomiernie, a na powierzchni tarcia występują wgłębienia, które są pustymi miejscami po wypalonym tukiem elektrycznym materiale (fot. 1.2 i jego powiększenie – fot. 1.4). Miejsca te wypełnione są smarem, ścierem miedzianym i różnymi zanieczyszczeniami środowiska pracy przewodu i mogą stanowić rodzaj lokalnych smarownic, albo miejsc o podwyższonym współczynniku tarcia. Na fotogra-



Rys. 1. Udział wiodących krajów w publikacji patentów dotyczących metod wytwarzania i badań przewodów jezdnych w latach 1978–2001 (na podstawie dostępnych danych)



Fot. 1. Widok przewodu jezdnego Djp100 po jedenastu latach eksploatacji

fii 1.6 przedstawiono zużyty przewód w przekroju poprzecznym do powierzchni tarcia, na którym ujawnia się bardzo cienka warstwa tlenku miedzi Cu_2O (twardość w skali Mosa 8). Fotografia 1.5 ilustruje klasyczne rysy tarcia, odzwierciedlające kąt zukośowania przewodu względem osi toru. Jedynie górna powierzchnia przewodu (fot. 1.3) jako jedyna nie podlegająca ścieraniu ujawnia charakter chemiczny środowiska pracy przewodu. W analizowanym przykładzie zaobserwowano w jednym przypadku kwaśne węglany miedzi (kolor zielony) w drugim zaś ciemny nalot mogący świadczyć o obecności siarczku lub tlenku miedzi.

Mechaniczne warunki pracy przewodu

Podstawowy problem stanowi zużywanie się przewodu jezdnego w wyniku ślizgania się po nim odbieraka prądu. Ograniczanie tego procesu sprowadza się w praktyce do wdrażania coraz to nowszych metod obniżania współczynnika tarcia pary przewód jezdny - nakładka stykowa ślizgacza oraz odpornych na ścieranie przewodów. Część pracy tarcia zamienia się na ciepło, które wraz z ciepłem Joula powoduje wzrost temperatury przewodu jezdne-

go, a to pogarsza warunki pracy styku, przyspiesza i zwiększa moc procesów reologicznych (pełzanie, relaksacja naprężeń) oraz może zmniejszać wytrzymałość przewodu na rozciąganie. Procesy, o których mowa, zależą od gatunku materiału, z którego jest przewód wykonany (miedź, miedź stopowa) oraz jego własności fizycznych i mechanicznych, jakości powierzchni i stanu mechanicznego (sił naciągu). Ich intensywność istotnie zależy od prędkości jazdy, sił nacisku odbieraka prądu na przewód, wartości prądu oraz ciągle zmieniających się warunków otoczenia.

Czynniki wpływające na eksploatacyjne zużycie przewodu jezdnego – wytyczne do konstrukcji stanowiska do badań odporności przewodów jezdnych na ścieranie

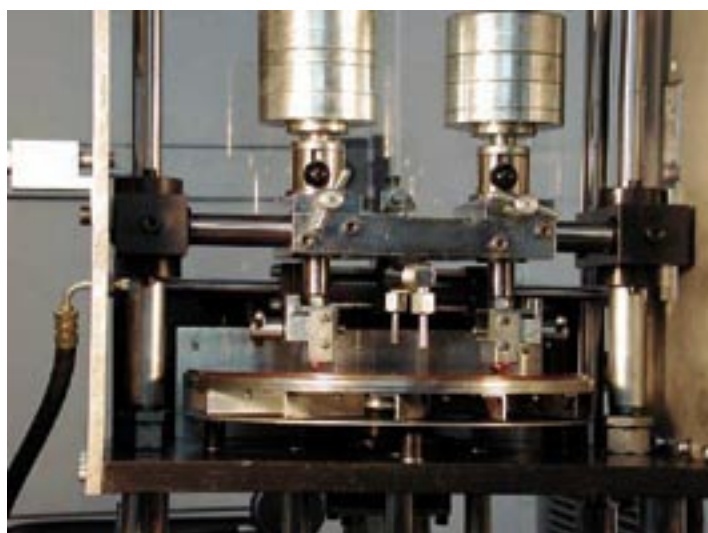
Najważniejszymi parametrami, odwzorowującymi rzeczywiste warunki pracy przewodu jezdnego typu trolley w trakcji kolejowej, są:

- temperatura otoczenia;
- temperatura pracy przewodu;
- nacisk odbieraka prądu na przewód;
- materiał nakładki ślizgacza i przewodu jezdnego;
- geometria przewodu jezdnego i odbieraka prądu;
- gęstość prądu;
- napięcie zasilania;
- cykle obciążenia, tj. rozruch (duży prąd, mała prędkość), jazda (mały prąd, duża prędkość), hamowania (zwrot energii do sieci), postój (pobór prądu bez przemieszczania odbieraka prądu);
- obecność zabrudzeń z powietrza atmosferycznego;
- obecność wody;
- szron, sadź;
- agresywne środowisko;
- naciąg wzdłużny;
- przesuw poprzeczny odbieraka prądu;
- zanieczyszczenie przewodu jezdnego z lokomotyw spaliniowych (związki siarki, sadza);
- rodzaj i jakość smaru.

Konstrukcja urządzenia do badania trwałości eksploatacyjnej przewodu jezdnego – z uwagi na bardzo złożony i różnorodny charakter parametrów – z konieczności musi prowadzić do odwzorowania pewnych zjawisk badaniami równoważnymi z punktu widzenia technicznego, które będą mogły być zrealizowane w laboratorium i pozwolą na ocenę trwałości przewodu w realnym, jednorodnym cyklu pracy z prognozą na 30 do 50 lat. Należy podkreślić, że najlepiej odwzorowujące rzeczywistość eksploatacyjną badania poligonowe byłyby niezwykle kosztowne, czasochłonne i trudne do realizacji. W warunkach poligonowych, lub w warunkach normalnej eksploatacji pojazdów trakcyjnych, mogą być jedynie pozyskane dane uzupełniające, parametry i charakterystyki niezbędne do stworzenia poprawnego modelu urządzenia i jego weryfikacji.

Rodzaje badań stanowiskowych – wytyczne do programu badań

Stanowisko do badań ścieralności powinno umożliwić przeprowadzenie programu badań podstawowych, dotyczących wpływu parametrów i warunków pracy sieci trakcyjnej na intensywność zużycia przewodu jezdnego.



Fot. 2. Widok części roboczej stanowiska do badań ścieralności



Fot. 3. Przykładowe rodzaje próbek przewodów jezdnych poddanych badaniom odporności na ścieranie



Fot. 4. Próbkę przewodu jezdnego $CuAg0,1$: od prawej – próbka nowa, po 10 i 20 tysiącach km drogi tarcia

1. Wpływ prędkości jazdy

Prędkość jazdy jest podstawowym parametrem eksploatacyjnym trakcji, decydującym o zużyciu przewodu jezdnego. Nie jest możliwa *a priori* jednoznaczna odpowiedź dotycząca wpływu prędkości na intensywność zużycia przewodu, z uwagi na fakt, że wzrost prędkości oznacza z jednej strony wzrost dynamiki pracy układu przewód jezdny – nakładka stykowa ślizgacza oraz wzrost dynamicznej składowej sił nacisku odbieraka na przewód, z drugiej zaś korzystną zmianę warunków chłodzenia miejsca styku trącej pary. Warunki te prowadzą do powstawania powierzchniowej warstwy tlenku miedzi, która zmienia odporność przewodu na ścieranie. Tak więc zmiana prędkości może w konsekwencji prowadzić do liniowych zmian zużycia, a nie wykluczone, że nawet do jego zmniejszenia. Stanowisko badawcze powinno pozwolić na przeprowadzenie wpływu prędkości na zużycie w zakresie do 300 km/h.

