

## System wizyjny do analizy położenia sieci trakcyjnej względem odbieraka prądu

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono system wizyjny do analizy położenia sieci trakcyjnej względem odbieraka prądu. Jest on przeznaczony do montażu na dachu pojazdu kolejowego. Wyposażono go w kamerę i minikomputer Raspberry Pi 3B+, który analizuje zarejestrowany obraz oraz wykorzystuje moduł GPS do rejestracji miejsc, w których wykryto nieprawidłowe ustawienie sieci trakcyjnej. Wyniki przeprowadzonych badań, także z wykorzystaniem pojazdu szynowego, wskazują na możliwość szerokiego zastosowania proponowanego systemu.

**Abstract.** The article presents a vision system for analyzing the position of the catenary in relation to the current collector. This system is designed to be mounted on the roof of a railway vehicle. The system is equipped with a camera and a Raspberry Pi 3B+ minicomputer that analyzes the recorded image and uses a GPS module to record the locations where incorrect alignment of the overhead contact line was detected. The results of the tests carried out, also using a railway vehicle, indicate the possibility of widespread use of the proposed system. (A vision system for analyzing the position of the catenary in relation to the current collector)

**Słowa kluczowe:** system wizyjny, odbierak prądu, sieć trakcyjna, wykrywanie uszkodzeń.

**Keywords:** vision system, current collector, catenary, fault detection.

### Wstęp

Stan infrastruktury kolejowej jest niezwykle ważny dla bezpieczeństwa i niezawodności transportu kolejowego. W pojazdach szynowych zasilanych z górnej sieci trakcyjnej może dochodzić do uszkodzeń odbieraków prądu oraz zerwania sieci, co zwykle wymusza zamknięcie toru kolejowego a często (ze względów bezpieczeństwa) również sąsiednich doprowadzając do wielogodzinnych opóźnień. Czasami występuje konieczność odholowania uszkodzonego pociągu przez lokomotywę spalinową, a to powoduje generowanie dodatkowych kosztów. W celu zapewnienia bezpiecznego działania zelektryfikowanego transportu szynowego konieczne jest monitorowanie stanu technicznego zarówno taboru, jak i infrastruktury. Kluczową kwestią jest monitorowanie interakcji sieci trakcyjnej i odbieraków prądu poruszających się pojazdów [1-3].

O niezawodności odbieraków prądu w głównej mierze decyduje nacisk wywierany przez nakładkę stykową na przewód jezdny [4]. Stan infrastruktury kolejowej, np. obluźnienie sieci lub uszkodzenie/przechylenie słupa trakcyjnego również ma istotny wpływ na odbierak, dlatego tak ważne jest monitorowanie współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną [1, 5, 6].

Obecnie, wśród stosowanych metod badania stanu sieci trakcyjnej, wyróżnić można metodę detekcji ręcznej, metodę detekcji kontaktowej, detekcji laserowej lub ultradźwiękowej, a także metodę obrazową [7, 8]. Coraz częściej do monitorowania i diagnostyki stanu sieci kolejowej stosuje się systemy wizyjne wraz z zaawansowanymi algorytmami obróbki danych wizyjnych [9, 10].

Współczesne systemy wizyjne są coraz bardziej zminiaturyzowane i coraz częściej wykorzystują tanie platformy komputerowe, takie jak Raspberry Pi. Platforma ta rozwija się od 2012 r. i w kolejnych generacjach dostępne są do niej dedykowane kamery takie jak np. ArduCam OV5647 5Mpx z obiektywem HX-27227 M12x0.5. System wizyjny wykorzystujący mikrokomputer z rodziny Raspberry ma wystarczającą moc obliczeniową, by zaimplementować w nim nawet sztuczną sieć neuronową do analizy rejestrowanego obrazu.

W literaturze zaproponowano wiele takich systemów używających minikomputery z rodziny Raspberry. Przykładowo, w [11] opisano stosunkowo tani system wykrywania pojazdów i monitorowania ruchu wykorzystujący sztuczną

inteligencję. Jest on w stanie rozróżnić 5 kategorii pojazdów ze skutecznością przekraczającą 80%. Raspberry Pi użyto także w systemie monitorowania osuwisk gruntu, który dodatkowo może wysyłać ostrzeżenia o wykrytym zjawisku wykorzystując sieć telefonii komórkowej [12]. Z kolei w [13] Raspberry Pi 3B użyto do wykrywania naturalnych katastrof w oparciu o głębokie uczenie maszynowe. W [14] wykazano, że minikomputer z tej samej serii, wraz z kamerą USB, można użyć do zbudowania systemu zliczającego osoby wchodzące i wychodzące z pomieszczenia. Uzyskane wyniki mogą być transmitowane na serwer z użyciem wbudowanego w Raspberry modułu Wi-Fi.

