

Sławomir JUDEK*
Leszek JARZĘBOWICZ*

STANOWISKO DO SKANOWANIA 3D NAKŁADEK ODBIERAKÓW PRĄDU LOKOMOTYW

Prawidłowy odbiór prądu z sieci jezdnej trakcji elektrycznej jest jednym z podstawowych elementów niezawodnego funkcjonowania zelektryfikowanego transportu szynowego, zwłaszcza przy dużych prędkościach jazdy. Na jakość odbioru prądu wpływa konstrukcja sieci jezdnej i odbieraków prądu oraz stan techniczny i regulacja tych dwóch elementów. O jakości współpracy odbieraka prądu z siecią jezdnią zasadniczo decydują: nacisk odbieraka na sieć oraz stan powierzchni nakładek ślizgowych. W referacie przedstawiono innowacyjne stanowisko do diagnostyki nakładek ślizgowych odbieraków prądu wykorzystujące technikę obrazowania 3D. Układ przetestowano w warunkach laboratoryjnych oraz podczas eksploatacji próbnej na linii kolejowej. Potwierdzono potencjał wdrożeniowy zaproponowanej metody.

1. WPROWADZENIE

Pojazd elektryczny jest specyficznym przykładem ruchomego odbiornika energii elektrycznej. Pojazdy elektryczne dzielimy, ze względu na sposób zasilania, na sieciowe i autonomiczne. Pojazdy sieciowe pobierają energię z sieci trakcyjnej za pomocą odbieraka prądu. Jednym z jego podzespołów jest ślizgacz, na którym znajdują się nakładki ślizgowe, czyli elementy bezpośrednio współpracujące z przewodem jezdny, i ich mocowania. Odbierak powinien spełniać określone wymagania, tak aby zapewnić ciągłość zasilania, a co za tym idzie niezawodność i bezpieczeństwo transportu. W odniesieniu do kolei funkcjonują Techniczne Specyfikacje dla Interoperacyjności (TSI) wprowadzone dla państw Unii Europejskiej na mocy Decyzji Komisji nr 2012/464/UE. W myśl tych przepisów materiał, z którego wykonana jest nakładka ślizgowa, powinien być mechanicznie i elektrycznie kompatybilny z materiałem przewodu jezdny, aby uniknąć nadmiernego ścierania powierzchni przewodów jezdnych oraz nakładek. Do współpracy z przewodami jezdny wykonanymi z miedzi lub stopów miedzi stosuje się nakładki węglowe lub węglowe impregnowane specjalnymi domieszkami [5, 6].

* Politechnika Gdańska.

Eksplloatowane do niedawna w Polsce nakładki ślizgowe kolejowych odbieraków prądu były wykonywane ze stopów miedzi. Umożliwiały one odbiór z sieci dużych prądów trakcyjnych. Wadą nakładek miedzianych jest stosunkowo duże zużycie ściernie (nawet w przypadku stosowania smaru) zarówno przewodów jezdnych, jak i ich samych. Na początku 2011 r. przeprowadzono kompleksową zmianę typu nakładek ślizgowych z miedzianych na węglowe. Dotyczyła ona wszystkich pojazdów korzystających z infrastruktury kolejowej, którą zarządza spółka Polskie Linie Kolejowe.

Z przeprowadzonych przez Instytut Kolejnictwa badań wynika, że w warunkach polskich zużycie nakładek węglowych może osiągać poziom ponad 0,2 mm na każde 1000 km przebiegu pojazdu. Zużycie to jest jeszcze intensywniejsze w okresie zimowym [4]. Na podstawie danych eksploatacyjnych pochodzących od znaczących przewoźników wynika, że dystans, jaki lokomotywa może pokonać z jednym kompletem nakładek, wynosi przeciętnie 30 000 km, co przekłada się na około 3,5 miesięczny okres użytkowania [2].

Na rys. 1 przedstawiono widok nakładek o różnym stopniu zużycia, wynikającego zarówno z normalnych warunków eksploatacyjnych, jak i z sytuacji awaryjnych.