2. Wpływ wartości i rodzaju siły docisku

Zwiększenie sił docisku dwóch trących ciał o stałej powierzchni styku intensyfikuje ubytek materiału. W przypadku układu przewód jezdny–nakładka stykowa ślizgacza mamy do czynienia (w trakcie pracy układu) – z uwagi na kształt przewodu – ze zwiększeniem powierzchni styku współpracującej pary, a więc ze zmniejszeniem nacisku jednostkowego. Zmniejszenie przekroju poprzecznego przewodu powinno więc następować w stopniu coraz to mniejszym w miarę postępowania procesu ścierania. Stanowisko do badań odporności przewodów jezdnych na ścieranie powinno umożliwić uzyskiwanie statycznego nacisku o wartości do 200 N oraz nacisku o zmiennej wartości w czasie, umożliwiającą odwzorowanie dynamiki jazdy pociągu.

3. Wpływ rodzaju pary trącej przewód jezdny – nakładka stykowa ślizgacza odbieraka prądu i rodzaju smaru

Klasycznym układem trącym w warunkach polskich jest układ miedź–miedź, rozdzielony smarem grafitowanym. Badania powinny obejmować wpływ rodzaju materiału nakładki stykowej oraz rodzaju smaru na zużycie przewodu. W szczególności chodzi o to, aby określić warunki charakteryzujące się jak najmniejszą wartością współczynnika tarcia z jednej strony oraz określić gatunek i stan mechaniczny materiału przewodu najbardziej odporny na ścieranie z drugiej strony.

4. Wpływ warunków otoczenia (wiatr, woda)

Badania wpływu warunków otoczenia (zwłaszcza wiatru i wody) na rezystancję styku oraz warunki tarcia na powierzchni kontaktu stanowią podstawę szacowania żywotności przewodu, zwłaszcza w warunkach znanych długoterminowych prognoz pogody.

5. Wpływ natężenia prądu

Wpływ wymienionych parametrów (mechanicznych i warunków otoczenia) na ubytek przekroju poprzecznego przewodu jest istotnie intensyfikowany przepływem prądu. Chodzi tutaj zwłaszcza o istotność wpływu ciepła Joula na proces tarcia oraz wpływu drgań układu, które mogą prowadzić do utraty kontaktu pary trącej i pojawienia się łuku elektrycznego. Parametrem istotnie regulującym wielkość zużycia będzie w tym przypadku natężenie prądu, którego wartość zależy od parametrów jazdy oraz parametrów poruszającego się taboru.

Stanowiska do badań ścieralności przewodów

Stanowisko do badań podstawowych

Widok ogólny części roboczej stanowiska do badań podstawowych przedstawiono na fotografii 2. Stanowisko pozwala na przeprowadzenie badań umożliwiających określenie wpływu podstawowych parametrów charakteryzujących warunki pracy przewodu jezdnego na jego mechaniczne zużycie. W szczególności chodzi o wpływ rodzaju materiału pary trącej, wpływ rodzaju smaru, wyznaczenie wartości współczynnika tarcia i temperatury na ubytek masy przewodu. Uzyskane wielkości mają stanowić podstawę do budowy modelu zużycia przewodu, którego ogólną postać można przedstawić następująco:

$$U = f(p, A, \mu, HB, R_{02} \dots)$$

Stanowisko składa się z wirującej tarczy umocowanej poprzez łożysko na wale silnika, którego obroty ustalone są za pomocą regulatora zmian częstotliwości (falownika). Na tarczy umocowana jest płyta miedziana, która ślizga się po dwóch próbkach przewodu jezdnego, umieszczonych w głowicach wykonujących ruch posuwisto zwrotny wzdłuż promienia tarczy. Głowice umożliwiają grawitacyjny docisk próbek do tarczy oraz dowolne ustawienie osi długich badanych próbek przewodu względem obwodu tarczy, co pozwala na swobodną zmianę kierunku wypadkowej wektora prędkości, a tym samym wektora sił tarcia. Smar podawany jest ze smarownicy bezpośrednio na powierzchnię tarczy w okolicy przewodów w ustalonych odstępach czasu. W trakcie trwania procesu ścierania mierzona jest temperatura przewodu za pomocą termopary umieszczonej wewnątrz badanej próbki przewodu jezdnego. Miarą odporności na ścieranie jest ubytek masy badanej próbki przewodu, który jest identyczny z ubytkiem powierzchni przekroju poprzecznego przewodu.