W tej pracy zaproponowano system wizyjny do monitorowania położenia sieci trakcyjnej względem odbieraka prądu. Skoncentrowano się na monitorowaniu odchylenia bocznych przewodu jezdnego od osi symetrii toru. Dopuszczalne odchylenie boczne przewodu jezdnego od osi symetrii toru jest określone przez normę PN-EN 50367:2021-06 [15]. Zgodnie z tą normą oblicza się je w oparciu o strefę roboczą ślizgacza pantografu pod kątem użyteczności oraz o granicę wykolejenia się odbieraka prądu. Zbyt duże odchylenie przewodu jezdnego od osi toru może prowadzić do sytuacji, w której pantograf dociskający od spodu sieć uniesie się zbyt mocno i dojdzie do jego uszkodzenia. Konsekwencją takiego zdarzenia może być także zerwanie sieci trakcyjnej, wymagające wielogodzinnej naprawy.

Producenci elektrycznego taboru kolejowego standardowo montują układy wizyjne na dachach swoich pojazdów, skupiają się one jednak na bieżącej kontroli położenia odbieraków prądu nie korzystając z dodatkowych funkcji diagnostycznych.

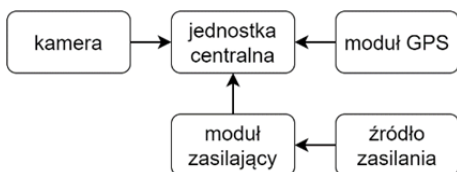
Opracowany prototyp urządzenia przeznaczony jest do montowania na dachu pojazdu kolejowego. Wykorzystuje on Raspberry Pi 3B+ oraz podłączoną do niego kamerę. Całość jest zasilana z wbudowanego akumulatora Li-Po. W tej pracy zaprezentowano budowę prototypu, omówiono autorski algorytm analizy obrazu, opisano stanowisko pomiarowe oraz przedstawiono wybrane wyniki badań wraz z podsumowaniem.

### Prototyp systemu wizyjnego

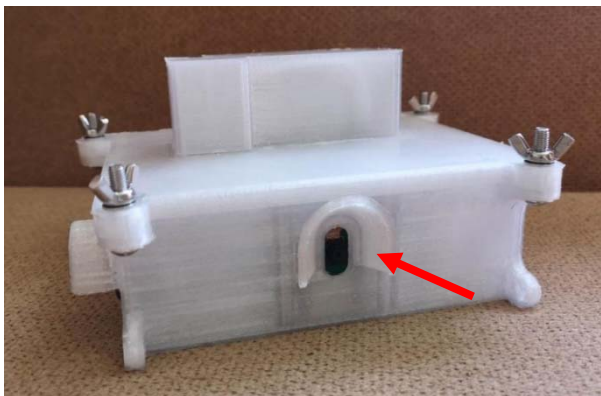
Do konstrukcji proponowanego systemu wizyjnego zdecydowano się użyć minikomputer Raspberry Pi 3B+ oraz dedykowaną do niego kamerę Raspberry Pi Camera Rev 1.3. Wynikało to z kilku czynników:

- 1) niewielkich rozmiarów obu urządzeń, co pozwoliło na ich umieszczenie w niewielkiej obudowie. Taką obudowę można łatwo umieścić na dachu pojazdu kolejowego bez montażu specjalistycznych uchwytów,
- 2) szerokiej dostępności bibliotek programistycznych umożliwiających przygotowanie oprogramowania (wybrano jedną z popularniejszych bibliotek – OpenCV [16],
- 3) niskiej ceny (poniżej 200 zł – minikomputer i ok. 30 zł – kamera),
- 4) niewielkiego poboru prądu umożliwiającego kilkugodzinne zasilanie całego urządzenia z akumulatora na tyle małego, że jest możliwe jego umieszczenie razem z pozostałymi komponentami w jednej obudowie. Właśne zasilanie jest istotne ze względu na trudność w doprowadzeniu zasilania na dach pojazdu (konieczność zewnętrznego prowadzenia przewodów po dachu).