Rys. 1. Widok eksploatowanych nakładek ślizgowych, gdzie: a – nadmierne zużycie, b – całkowite uszkodzenie

2. OCENA STANU NAKŁADEK ŚLIZGOWYCH

Nakładki ślizgowe są wymiennymi częściami ślizgacza odbieraka prądu, znajdującymi się w bezpośrednim kontakcie z przewodem jezdny, i z tego powodu ulegającymi zużyciu. Zużycie nakładki może przebiegać jednostajnie, jak również w sposób dynamiczny (rys. 1). Nagły ubytek znacznych fragmentów nakładki, bądź jej całkowite zniszczenie, spowodowane jest najczęściej nieprawidłową współpracą odbieraka prądu z siecią jezdną. O jakości tej współpracy, zwłaszcza przy dużych prędkościach jazdy, w praktyce decydują: nacisk odbieraka na sieć, stan powierzchni nakładek ślizgowych, konstrukcja sieci jezdnej i konstrukcja odbieraków prądu oraz stan techniczny utrzymania i regulacja tych dwóch elementów systemu odbioru prądu. Na jakość utrzymania w istotny sposób wpływa wykorzystanie diagnostyki technicznej.

Niektóre zarządy kolejowe stosują rozwiązania włączone w system diagnostyki pokładowej, polegające na wyposażeniu odbieraków w czujniki pomiarowe. Są to

jednak rozwiązania kosztowne i ograniczone tylko do określonej kategorii pojazdów. Pojawiają się także propozycje budowy systemu punktów kontrolnych, rozmieszczonych w różnych miejscach sieci kolejowej, odbierających sygnały z czujników zintegrowanych z nakładką stykową, zarządzanych centralnie. Jednym ze sposobów automatycznego monitorowania uszkodzenia nakładek węglowych jest wykorzystanie komór ciśnieniowych lub światłowodów umieszczonych wewnątrz nakładki tak, że jej zużycie lub uszkodzenie powoduje rozszczelnienie komory ciśnieniowej bądź uszkodzenie włókien optycznych. Zaistnienie takiej sytuacji jest wykrywane i interpretowane jako uszkodzenie. Prowadzi to zazwyczaj do automatycznego opuszczenia odbieraka. Wadą tej metody jest wykrywanie tylko całkowitego uszkodzenia lub zużycia nakładki.

W rozwiązaniach światowych pojawiają się także układy do monitoringu stanu odbieraków prądu wykorzystujących techniki wizyjne. W pracy [3] opisano rozwiązanie automatycznej kontroli, w której wykorzystano kilka kamer do przechwytywania profili nakładek i liniowe oświetlacze laserowe do precyzyjnego zlokalizowania pantografu w przestrzeni. Analiza obrazów pozwala na określenie dla każdej z nakładek wybranych rozmiarów oraz oszacowanie procentowego ubytku materiału. Istotną wadą tego rozwiązania jest niezwykle skomplikowany układ optyczno-mechaniczny. Wymusza to zastosowanie wysublimowanych technik synchronizacji zdarzeń tak, aby możliwe było uzyskanie trójwymiarowej geometrii ślizgacza na podstawie obrazów dwuwymiarowych. To implikuje bardzo złożony algorytm obróbki danych wizyjnych.

Innym rozwiązaniem jest system Pancam [1]. Do oceny stanu nakładki wykorzystywana jest jedna kamera. Dodatkowa kamera służy do kontroli nabeżników ślizgacza. Techniki analizy oparte są na dwuwymiarowym przetwarzaniu obrazu. System jest prostszy i mniej funkcjonalny niż opisywany w [3]. Główną wadą tego rozwiązania jest konieczność stosowania specjalnych ekranów eliminujących wszelkie elementy tła obrazu przechwytywanego przez kamerę. Ekran służy równocześnie do zwiększenia kontrastu pomiędzy zarysem pantografu a pozostałymi elementami fotografowanej sceny. W wyniku przeprowadzonych prób średnio aż w 20% przypadków nie było możliwe postawienie poprawnej diagnozy stanu technicznego odbieraka prądu.