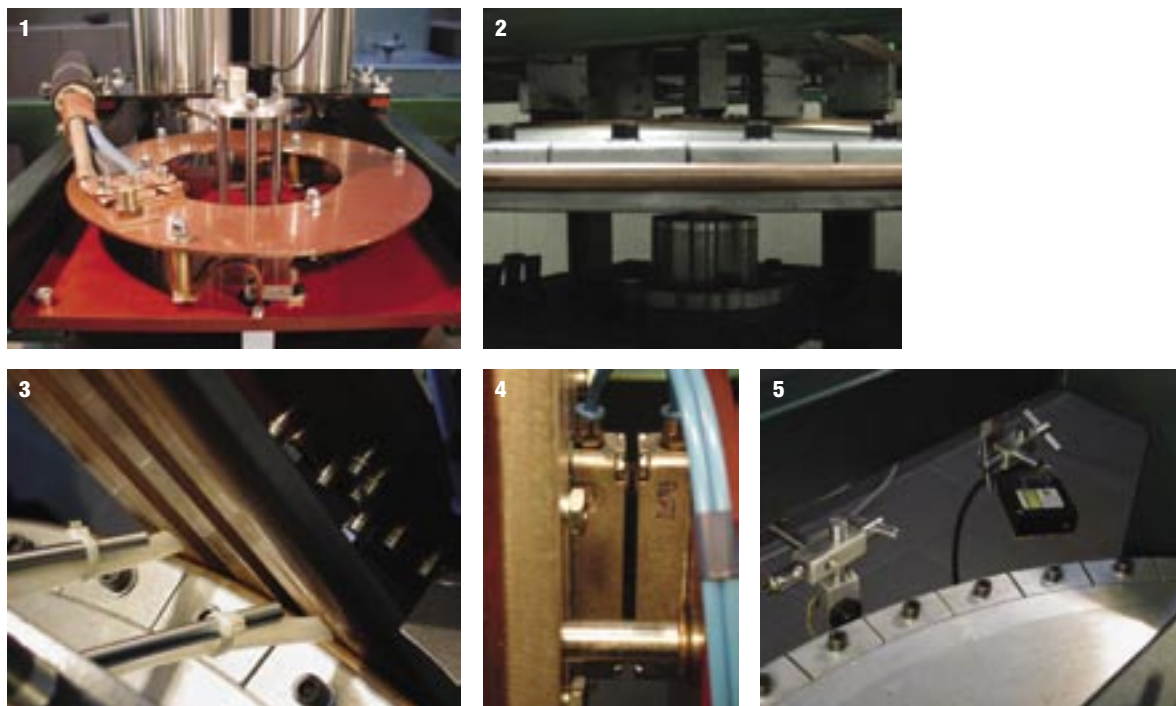
Przykłady rodzajów próbek przewodu jezdnego, przeznaczonych do badań odporności na ścieranie, przedstawiono na fotografiach 3 i 4.