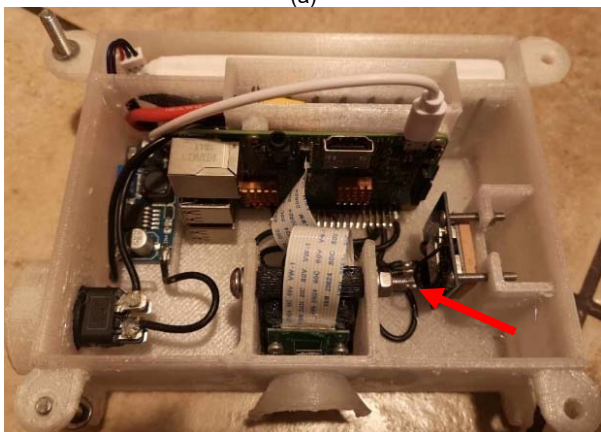
Schemat ideowy skonstruowanego urządzenia przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Schemat ideowy urządzenia



(a)



(b)

Rys.2. Gotowe urządzenie: a) widok zewnętrzny (strzałka wskazuje osłonę obiektywu), b) wewnątrz (strzałka wskazuje śrubę regulującą pochylenie płytki z kamerą)

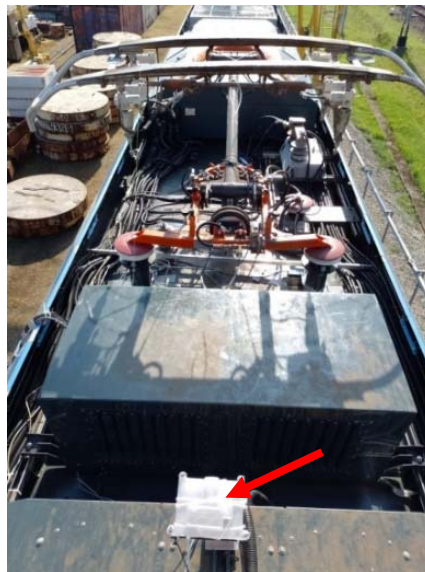
W obudowie wykonanej w technologii druku 3D z tworzywa PETG charakteryzującego się wysoką trwałością i odpornością na naprężenia poza minikomputerem oraz kamerą połączoną dedykowaną taśmą do przesyłania sygnału i zasilania, znajduje się akumulator Li-Po Redox o napięciu znamionowym 7,4V i pojemności 4,4 Ah. Poprzez przetwornicę impulsową step-down wyposażoną

w układ LM2596 zasilają on Raspberry, a za jego pośrednictwem kamerę i moduł GPS.

Moduł GPS GY-GPS6MV2 komunikuje się z Raspberry za pomocą interfejsu UART na bieżąco przekazując lokalizację geograficzną urządzenia. Dzięki niemu jest możliwe zapisanie miejsca, w którym urządzenie wykryje usterkę sieci trakcyjnej.

Widok gotowego urządzenia wraz ze szklaną osłoną obiektywu kamery przedstawiono na rysunku 2. Ustawienie właściwego kąta widzenia kamery jest regulowane dzięki możliwości zmiany pochylenia płytki, do której przytwierdzona jest kamera.

Dzięki uchwytom montażowym w narożnikach urządzenia jest możliwe jego łatwe zamontowanie na dachu pojazdu kolejowego, jak pokazano to na rysunku 3.

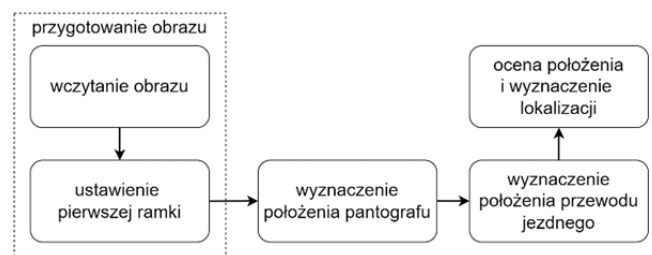


Rys.3. Urządzenie (oznaczone strzałką) zamontowane na dachu pojazdu kolejowego

### Algorytm analizy obrazu

Celem opracowanego algorytmu jest wykrycie miejsc, w których przewód jezdny wychodzi poza zdefiniowany obszar roboczy ślizgu pantografu. Fragmenty nagrania, na których takie zdarzenia miały miejsce, są zapisywane do osobnych plików wideo wraz z oznaczeniem lokalizacji tych miejsc współrzędnymi geograficznymi pobranymi z odbiornika GPS. Dzięki temu wykwalifikowani pracownicy służb zarządcy infrastruktury mogą szybciej ocenić konieczność przeprowadzenia napraw sieci trakcyjnej w konkretnych miejscach wskazanych przez urządzenie.