W Polsce kontrola stanu nakładek odbieraków prądu odbywa się okresowo podczas przeglądu lokomotywy w zakładach taboru przewoźników. Polega ona na ręcznym pomiarze grubości nakładki w najbardziej zużytych obszarze. Dokumentacje techniczno-ruchowe precyzują minimalną grubość, przy której należy wymienić nakładki. Jednocześnie dopuszczalne jest wydłużenie okresu eksploatacji w przypadku zebrania większego doświadczenia ruchowego przez użytkującego. Zaleca się jednoczesną wymianę pary nakładek przynależnych do jednego ślizgacza. Oprócz oceny stopnia zużycia materiału czynnego, konieczna jest także kontrola wykruszeń, wyżłobień, pęknięć oraz uszkodzeń listwy nośnej. Dopuszczalne są wykruszenia nieprzekraczające 30% powierzchni nakładki. W

przypadku wyżłobień istotny jest ich kształt i położenie. Najbardziej niebezpieczne są wyżłobienia powstające w poprzek nakładki. Dla pęknięć istotne jest ich położenie, liczba oraz rozmiar. Uszkodzenie listwy nośnej powstają na skutek wyładowań łukowych (rys. 1). Głębokość nadpaleń o charakterze wyłącznie lokalnym, nie może być większa niż 30% grubości ścianki profilu korpusu ślizgacza [7].

Jak wynika z przytoczonych zaleceń zawartych w dokumentacji ruchowej nakładek węglowych ich inspekcja jest czasochłonna i kosztowna, a także uzależniona od subiektywnej oceny diagnosty realizującego pomiar.

3. METODA POMIARU 3D

Zastosowanie metod wizyjnych w różnych dziedzinach techniki intensywnie się rozwija. Proces ten jest coraz bardziej dynamiczny ze względu na ciągły postęp w technice cyfrowych przetworników obrazu, co z kolei powoduje obniżenie kosztów wdrożenia i eksploatacji. Obecnie metody pozyskiwania i przetwarzania obrazów dwuwymiarowych są dość dobrze rozpoznane i szeroko stosowane w przemyśle. Równoległe z techniką 2D zaczęło rozwijać się obrazowanie 3D. Znane są sposoby odwzorowania trójwymiarowego obiektów na podstawie wielokrotnego fotografowania sceny pod różnymi kątami, bądź wykorzystaniu tzw. kamer stereo.

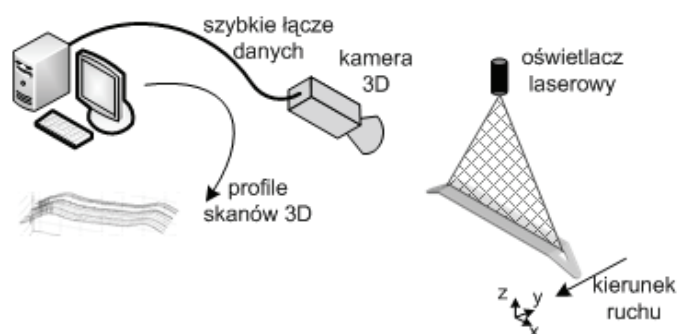
W prezentowanym rozwiązaniu zaproponowano system monitoringu i diagnostyki stanu technicznego nakładek ślizgowych odbieraków prądu oparty na analizie obrazów tych nakładek, uzyskiwanych podczas przejazdu pojazdu szynowego przez stanowisko pomiarowe z szybką kamerą 3D.

