

Leszek JARZĘBOWICZ*
Sławomir JUDEK*

ANALIZA OBRAZU 3D DO OCENY STANU ZUŻYCIA NAKLĄDEK ŚLIZGOWYCH

Z punktu widzenia niezawodności eksploatacyjnej transportu kolejowego, istotnym czynnikiem jest stan powierzchni grafitowych nakładek ślizgowych trakcyjnych odbieraków prądu. Zaproponowane przez autorów nowatorskie stanowisko pomiarowe, oparte na systemie wizyjnym z kamerą 3D, umożliwia rejestrację powierzchni nakładek ślizgowych przejeżdżających lokomotyw. Stanowisko zamontowano i uruchomiono na torze kolejowym. W czasie eksploatacji próbnej zarejestrowano ok. 80 obrazów 3D nakładek ślizgowych. Zebrane wyniki cechuje duża różnorodność, szczególnie w zakresie położenia oraz pochyleń rozważanej nakładki ślizgowej w dwóch płaszczyznach. Opracowano metodę automatycznego sprowadzenia wyników rejestracji do wspólnego układu odniesienia. Ustandaryzowane wyniki są następnie porównywane z profilem nowej nakładki w celu oceny zużycia. Zgromadzone doświadczenia pozwoliły na wyciągnięcie wniosków dotyczących komercyjnego zastosowania stanowiska.

1. WPROWADZENIE

Dla zapewnienia bezpieczeństwa i niezawodności eksploatacyjnej transportu kolejowego kluczowe znaczenie techniczne ma układ odbioru prądu z sieci trakcyjnej jezdnej przez poruszające się pojazdy [1, 2]. Jego poprawne działanie zależy od prawidłowego stanu technicznego i regulacji zarówno sieci jezdnej, jak i odbieraka prądu. Wymagania dla układu odbioru prądu rosną wraz ze zwiększaniem prędkości pociągów, w związku z dużymi wartościami odbieranego prądu oraz dynamicznym oddziaływaniem mechanicznym odbieraka i sieci.

Jednym z najistotniejszych elementów odbieraka prądu, stykającym się bezpośrednio z trakcyjnym przewodem jezdny, są grafitowe nakładki ślizgowe (rys. 1) [3]. Uszkodzenia nakładek ślizgowych lub ich nadmierne zużycie są przyczyną powstawania sił poprzecznych, które mogą doprowadzić do drgań lub nawet zerwania przewodów jezdnych.

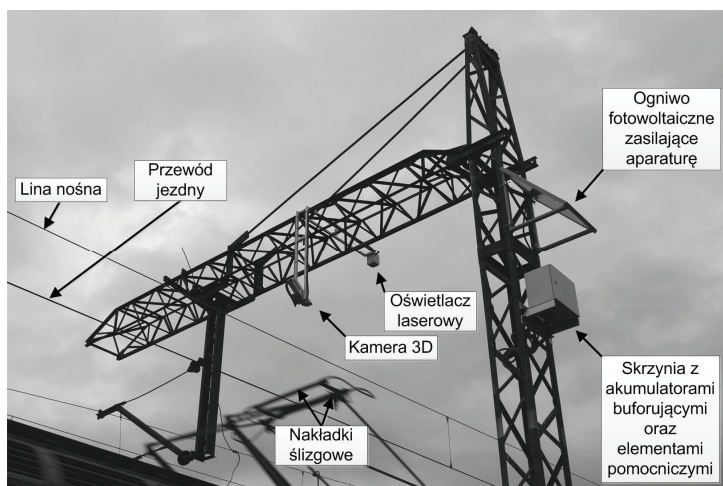
Ocena zużycia i wykrywanie uszkodzeń nakładek ślizgowych odbywa się podczas przeglądów okresowych lokomotyw i zespołów trakcyjnych. Uszkodzenia nakładek, polegające na wykruszeniu fragmentu lub nawet wyrwaniu segmentu

* Politechnika Gdańska.

nakładki, pojawiają się pomiędzy przegładami. Autorzy zaproponowali stanowisko do skanowania i automatycznej oceny nakładek ślizgowych przeznaczone do pracy na linii kolejowej. Skanowanie odbywa się podczas przejazdu lokomotywy pod punktem pomiarowym. Do akwizycji danych dotyczących powierzchni nakładek ślizgowych wykorzystano kamerę 3D oraz liniowy oświetlacz laserowy. Fotografie stanowiska przedstawiono na rys. 2. Szczegółowy opis zasady pomiaru 3D oraz struktury sprzętowej systemu zamieszczono w referacie pt. „*Stanowisko do skanowania 3D nakładek odbieraków prądu lokomotyw*” oraz w [4].