Urządzenie po włączeniu rozpoczyna rejestrację obrazu z kamery i danych z odbiornika GPS. Alternatywnie może przetworzyć film i dane zarejestrowane wcześniej i zapisane w wewnętrznej pamięci albo na zewnętrznym nośniku (np. pendrive, dysk twardy) w dowolnym standardowym formacie pliku wideo. Analiza obrazu odbywa się zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 4.



Rys.4. Schemat algorytmu analizy obrazu

W trakcie przygotowania obrazu do analizy jest on konwertowany do rozdzielczości VGA (640×480 pikseli), która jest wystarczająca do dalszej obróbki (można także ustawić wyższą). Następnie jest wykonywana konwersja do skali szarości i binaryzacja z ustalonym progiem. Próg ten, odpowiedni dla nagrań wykonanych w dzień, jest tak dobrany, aby tylko pantograf był czarny. Niebo i sieć trakcyjna (która po przeskalowaniu obrazu jest zbyt cienka by mogła być oznaczona na czarno) są białe. Przykładowy zbinaryzowany kadr przedstawiono na rysunku 5a.

Tak uzyskany obraz używa się do wyznaczenia położenia ślizgu pantografu. Począwszy od góry obrazu sprawdza się występowanie czarnych pikseli wzdłuż pionowej linii przebiegającej przez środek obrazu. Znalezienie odpowiedniej liczby czarnych pikseli wskazuje na wykrycie w tym miejscu ślizgu. Dlatego następnie na prawo i na lewo od tak ustalonego punktu co 7 pikseli w poziomie sprawdza się występowanie czarnych pikseli wskazujących także na występowanie w tych miejscach ślizgu (za jego krańcami znajdują się ukośne nabeżniki, w których sieć trakcyjna normalnie nie styka się z odbierakiem). Górę ślizgu w tych miejscach wyznacza się szukając w pionie, w odległości nie większej niż 10 pikseli, pierwszego białego piksela. Taki piksel jest pierwszym, który nie należy do ślizgu. Przykład wykrytych górnych punktów ślizgu pantografu zamieszczono na rysunku 5b. Punkty należące do ślizgu są w ten sposób prawidłowo wykrywane aż do jego końców. Dzieje się tak nawet, pomimo że z pozycji widzenia kamery ślizg nie jest ani całkowicie poziomy ani nie jest linią prostą. Taki sposób postępowania jest też stosunkowo odporny na błędy detekcji spowodowane występowaniem w kadrze innych obiektów takich jak np. słupy trakcyjne i uchwyty podtrzymujące sieć trakcyjną.

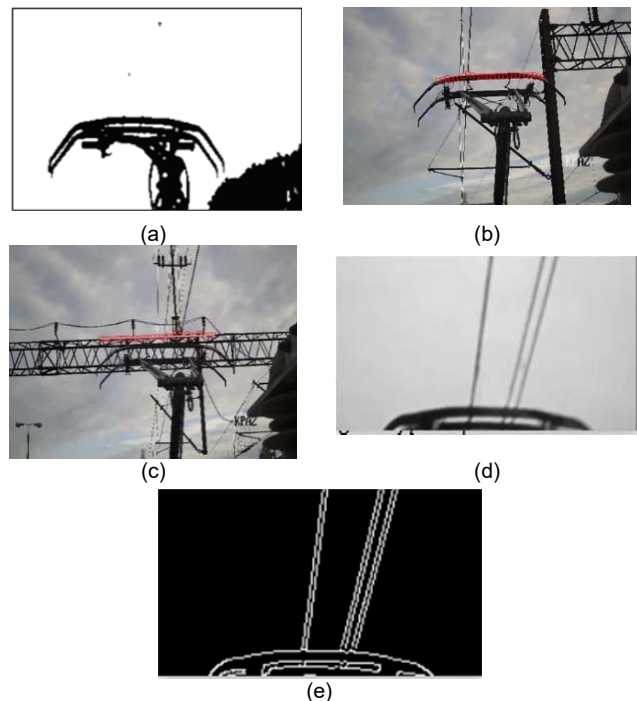
Wykryta i uśredniona wysokość ślizgu jest zapamiętywana pod warunkiem, że wykryty ślizg składał się z przynajmniej 3 punktów znalezionych koło siebie. Wysokość wykrywania ślizgu na kolejnych klatkach jest ograniczona do określonego zakresu, by wyeliminować błędne detekcje spowodowane pojawianiem się innych poziomych obiektów w kadrze, takich jak bramownice podtrzymujące sieć trakcyjną. Jednocześnie w sytuacjach, gdy poziomy element (np. bramownica – rysunek 5c) znajduje się na porównywalnej wysokości co ślizg, sprawdza się jego szerokość. Gdy jest mniejsza lub większa od szerokości ślizgu, wówczas zmierzona wysokość ślizgu nie jest zapisywana.