Do odwzorowania kształtu i wymiarów obiektu wykorzystywana jest zasada triangulacji laserowej. Obiekt jest oświetlony liniowym źródłem światła laserowego z jednego kierunku, a kamera rejestruje obraz obiektu z innego kierunku (rys. 2). Linia lasera pojawiająca się na powierzchni obiektu rejestrowana jest poprzez matrycę kamery. Na tej podstawie, z wykorzystaniem zaimplementowanych w mikroprocesorze kamery parametryzowanych algorytmów, określana jest wysokość każdego punktu przekroju, przez analizę przebiegu linii lasera na matrycy światłoczułej. Wynikiem pomiaru jest profil, zawierający jedną wartość dla każdego mierzonego punktu wzdłuż przekroju – na przykład wysokość obiektu wzdłuż jej szerokości. W celu pomiaru trzeciego wymiaru obiektu musi on poruszać się względem układu kamery i oświetlacza. Wynik takiego skanowania jest zatem zbiorem profili, gdzie każdy profil zawiera pomiar przekroju w pewnym miejscu wzdłuż kierunku przemieszczania.

Wartości pomiarowe generowane przez kamerę 3D nie są skalibrowane, tzn.:

- wartości wysokości (współrzędne z) podane są w postaci liczby, zależnej od numerów wierszy lub pikseli zlokalizowanych na matrycy światłoczułej,

- lokalizacja punktu wzdłuż przekroju (współrzędna x) podawana jest jako liczba reprezentująca kolumnę czujnika, w której punkt zmierzono,
- lokalizacja punktu wzdłuż kierunku przemieszczania (współrzędna y) jest reprezentowana przez np. kolejny numer pomiaru i przeliczana na podstawie znajomości prędkości przesuwu, bądź bezpośrednio mierzona.



Rys. 2. Metoda pomiaru 3D

W celu uzyskania pomiarów skalibrowanych, tj. współrzędnych i wysokości w milimetrach, trzeba przekształcić współrzędne matrycy kamery na układ współrzędnych rzeczywistych x , y , z . Transformacja ta zależy od wielu czynników, m.in. odległości między kamerą i obiektem, kąta pomiędzy kamerą i laserem i właściwości obiektywu. To odwzorowanie jest opisane za pomocą zależności, z niewielką liczbą dobieralnych parametrów i parametryzowane dwuetapowo. W pierwszej kolejności przeprowadzana jest korekcja zniekształceń wprowadzanych przez optykę obiektywu, a następnie korekta perspektywy.

Zniekształcenia obiektywu korygowane są na podstawie standardowego modelu wielomianowego, za pomocą którego następuje przeliczenie współrzędnych sensora (u , v) do płaszczyzny obiektywu (u' , v').

$$\begin{aligned}
 u' &= u + u_0(c_1 r^2 + c_2 r^4) + 2c_3 u_0 v_0 + c_4(r_2 + 2u_0) \\
 v' &= v + v_0(c_1 r^2 + c_2 r^4) + 2c_3 u_0 v_0 + c_4(r_2 + 2v_0) \\
 u_0 &= u - u_c \\
 v_0 &= v - v_c \\
 r &= \sqrt{u_0^2 + v_0^2}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

gdzie (u_c, v_c) jest środkiem optycznym matrycy i c_1, c_2, c_3, c_4 są parametrami określającymi dystorsję obiektywu. Model ten jest wystarczający dla większości standardowych obiektywów, poza obiektywami szerokokątnymi typu rybie oko. Środek optyczny matrycy należy do tzw. parametrów wewnętrznych, czyli zależnych od własności konstrukcyjnych kamery. Inne typowe wewnętrzne parametry, które mogłyby być uwzględniane w modelu, to niedoskonałości w

montażu lub produkcji matrycy. Oszacowanie współczynników dystorsji odbywa się eksperymentalnie na podstawie skanowania płaskiego elementu wzorcowego.