Rys. 1. Widok nowej (a) oraz skrajnie zużytej (b) nakładki ślizgowej (szerokość nakładki: 1100 mm)



Rys. 2. Widok stanowiska do skanowania 3D powierzchni nakładek ślizgowych zamontowanego nad torem kolejowym

Stanowisko uruchomiono nad torem wyjazdowym z Zakładu Taboru w Gdyni Grabówku. Wykonano niezbędną kalibrację i weryfikację poprawności działania. W czasie eksploatacji stanowiska zarejestrowano ok. 80 obrazów 3D nakładek. Zebrane wyniki cechuje duża różnorodność, szczególnie w zakresie położenia rozważanej nakładki ślizgowej w kadrze oraz jej nachylenia, zarówno w płaszczyźnie poziomej jak i pionowej. Utrudnia to znacznie automatyczną analizę. W referacie opisano opracowane algorytmy automatycznego przetwarzania i analizy wyników rejestracji pozwalające na wyznaczenie zużycia nakładek.

2. PRZETWARZANIE WYNIKÓW SKANOWANIA

Kamera 3D została poddana kalibracji uwzględniającej wzajemne ustawienie skanowanych nakładek ślizgowych, kamery i oświetlacza laserowego, a także zniekształcenia wprowadzane przez obiektyw kamery. Dzięki temu układ FPGA, w który wyposażona jest kamera, przeskalowuje zarejestrowane dane w czasie rzeczywistym. W rezultacie liczbowe wyniki mają postać wysokości wyrażonej w milimetrach. Daje to możliwość określenia rzeczywistych wymiarów obiektu.

Wyniki rejestracji wykonanej przez kamerę 3D mają postać macierzy \mathbf{W} . Liczba kolumn związana jest rozmiarem matrycy kamery. 1536 kolumny odpowiadają szerokości obszaru skanowania wynoszącej 1172 mm, co przekłada się na rozdzielczość wynoszącą ok. 0,76 mm/piksel.

Liczba wierszy macierzy \mathbf{W} związana jest z częstością pomiaru profilu oraz czasem rejestracji. Okres pomiaru ustawiono na 4 ms. Wartość ta wynika z minimalnego czasu naświetlania matrycy kamery, pozwalającego odtworzyć przebieg linii laserowej na skanowanym obiekcie. Z uwagi na brak możliwości automatycznego określenia, który z odbieraków lokomotywy jest uniesiony, rejestracja obejmuje czas przesunięcia się pod punktem pomiarowym całej długości dachu pojazdu. Z tego powodu liczba wierszy macierzy \mathbf{W} wynosi zazwyczaj kilka lub kilkanaście tysięcy, przy czym z reguły właściwe dane, czyli profile pary nakładek zamontowanych na uniesionym odbieraku, zawierają się w nie więcej niż dwustu kolejnych wierszach.

Wykorzystując środowisko LabVIEW, opracowano procedury programowe automatycznie lokalizujące wiersze zawierające dane zarejestrowane podczas przejazdu odbieraka pod punktem pomiarowym. Z macierzy \mathbf{W} wyodrębniana jest podmacierz o liczbie wierszy równej 300, zawierająca profile pary zeskanowanych nakładek. Przykładową zawartość podmacierzy przedstawiono na rys. 3 w postaci graficznej. Poszczególne punkty obrazu odpowiadają komórkom macierzy wynikowej, a jasność punktu uzależniona jest od wartości komórki. Każdy stopień 256-poziomowej skali szarości odpowiada zmianie wysokości o ok. 0,4 mm. Przyjęta skala pozwala zobrazować zmiany wysokości w zakresie ok. 10 cm.