Aby precyzyjnie obliczyć szerokość ślizgu pomiary odległości pomiędzy skrajnymi punktami ślizgu z pierwszych kilkuset klatek nagrania uśrednia się. Pod uwagę bierze się jedynie klatki zarejestrowane od momentu wykrycia poruszenia się pojazdu (wykorzystuje się do tego różnicę zawartości kolejnych klatek obrazu).

Analiza położenia przewodu jezdnego względem wykrytego ślizgu pantografu odbywa się w wyznaczonym obszarze ROI (ang. region of interest) obrazu po przekonwertowaniu go do skali szarości. ROI jest określany na podstawie wyznaczonych wcześniej skrajnych punktów ślizgu ponad ślizgiem oraz nieco na prawo i na lewo od niego. Przykład wyznaczonego ROI pokazano na rysunku 5d. Pierwszym krokiem wykrycia przewodu jest detekcja krawędzi algorytmem Canny'ego. Przykład obrazu po detekcji krawędzi zamieszczono na rysunku 5e. Drugim krokiem jest z wykorzystaniem transformaty Hough'a wykrywającej linie proste. Wykrywane są jedynie linie w określonym zakresie kątów (prawie pionowe) i dotykające powierzchni ślizgu. Jako przewód jezdny traktuje się tę linię, która znajduje się najbliżej krawędzi ślizgu.

Ostatnim etapem algorytmu jest sprawdzenie, czy wykryte miejsce zetknięcia się przewodu ze ślizgiem znajduje się w przyjętym zakresie tolerancji położenia. Jeśli jest poza

tym zakresem, pobierane są współrzędne GPS (tylko w przypadku nagrań rejestrowanych na bieżąco) i zapisywane wraz z 5-sekundowym fragmentem filmu pokazującym tę sytuację.



Rys. 5. Etapy przetwarzania obrazu: a) zbinaryzowany obraz pantografu, b) poprawnie wykryte punkty tworzące ślizg pantografu (pomimo dodatkowych obiektów znajdujących się w kadrze), c) automatycznie odrzucony pomiar wysokości ślizgu (wykryta bramownica), d) ROI użyty do detekcji położenia przewodu jezdnego, e) ROI po przefiltrowaniu filtrem Canny'ego

### Stanowisko pomiarowe

Badania wykonano na dwuczłonowym elektrycznym zespole trakcyjnym, przystosowanym do poruszania się po torach polskiej sieci kolejowej o rozstawie szyn 1435 mm oraz zasilanym napięciem 3 kVDC. Jego maksymalna prędkość eksploatacyjna to 160 km/h.

Pomiary zrealizowano w trakcie jazd testowych przeprowadzonych na terenie Toru Doświadczalnego Instytutu Kolejnictwa koło Żmigrodu, gdzie warunki pogodowe kształtowały się następująco: temperatura otoczenia:  $6,1 \pm 12,2^\circ\text{C}$ ; prędkość wiatru  $2,1 \pm 2,9$  m/s; opady atmosferyczne: brak; temperatura wewnętrzna:  $21,3 \pm 21,8^\circ\text{C}$ .

Podczas testów wykorzystano odbierak prądu zainstalowany na izolatorach przymocowanych do wsporników na dachu pojazdu. Górna krawędź ślizgacza odbieraka w stanie spoczynku usytuowana była na wysokości 4510 mm od główki szyny. Zmierzony zakres uniesienia odbieraka prądu wyniósł 2150 mm. Maksymalne uniesienie odbieraka prądu wyniosło 6660 mm. Odbierak może współpracować mechanicznie z przewodami jezdnyimi zainstalowanymi na wysokości od 4 800 mm do 6 500 mm od główki szyny dla skrajni GC. Średni nacisk statyczny użytego odbieraka wyniósł 107,2 N spełniając wymagania normy PN-EN 50206-1:2010 [17]. Jazdy zrealizowano przy ciśnieniu w układzie pneumatycznym odbieraka wynoszącym 5,25 bar.