Korekta perspektywy, czyli odwzorowanie płaszczyzny obiektywu do płaszczyzny, na którą pada światło oświetlacza laserowego, jest tego rodzaju, że oddaje skalę, obrót i perspektywę. Jest ona zdefiniowana przy użyciu współrzędnych jednorodnych jako:

$$\begin{bmatrix} X \\ Z \\ s \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Współrzędne rzeczywiste (x , z) otrzymywane są poprzez wprowadzenie współczynnika normalizacji s :

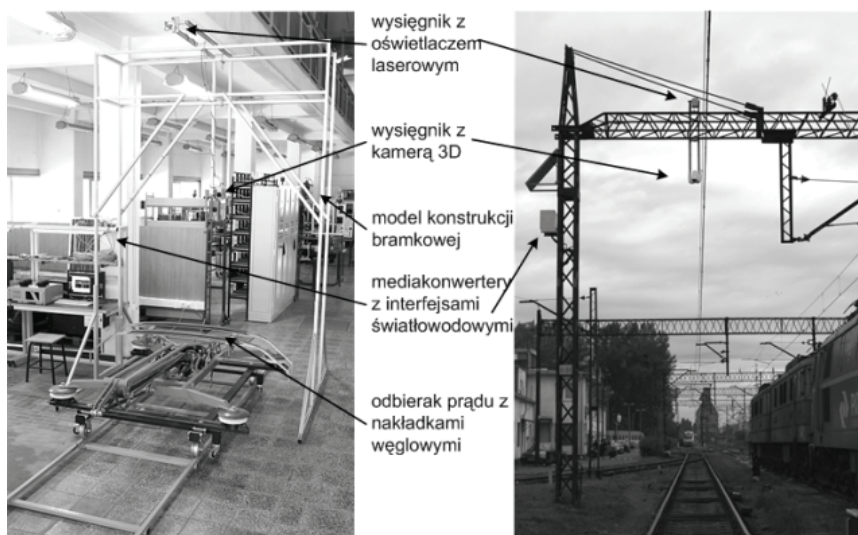
$$x = \frac{X}{s}, \quad y = \frac{Y}{s}. \quad (3)$$

Teoretycznie wszystkie dziewięć współczynników macierzy \mathbf{H} można określić pomiarowo na podstawie jednego skanowania obiektu piłokształtnego o znanych wymiarach. Nie mniej jednak w praktyce wykonuje się ich wiele tak, aby pokryć całkowite pole widzenia kamery.

4. STRUKTURA SPRZĘTOWA STANOWISKA

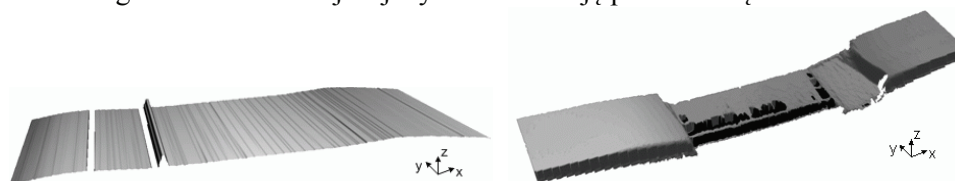
Zgodnie z przedstawioną koncepcją i metodą pomiarową zbudowano stanowisko pomiarowe do monitoringu stanu nakładek ślizgowych [2]. Stanowisko to zostało przetestowane w warunkach laboratoryjnych, a następnie zainstalowane na linii kolejowej. Główny system pomiarowy osadzono na konstrukcji wsporczej sieci trakcyjnej w obszarze wysokiego potencjału (rys. 3). Oprócz pomocniczej konstrukcji nośnej dla kamery 3D oraz oświetlacza laserowego, zamontowano również ogniwo fotowoltaiczne, współpracujące z układem zasilającym, zawierającym buforową baterię akumulatorów elektrochemicznych wraz z niezbędnymi podzespołami kontrolno-sterującymi oraz mediakonwerterami światłowodowymi. System wykrywania przejeżdżającej lokomotywy, jednocześnie realizujący pomiar jej prędkości wraz z kamerą służącą do identyfikacji numeru i typu pojazdu oraz określania, które z odbieraków prądu współpracują z siecią trakcyjną w trakcie przeprowadzania pomiaru, zainstalowano na sąsiedniej konstrukcji wsporczej. Po instalacji i uruchomieniu poszczególnych podsystemów stanowiska, wykonano koordynację układu mocowania kamery 3D i oświetlacza laserowego względem osi toru, a także względem osi odbieraków prądu pojazdów badanych, z uwzględnieniem odsuwu przewodu jezdnego sieci trakcyjnej oraz efektu okluzji światła generowanego przez liniowy oświetlacz laserowy, spowodowanej obecnością liny nośnej.

Uwzględniono również wypieranie sieci trakcyjnej przez współpracujący z nią odbierak prądu.



Rys. 3. Stanowisko monitoringu stanu nakładek ślizgowych odbieraków prądu zainstalowane w warunkach laboratoryjnych oraz terenowych

Po czynnościach montażowo-uruchomieniowych wykonano badanie kilkudziesięciu nakładek odbieraków prądu lokomotyw będących w normalnym ruchu eksploatacyjnym. Przed wykonaniem skanowania 3D lokomotywy poddawane były przeglądowi kontrolnemu, w ramach którego wykonywano oględziny i pomiar ręczny grubości nakładek. Na rys. 4 przedstawiono wizualizację wyniku skanowania nakładki ślizgowej. Stanowi ona odwzorowanie wartości wysokości pozyskanych w procesie pomiarowym. Z punktu widzenia monitoringu stanu nakładek jest jedynie informacją pomocniczą.



Rys. 4. Wizualizacja 3D wyników skanowania nakładek ślizgowych odbieraków prądu

Ważnym elementem stanowiska jest opracowanie algorytmów automatycznej oceny zużycia. Algorytmy przetwarzania danych pomiarowych stanowią warstwę nadrzędną oprogramowania i zostały przedstawione w referacie *Analiza obrazu 3D do oceny stanu zużycia nakładek ślizgowych*.

5. PODSUMOWANIE

W opracowaniu przedstawiono stanowisko systemu monitoringu stanu nakładek ślizgowych odbieraków prądu w warunkach ruchowych na linii kolejowej z wykorzystaniem techniki skanowania 3D. Wizyjne stanowisko diagnostyczne, w sposób znaczący skraca czas potrzebny na przeprowadzenie pomiarów, zapewniając dużą dokładność i powtarzalność uzyskanych wyników.

*Praca powstała w ramach projektu sfinansowanego
ze środków Narodowego Centrum Nauki.*

LITERATURA

- [1] Hamey L. G. C., Watkins T., Yen S. W. T., Pancam: In-Service Inspection of Locomotive Pantographs. Digital Image Computing Techniques and Applications, 9th Biennial Conference of the Australian Pattern Recognition Society on, 2007.
- [2] Jarzębowicz L., Judek S., Karwowski K.; Vision system for monitoring technical condition of current collector strips. SEMTRAK 2012, PiT, Kraków 2012. (in Polish).
- [3] Kin, E.C.W., Pioneer Design in Automatic Pantograph Wear Monitoring. Engineering Integrity, 19, 2006, pp. 12-17.
- [4] Rojek A., Majewski W., Materials for pantograph contact strips of. Electrotechnical News, 04/2010. (in Polish).
- [5] Skibicki J., Electrical vehicles. Part. I. Gdańsk, Wydawnictwo PG, 2010. (in Polish)
- [6] Commission Decision of 23 July 2012 concerning technical specifications for interoperability. (2012/464/EU).
- [7] Operating instructions for use carbon strips. Morgan Carbon Poland, 2007.

3D-SCANNING SYSTEM FOR CURRENT COLLECTORS CONTACT STRIPS

The correct current collection from catenary is one of the fundamental elements of reliable operation of electrified rail transport, especially at high speeds. The proper current collection depends on technical condition and adjustment of both current collectors and catenary. Considering current collectors issues, the main factors are: static force applied by the collector to the catenary and contact strips surface condition. The paper presents an innovative test stand for diagnosing the current collector contact strips with 3D imaging technique. System was tested in the laboratory and during the trial operation on the railway. The potential of the implementation of the proposed method was confirmed.