Rys. 3. Graficzne przedstawienie zawartości przykładowej macierzy wynikowej z rejestracji 3D:
 1 – nakładki ślizgowe, 2 – nabieżniki, 3 – elementy konstrukcyjne ślizgacza, 4 – przewód jezdny,
 5 – cień przewodu jezdny, 6 – cień liny nośnej

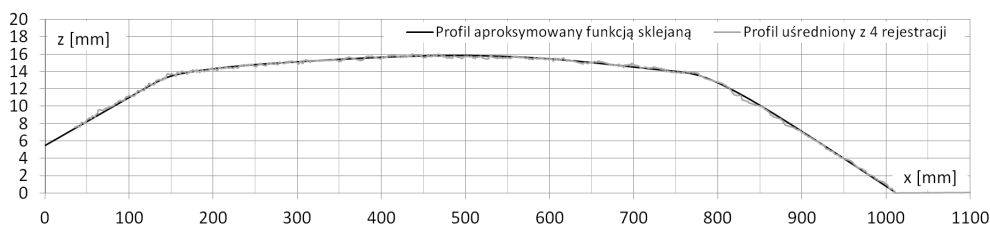
Z uwagi na różnice montażowe odbieraków oraz elastyczne zawieszenie ślizgacza w zarejestrowanym obrazie krawędzi nakładek nie we wszystkich przypadkach są równoległe do osi x (konwencja oznaczenia osi na rys. 3). W celu ujednoczenia wyników, dla wszystkich przypadków wyznaczono kąt nachylenia krawędzi nakładek względem osi x i wykonano przeliczenie korygujące ten kąt do zera. Wykorzystano bibliotekę IMAQ środowiska LabVIEW zawierającą gotowe, parametryzowane algorytmy obrotu oraz wyznaczania krawędzi obrazu [5].

Konsekwencją asymetrycznego ustawienia kamery względem osi toru jest brak w zarejestrowanym obrazie lewego skraju nakładek. Widoczny jest tylko skraj prawy: k_D , k_G . W wyniku tego, istotne – z punktu widzenia analizy wyników skanowania – wyznaczenie środka nakładek możliwe jest jedynie poprzez określenie wewnętrznych skrajów nabeżników: n_{LD} , n_{LG} , n_{PD} , n_{PG} . W kolejnych wynikach rejestracji położenie ww. punktów szczególnych jest znacząco różne, więc muszą one być zlokalizowane dla każdego wyniku odrębnie.

Rejestrowany profil nakładki ślizgowej przesłonięty jest częściowo przez przewód jezdy i jego cień wynikający z zasłonięcia promienia oświetlacza laserowego. Dodatkowo, umieszczenie oświetlacza powyżej sieci trakcyjnej jezdnej (p. rys. 2), wymuszone względami bezpieczeństwa, wiąże się z pojawieniem się na nakładkach także cienia liny nośnej. Wymienione braki w profilach zarejestrowanych nakładek ograniczają możliwości wykrycia uszkodzeń, które mogą wystąpić na całej szerokości nakładki. Jednak z punktu widzenia analizy zużycia, przesłonięte fragmenty profilu nakładek nie wprowadzają istotnych ograniczeń. Największe zużycie występuje zawsze w obszarze środkowym (p. rys. 1b), w obrębie którego zestyk z przewodem jezdny znajduje się przez większość czasu pracy. Obszar ten jest w zarejestrowanych obrazach nieprzesłonięty.