Parametry toru testowego: pętla toru ma długość 7725 metrów, zbudowana jest z odcinków prostych i łuków o promieniach 600, 700, 800 i 900 metrów. Najdłuższa prosta ma długość 1314 metrów, można na niej uzyskać prędkość 160 km/h. Typ sieci trakcyjnej: YC150-2C150 od km 6,2 do km 7,72 (w tym najdłuższa prosta toru), zawieszona na wysokości od 5,5 do 5,75 m.



Według instrukcji utrzymania sieci trakcyjnej let-2 [18] dla sieci do prędkości jazdy mniejszej bądź równej 160 km/h odsuw wynosi:

- na prostej w kierunku od lub do słupa 300 mm ( $\pm 20$  mm),
- na łuku 400 mm (+20 mm na zewnątrz łuku i 60 mm do wewnątrz łuku, przy czym oś symetrii przewodu musi być styczna do osi toru w środku przęsła zawieszenia, w stanie bez wywiania wiatrowego),
- pod słupem krzyżowym: 150 mm.

Badania wykonano w trakcie jazd testowych od prędkości 80 km/h do  $v_{max}$  pojazdu wynoszącej 160 km/h.

### Wybrane wyniki badań

Powyżej opisane testy umożliwiły zweryfikowanie działania urządzenia w zakresie mechanicznym oraz częściowo pomiarowym. Wykonana obudowa okazała się wystarczająco solidna aby zabezpieczyć urządzenie przy prędkościach pociągu dochodzących do 160 km/h. Zakłócenia elektromagnetyczne nie miały wpływu na prawidłowe działanie urządzenia, a źródło zasilania pozwoliło na nieprzerwaną kilkunastogodziną pracę. Dodatkowo materiał wideo podczas testów rejestrowany był inną równolegle zamontowaną kamerą co umożliwiło weryfikację poprawności działania prototypu (rysunek 6.). Dane z GPS oraz materiał wideo zarejestrowane zostały poprawnie.

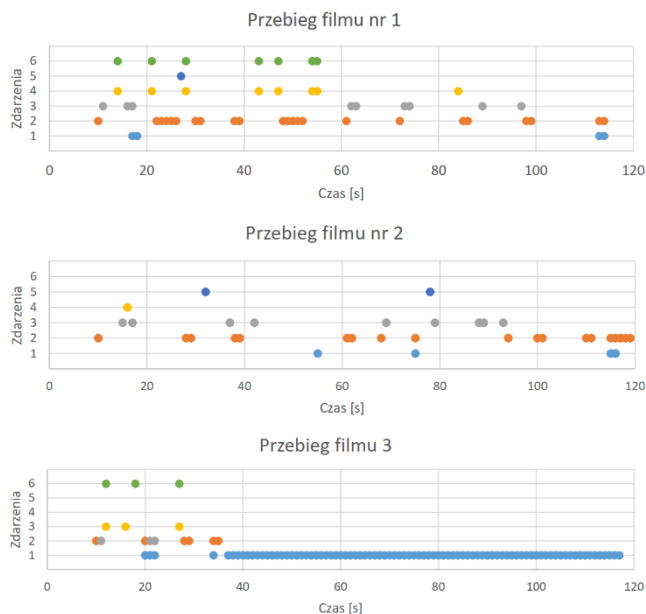


Rys. 6. Dodatkowa kamera (oznaczona strzałką), którą równolegle rejestrowano obraz

W dalszej części przedstawiono wyniki analizy obrazu wykonane na wybranych losowo 3 filmach zarejestrowanych podczas pomiarów dla różnych prędkości pociągu. Do testów wyselekcjonowano 2-minutowe fragmenty z 3 wybranych filmów i wykrywano na nich sytuacje, w których przewód jezdny zbliżał się do granicy ślizgu. Ponieważ w trakcie testów nie miała miejsca żadna rzeczywista sytuacja, w której przewód znajdował się z byt blisko granicy ślizgu, więc zakres tolerancji sztucznie zawężono, aby program mógł generować alarmy. Przeanalizowano występowanie następujących zdarzeń:

- 1) niewykrycie właściwego położenia pantografu,
- 2) niewykrycie przewodów zasilających,
- 3) oznaczenie innych przewodów niż przewód jezdny,
- 4) błędne wykrycie obiektu zewnętrznego,
- 5) poprawne wykrycie symulowanego miejsca, gdzie przewód znajdował się zbyt blisko przyjętej krawędzi ślizgu,
- 6) błędne wykrycie symulowanego miejsca, gdzie przewód znajdował się zbyt blisko przyjętej krawędzi ślizgu.