Stanowisko do badań eksploatacyjnych ścieralności przewodów

Widok ogólny stanowiska do badań eksploatacyjnych przewodów jezdnych oraz jego najważniejszych podzespołów przedstawiono na fotografiach 5 i 6. Na fotografii 5 przedstawiono widok stanowiska z przodu i od tyłu. Na fotografii 5.2 widoczny jest pneumatyczny układ sterowania odbierakiem prądu, na fotografii 6.1 – podłączenie prądowe oraz czujnik liczby obrotów, 6.2 – koło



Fot. 5. Widok ogólny stanowiska do badań ścieralności przewodu jezdnego
1 – ujęcie z przodu, 2 – ujęcie od tyłu



Fot. 6. Stanowisko w zbliżeniu

1 - podłączenie prądowe, 2 - koło z przewodem jezdnym, 3 - przewód jezdny w kontakcie z nakładką stykową ślizgacza, 4 - pneumatyczne siłowniki realizujące docisk ślizgacza do przewodu, 5 - bezstykowe czujniki do pomiaru temperatury i zużycia przewodu

z zamontowanym przewodem, a 6.3 – przewód jezdny w kontakcie z nakładką stykową. Na fotografii 6.4 przedstawiono pneumatyczne siłowniki realizujące docisk ślizgacza do przewodu, a 6.5 – bezstykowe czujniki do pomiaru temperatury i zużycia przewodu. Na fotografii 6.3 uwidoczno końcówkę układu podawania smaru. Stanowisko zostało zaprojektowane w ramach prac badawczo-rozwojowych projektu celowego, dofinansowanego przez Komitet Badań Naukowych i stanowi własność zakładów kablowych Telefonika – KFK S.A.

Koncepcja stanowiska polega na wykorzystaniu poziomo usytuowanego obracającego się koła, z zamocowanym na jego obwodzie przewodzie, częścią jezdną na zewnątrz (fot. 6.2). Do przewodu dociskany jest ślizgacz odbieraka prądu wykonujący ruch posuwisto-zwrotny (fot. 6.3). Ślizgacz dociskany jest do przewodu za pomocą układu pneumatycznego (fot. 6.4), umożliwiającego zadawanie stałej lub zmiennej w czasie siły docisku. Przewód smarowany jest za pomocą specjalnych dozowników (fot. 6.3). Do przewodu może być doprowadzany prąd (fot. 6.1). Pomiar zużycia odbywa się za pomocą laserowego czujnika pomiaru przemieszczenia (fot. 6.5). Przez dobór prędkości obro-

wej koła i prędkości ruchu odbieraka realizuje się kąt zukosowania przewodu względem osi toru.

Podstawowe parametry techniczne stanowiska do badań ścieralności przewodów jezdnych zamieszczono w tablicy 1.

Uruchamianie stanowiska rozpoczyna się od włączenia stacji zasilania pneumatycznego. Dopiero po uzyskaniu sygnału o osiągnięciu wymaganej wartości ciśnienia w zbiornikach możliwe jest uruchomienie zespołu napędowego. Uruchamianie to przebiega w sposób kontrolowany, zgodnie z zadanym programem sterującym. Po osiągnięciu obrotów nominalnych (nominalnej prędkości obwodowej), przewidzianych dla danego programu badawczego może być uruchomiony zespół odbieraka prądu. Najpierw podawany jest sygnał sterujący do serworozdzielacza elektropneumatycznego, który powoduje uruchomienie siłownika bez tłoczyskowego. Po rozpoczęciu przez głowicę ślizgacza pionowego ruchu, który rozpoznawany jest czujnikiem przemieszczenia sprzężonym z wózkiem siłownika, podawany jest sygnał sterujący do elektropneumatycznego zaworu ciśnieniowego. W wyniku tego zasilane są siłowniki krótkoskokowe, które powodują wywieranie nacisku tarczy dociskowej (ślizgacza) z elektrodami na obracające się

Tablica 1

koło z zamocowanym przewodem jezdym. Po osiągnięciu no-minalnej wartości tej siły, określanej na podstawie wartości ciśnienia mierzonego na zasilaniu siłowników krótkoskokowych, rozpoczyna się ostatnia sekwencja uruchamiania stanowiska. Polega ona na uruchomieniu układu prądotwórczego, służącego do zasilania pary ślizgacz – badany przewód jezdny prądem elektrycznym o zadanym natężeniu przepływu, np. 1500 A. Po uruchomieniu tego zasilania rozpoczyna się