4. OPRACOWANIE WZORCOWEGO PROFILU NAKŁADKI

Dla oceny ubytku, wynikającego ze zużycia lub wykruszenia, istotna jest znajomość kształtu powierzchni nakładki nowej. W celu opracowania profilu wzorcowego wykorzystano wyniki rejestracji wykonane dla jednej z lokomotyw, w której para nakładek ślizgowych została wymieniona na nowe bezpośrednio przed przejazdem przez punkt pomiarowy. Skanowanie wykonano dwukrotnie, uzyskując łącznie 4 profile odpowiadające nowym nakładkom. Profile te, po wzajemnym dopasowaniu ich położenia oraz pochylania na płaszczyźnie (x , z), uśredniono (rys. 4). Z uwagi na występowanie w otrzymanym uśrednionym profilu nieregularności, profil ten poddano aproksymacji. Ze względu na brak znajomości funkcji opisującej profil, oraz złożoność jego kształtu zdecydowano się na odwzorowanie profilu nowej nakładki poprzez zastosowanie funkcji sklepanych trzeciego stopnia (ang. *spline*).



Rys. 4. Kształt profilu wzorcowego wyznaczonego na podstawie wyników skanowania nowych nakładek ślizgowych

5. ANALIZA WYNIKÓW

Ocena zużycia analizowanych nakładek ślizgowych odbywa się poprzez porównanie ich profilu z profilem wzorcowym. Zestaw zarejestrowanych wyników cechuje jednak duża różnorodność w zakresie położenia i pochylenia zeskanowanego profilu na płaszczyźnie (x, z) . Dla umożliwienia miarodajnego porównania ze wzorcem należy zatem zarejestrowane profile poddać automatycznej normalizacji, polegającej na odpowiednim przesunięciu liniowym i obrocie.

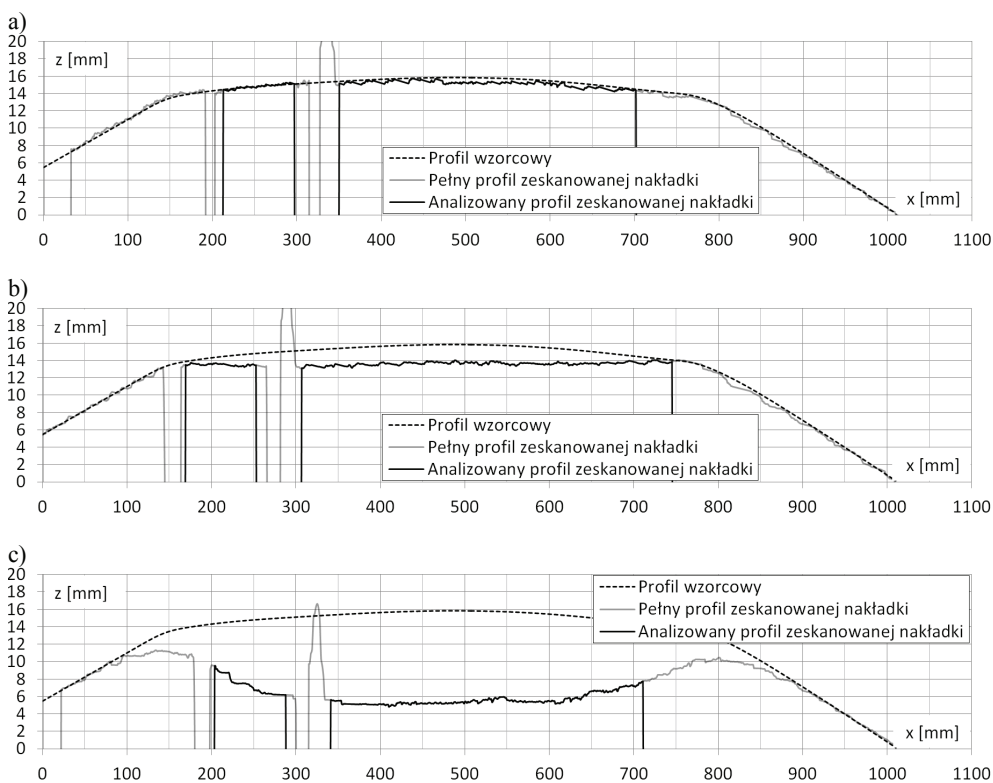
Normalizacja analizowanego profilu zaczyna się od obrotu (wypoziomowania). Z uwagi na sprężyste, obustronne zawieszenie ślizgacza, do którego przymocowane są nakładki, profile wykreślone na płaszczyźnie (x, z) najczęściej nie są poziome. Nachylenie nie przekracza 2° , jednak – uwzględniając znaczną długość nakładek (1100 mm) oraz dużą rozdzielczość pomiaru (rzędu 0,1 mm) – wskazane jest wypoziomowanie profilu. Trudność stanowi wyznaczenie kąta obrotu. Z oględzin licznego zbioru w różnym stopniu wyeksploatowanych nakładek wynika, iż zużycie obejmuje prawie całą długość nakładki, z wyłączeniem obszarów o długości kilku centymetrów na skrajach. W obszarach tych, po obu stronach można byłoby zatem przyjąć punkty odniesienia ułatwiające normalizację profilu. Ze względu na brak lewego skraju w wynikach skanowania (p. rozdz. 2), nie jest to jednak możliwe. Założono zatem symetryczne zużycie nakładki przyjmując dwa punkty odniesienia, służące do wyznaczenia kąta obrotu, symetrycznie względem środka nakładki (na powierzchni podlegającej zużyciu).