Uzyskane wyniki w ujęciu czasowym zaprezentowano na wykresach na rysunku 7., a także zebrano w tabelach 1. i 2.



Rys. 7. Uzyskane rezultaty detekcji dla filmów nr 1, nr 2 i nr 3 odpowiednio dla zdarzeń: 1 – niewykrycie właściwego położenia pantografu, 2 – niewykrycie położenia przewodów zasilających, 3 – oznaczenie innych przewodów niż przewód jezdny, 4 – błędne wykrycie obiektu zewnętrznego, 5 – poprawne wykrycie symulowanego miejsca, 6 – błędne wykrycie symulowanego miejsca dla filmów

Tabela 1. Podsumowanie wyników testów – liczby wykrytych zdarzeń

L.p.	Zdarzenie	Film nr 1	Film nr 2	Film nr 3
1.	niewykrycie właściwego położenia pantografu	4	4	85
2.	niewykrycie położenia przewodów zasilających	23	19	6*
3.	oznaczenie innych przewodów niż przewód jezdny	9	9	2*
4.	błędne wykrycie obiektu zewnętrznego	8	2	3*
5.	poprawne wykrycie symulowanego miejsca	1	2	0*
6.	błędne wykrycie symulowanego miejsca dla filmów	7	0	3*

\* – podczas wykrywania wadliwego położenia wstrzymano oznaczanie innych zdarzeń

Tabela 2. Podsumowanie wyników testów – procentowa skuteczność zaproponowanego urządzenia (w ujęciu czasowym)

L.p.	Zdarzenie	Film nr 1	Film nr 2	Film nr 3
1.	poprawne wykrycie położenia pantografu	96%	96%	23%
2.	poprawne wykrycie przewodu jezdnego	67%	75%	x
3.	poprawne zgłoszenie alarmu	12,5%	100%	x

x – niska skuteczność wyznaczenia położenia pantografu uniemożliwia podanie wiarygodnych danych

W trakcie testów stwierdzono, że wykrywanie ślizgu odbywało się prawidłowo, a błędy jego wykrycia były nieliczne. Zaobserwowano jednak błędy przy wykrywaniu sieci trakcyjnej, które spowodowane były m.in. pojawieniem się elementów w tle podobnych do wykrywanych. Przykładowo na rysunku 8a pokazano błędne wykrycie słupa jako przewodu jezdnego, a na rysunku 8b wykrycie wieszaka sieci jako przewodu jezdnego. Warto zwrócić uwagę, że film nr 3. zarejestrowano przy prędkości pociągu na tyle dużej, że powodowała boczne nieustanne drgania kamery.

Uzyskane rezultaty dowodzą, że na skuteczność detekcji duży wpływ ma jakość rejestrowanego obrazu związana z drganiami pojazdu oraz sieci trakcyjnej. Również poprawna detekcja sieci trakcyjnej przy jej szybkim ruchu wzglę-

dem ślizgu stwarza problemy, jednak urządzenie po dalszym dopracowaniu może być cenną pomocą przy szybkiej analizie parametrów sieci trakcyjnej.



Rys. 8. Przykładowe błędy w działaniu oprogramowania: a) wykrycie słupa zamiast przewodu jezdniego, b) wykrycie wieszaka sieci przewodu jezdniego

## Podsumowanie

W pracy zaprezentowano prototypowe urządzenie do badania parametrów sieci trakcyjnej. Wykazano, że tania platforma minikomputerowa, jaką jest Raspberry Pi 3B+ nadaje się do takich zadań, a warunki panujące na dachu pociągu (silny wiatr, wstrząsy) nie utrudniają jej działania. Również obudowa wykonana z PETG jest wystarczająco mocna, a zasilanie akumulatorowe zapewnia pracę w koniecznym czasie do przeprowadzenia badań.

Autorzy planują dalsze prace w zakresie podniesienia skuteczności działania urządzenia m.in. poprzez wykorzystanie stereowizji do precyzyjniejszego rozróżniania przewodów sieci trakcyjnej (odróżnienie przewodu jezdniego od linki nośnej) oraz zastosowanie tłumienia drgań kamery, co okazało się konieczne przy dużych prędkościach pojazdu. Opracowany prototyp może służyć jako wsparcie dla systemów pomiarów i diagnostyki sieci trakcyjnej a docelowo jako alternatywa do drogich urządzeń pomiarowych.

*Badania sfinansowano z programu MEiN „Doktorat wdrożeniowy” na podstawie umowy nr DWD/6/0041/2022 z dnia 20 stycznia 2023.*

**Autorzy:** dr inż. Adam Konieczka, Politechnika Poznańska, Instytut Automatyki i Robotyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: adam.konieczka@put.poznan.pl; dr hab. inż. Dorota Stachowiak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: dorota.stachowiak@put.poznan.pl; mgr inż. Adam Garczarek, Politechnika Poznańska, oraz Sieć Badawcza Łukasiewicz, Poznański Instytut Technologiczny, ul. Warszawska 181, 61-055 Poznań, E-mail: adam.garczarek@doctorate.put.poznan.pl, adam.garczarek@pit.lukasiewicz.gov.pl; mgr inż. Wojciech Dominiak, Politechnika Poznańska, Instytut Automatyki i Robotyki, E-mail: wojciechdominiak888@gmail.com.

## LITERATURA

- [1] Wu G., Dong K., Xu Z., Xiao S., Wei W., Chen H., Li J., Huang Z., Li, J., Gao G., Kang G., Tu C., Huang X., Pantograph-catenary electrical contact system of high-speed railways: recent progress, challenges, and outlooks, *Rail. Eng. Science*, 30 (2022), No. 4, 437-467
- [2] Jiang T., Frøseth G.T., Návík P. Rønquist A., Assessment of pantograph-catenary interaction in a railway overlap section via a novel optical-based method, *Mechanism and Machine Theory*, 177 (2022), 105045
- [3] Karwowski K., Mizan M., Karkosiński D., Monitoring of current collectors on the railway line, *Transport*, 33 (2016), 1-9
- [4] Garczarek A., Stachowiak D., Badania statyczne odbieraków prądu w procesie produkcji oraz w trakcie eksploatacji, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 98 (2022), nr 9, 64-68
- [5] Li B., Kang G., Wang H., Liu H., Lin J., Wang J., Wang Y., Toward Reliable High-Speed Railway Pantograph-Catenary System State Detection: Multitask Deep Neural Networks With Runtime Reliability Monitoring, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 73 (2024), 1-11
- [6] Skibicki J., Metody pomiaru drgań górnej sieci jezdnej, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 1 (2016), nr 7, 146-150
- [7] Wu C., Catenary components state detection method based on the dimension reduction-kernel extreme learning machine, *Infrared Physics & Technology*, 136 (2024), 105079
- [8] Yao X., Xing Z., Zhang Z., Sheng, A., The online monitoring system of pantograph slider based on 2D laser displacement sensors, *Measurement*, 194 (2022), 111083
- [9] Tan P., Li X., Wu Z., Ding J., Ma J., Chen Y., Fang Y., Ning, Y., Multialgorithm Fusion Image Processing for High Speed Railway Dropper Failure-Defect Detection, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 51 (2021), No. 7, 4466-4478
- [10] Zhang D., Gao S., Yu L., Kang G., Zhan D., Wei X., A Robust Pantograph-Catenary Interaction Condition Monitoring Method Based on Deep Convolutional Network, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69 (2020), No. 5, 1920-1929
- [11] Arafat M. Y., Adnan M. F., Islam Md. F., AI-based Affordable High-density Traffic Monitoring System, *International Conference on Next-Generation Computing, IoT and Machine Learning (NCIM)*, (2023), 1-5
- [12] Mishra P. K., Dhar S., Kalra M. K., Landslide detection system using computer vision approach and Raspberry Pi, *International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, (2019), 1201-1206
- [13] Valdez D. B., Godmalin R. A. G., Bunga A. J. M., Vision-based Real-Time Disaster Recognition Monitoring System using Raspberry Pi and Deep Learning Model, *2nd International Seminar on Machine Learning, Optimization, and Data Science (ISMODE)*, (2022), 127-131
- [14] Rantelobo K., Indraswara M. A., Sastra N. P., Wiharta D. M., Lami H. F. J., Kotta H. Z., Monitoring Systems for Counting People using Raspberry Pi 3, *International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS)*, (2018), 57-60
- [15] PN-EN 50367:2021-06 Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacjonarne i tabor kolejowy – Kryteria w celu osiągnięcia kompatybilności technicznej między pantografami a siecią jezdnią górną
- [16] Home, OpenCV. [Online]. Dostępne na: <https://opencv.org/> Dostęp: 16 marca 2024
- [17] PN-EN 50206-1:2010 Zastosowania kolejowe – Tabor Pantografy: Charakterystyki i badania – Część 1: Pantografy pojazdów linii głównych
- [18] Instrukcja utrzymania sieci trakcyjnej let-2 (2020), Instrukcje PKP Polskich Linii Kolejowych S.A.