Podstawowe parametry techniczne stanowiska

Parametr	Zakres	
Maksymalny skok ślizgacza	[mm]	850
Maksymalna prędkość liniowa (obwodowa) przewodu jezdnego	[km/h]	300
Maksymalna statyczna siła docisku ślizgacza (z możliwością pulsacji)	[N]	200
Maksymalne obciążenie prądowe układu prądotwórczego	[A]	2000
Moc silnika elektrycznego do napędu koła	[kW]	3
Moc silnika elektrycznego sprężarki	[kW]	4
Moc silnika elektrycznego do napędu pompy hydraulicznej w układzie smarowania	[kW]	0,37

właściwy cykl badawczy. Jednocześnie w stanie czuwania znajduje się układ smarowania.

Cykl badawczy obejmuje ten zakres czasu pracy stanowiska, podczas którego zapewnione są wszystkie wymagane parametry jego pracy, a w szczególności:

- prędkość obrotowa koła,
 - skok głowicy zespołu odbieraka prądu oraz jej prędkość,
 - siła docisku ślizgacza odbieraka prądu do badanego przewodu (stała lub pulsująca),
 - natężenie prądu elektrycznego,
 - temperatury przewodu jezdnego
- oraz zapewnione jest smarowanie trących powierzchni elektrod i przewodu.

Długość cyklu badawczego wyznaczona jest przez liczbę przejazdów koła względem elektrod ślizgacza, co sprowadza się do sumarycznej liczby wykonanych przez to koło obrotów.

Zainstalowane na stanowisku czujniki umożliwiają pomiar i rejestrację następujących, podstawowych wielkości:

- prędkości obrotowej koła,
 - natężenia prądu,
 - temperatury przewodu jezdnego,
 - zużycia powierzchni trącej przewodu,
 - siły docisku ślizgacza,
- a ponadto drgań stanowiska w celu kontroli poprawności jego pracy.

Miarą zużycia przewodu będzie liczba obrotów koła (przejazdów ślizgacza), przypadająca na milimetr kwadratowy przekroju poprzecznego przewodu jezdnego.

Zatrzymanie stanowiska musi być realizowane w kolejności odwrotnej do jego uruchamiania. Bezwzględnie musi być ono rozpoczęte od odłączenia zespołu prądotwórczego. Dopiero po całkowitym zaniku prądu może być zwolniony docisk ślizgacza odbieraka prądu do koła. Następnie zatrzymywany jest siłownik beztłoczkowy. Ostatnim etapem zatrzymywania jest kontrolowane wyhamowanie napędu tarczy kołowej.

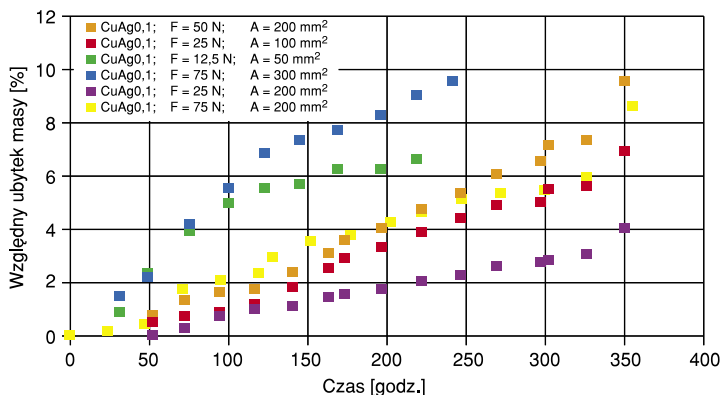
Awaryjne stany pracy stanowiska występują wtedy, gdy:

- nastąpi przekroczenie zadanej prędkości obrotowej koła poza dopuszczalny zakres tolerancji,
- nastąpi nadmierne nagrzanie przewodu jezdnego lub wybranych elementów stanowiska,
- wystąpi przerwa między przewodem a nakładkami ślizgowymi odbieraka prądu,
- przekroczona zostanie maksymalna założona amplituda drgań przewodu jezdnego względem ślizgacza odbieraka prądu,
- spadnie ciśnienie w stacji zasilania pneumatycznego poniżej dopuszczalnej wartości,
- drgania konstrukcji stanowiska przekroczą dopuszczalne wartości.