Wypoziomowane profile są przesuwane wzdłuż osi x , tak aby ich środki pokryły się ze środkiem profilu wzorcowego. Środki profili wyznaczone są na podstawie krawędzi nabeżników (n_{LD} , n_{LG} , n_{PD} , n_{PG} na rys. 3).

Bardzo istotne, z punktu widzenia dokładności porównania ze wzorcem, jest przesunięcie analizowanego profilu wzdłuż osi z . Punkt odniesienia umożliwiający wyznaczenie wartości przesunięcia wytypowano na prawym skraju profilu, w obszarze nie podlegającym zużyciu. Rozważano także wytypowanie punktów szczególnych na nabeżnikach, które – z zasady – nie podlegają zużyciu. W typie odbieraków, dla których zarejestrowano profile nakładek ślizgowych, nabeżniki wykonane są z aluminiowych kształtowników. Nieznana jest powtarzalność ich

wyprofilowania. Ponadto płaskowniki te mogą ulegać deformacji w trakcie eksploatacji. Z koncepcji tej zatem zrezygnowano, choć jest ona warta rozważenia w przypadku innych typów konstrukcji odbieraka.

Porównanie przykładowych znormalizowanych profili zarejestrowanych nakładek z profilem wzorcowym przedstawiono na rys. 5.

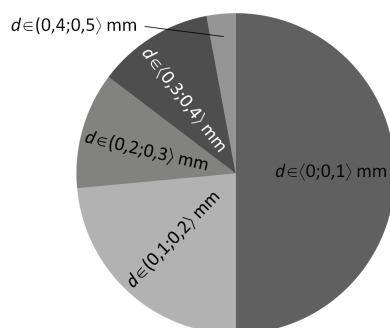


Rys. 5. Porównanie profilu nakładki zeskanowanej z profilem wzorcowym dla egzemplarza:
 a) nowego (wyznaczone zużycie: $Z_a = 0,7$ mm); b) zużytego w niewielkim stopniu
 (obliczone zużycie: $Z_b = 2,3$ mm); c) zużytego w stopniu bliskim dopuszczalnej granicy
 (obliczone zużycie: $Z_c = 10,8$ mm)

W analizowanych profilach występują zakresy wartości x , dla których wysokość z jest wartością zaburzoną, wynikającą z przesłonięcia nakładki przez przewód jezdny lub zacielenia linii laserowej. W wyniku automatycznej analizy wyodrębniane są dwa podzakresy analizowanego profilu, obejmujące obszar nakładki podlegający największemu zużyciu, a jednocześnie nie zawierające obszarów, w których wartości wysokości są zafałszowane (wyodrębniony profil wykreślono na rys. 5 czarną ciągłą linią).

Ocena wartości zużycia Z wykonywana jest poprzez znalezienie największej różnicy pomiędzy analizowanym profilem zeskanowanej nakładki a profilem wzorcowym. Obliczone przez algorytm wartości Z zamieszczono o opisie rys. 5.

Podczas badań terenowych zeskanowano ponad 40 nakładek ślizgowych, z czego 30 wielokrotnie. Dla pomiarów i analizy wykonanej wielokrotnie obliczono współczynnik powtarzalności d będący różnicą pomiędzy maksymalnym i minimalnym wyznaczonym zużyciem danej nakładki ślizgowej. Wartość współczynnika d dla żadnego przypadku nie przekroczyła wartości 0,5 mm, a dla połowy nakładek była nie większa niż 0,1 mm (p. rys. 6).



Rys. 6. Rozkład powtarzalności wyznaczonego zużycia nakładek ślizgowych dla trzydziestu wielokrotnie zeskanowanych nakładek

6. PODSUMOWANIE

Badania terenowe, przeprowadzone na torze kolejowym, potwierdziły możliwość wykorzystania techniki 3D do skanowania powierzchni nakładek ślizgowych odbieraków prądu i w rezultacie do oceny ich zużycia. Duża odległość kamery od skanowanego obiektu, częściowe przesłonięcie nakładki przez elementy sieci jezdnej oraz trudne warunki środowiskowe nie są czynnikami krytycznymi.

Przy wyborze miejsca instalacji systemu pomiarowego istotne jest uwzględnienie udsuwu przewodu jezdnej i liny nośnej (odsunięcie od osi toru). Wskazane jest, aby związane z tymi elementami braki w profilu skanowanych nakładek nie występowały w obszarze środkowym, czyli w obszarze nakładki podlegającym największemu zużyciu.

Bezpośrednio przed przejazdem przez punkt pomiarowy wszystkie zarejestrowane nakładki ślizgowe podlegały oględzinom i pomiarowi ręcznemu w ramach przeglądu kontrolnego lokomotyw. Różnice w wynikach pomiaru ręcznego i automatycznego sięgają nawet 2 mm. Pomiar ręczny wykonywany był jednak zazwyczaj na środku nakładki, zaś – w związku z nierównomiernością zużycia i niewielkimi lokalnymi uszkodzeniami – punkt największego ubytku

wysokości nie zawsze występował dokładnie w tym miejscu. Wyniku pomiaru ręcznego nie można zatem traktować jako wzorcowego, weryfikującego dokładność zaproponowanego stanowiska automatycznego. Dlatego w ramach badań terenowych systemu oceniono jedynie powtarzalność wyników uzyskanych poprzez wielokrotne skanowanie tych samych nakładek. Dalsze badania, mające charakter laboratoryjny, wykorzystujące dokładnie zwymiarowane nakładki (zużyte w różnym stopniu oraz uszkodzone) pozwolą wyciągnąć jednoznaczne wnioski na temat precyzji wyników skanowania i ich analizy.

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

LITERATURA

- [1] Maintenance of catenary instruction trakcyjnej Iet-2, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A, Warszawa, 2010 (in Polish).
- [2] Commission Decision of 23 July 2012 concerning technical specifications for interoperability (2012/464/EU). European Commission, 2012.
- [3] Rojek A., Majewski W., Materials for pantograph contact strips, Electrotechnical News, 04/2010 (in Polish).
- [4] Jarzębowicz L., Judek S., Karwowski K.; Vision system for monitoring technical condition of current collector strips. SEMTRAK 2012, PiT, Kraków 2012 (in Polish).
- [5] IMAQ Vision for LabVIEW User Manual. National Instruments, 2004.

ANALYSIS OF 3D IMAGE FOR DETERMINATION OF CURRENT COLLECTORS STRIPES WEAR

The condition of the current collectors contact strips is an important factor when considering operational reliability of railway transportation. The authors proposed a novel measurement system based on the camera 3D to acquire the surface of current collectors contact strips. The system was installed above the railway track for tests in target environmental conditions. During the trial operation about 80 contact strips 3D-profiles of passing locomotives were recorded. Pooled results vary widely, especially in the position and tilt of acquired profiles. An automatic registered profiles normalization method was introduced. Standardized profiles are compared to the shape of the new contact strip in order to evaluate their wear. Summary of scanning and analysis results conclude to the possibility of commercial usage of the introduced system.