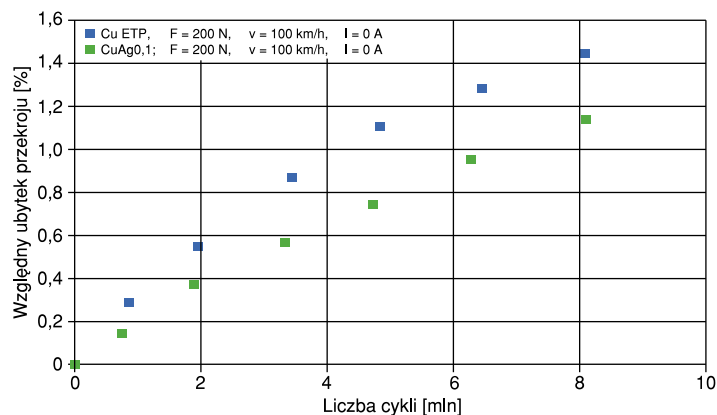
Przykładowe wyniki badań

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono przykładowe wyniki badań ścieralności przewodów jezdnych wykonanych z miedzi w różnych gatunkach. Rysunek 2 ilustruje wpływ powierzchni tarcia i siły nacisku próbki na odbierak na zużycie przewodów. Badania przeprowadzono na stanowisku do badań podstawowych przedstawionym na fotografii 2.

Na rysunku 3 przedstawiono badania porównawcze ubytku przekroju przewodu Djp100 (wykonanego z miedzi elektrolitycznej) i Djp S100 (wykonanego z miedzi w gat. CuAg0,1).



Rys. 2. Wpływ powierzchni tarcia przy stałym nacisku jednostkowym na ubytek masy w funkcji czasu podczas ścierania materiału CuAg0,1; $v = 60 \text{ km/h}$



Rys. 3. Względny ubytek przekroju podczas ścierania przewodów z miedzi w gat. Cu ETP i CuAg0,1; $v = 100 \text{ km/h}$, nacisk $F = 200 \text{ N}$, prąd $I_1 = 0 \text{ A}$

Podsumowanie

Celem niniejszego artykułu było przedstawienie problematyki dotyczącej zużywania się przewodów jezdnych na skutek ścierania o nakładki stykowe ślizgacza odbieraka prądu oraz wpływu warunków pracy przewodu na wielkość tego zużycia. Badania zużycia prowadzi się na ogół w warunkach polowych – wymaga to jednakże ciągłego lub okresowego monitorowania sieci trakcyjnej. W przypadku wprowadzania nowych rodzajów materiału na przewód lub nakładki stykowe bądź nowych rodzajów smarów badania zużycia można prowadzić w warunkach laboratoryjnych na specjalnie do tego celu zaprojektowanych i wykonanych stanowiskach badawczych. Istota takiego postępowania polega na tym, aby warunki prowadzenia testu przybliżały w jak największym stopniu rzeczywistość.

Przedstawione w artykule stanowisko pozwala na uzyskiwanie prędkości do 300 km/h, dzięki wykorzystaniu idei obracającego się koła. Stanowisko pozwala ponadto na odwzorowanie warunków rzeczywistych (prąd, dynamika nacisku, smarowanie, warunki atmosferyczne itp.), dzięki czemu jest praktycznym narzędziem przyspieszonych badań odporności na ścieranie pary przewodów jezdnych – nakładka ślizgacza odbieraka prądu.

□

Autorzy

dr hab. inż. Tadeusz Knych – Akademia Górniczo-Hutnicza
dr inż. Artur Rojek – Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa