

SKIBICKI Jacek¹

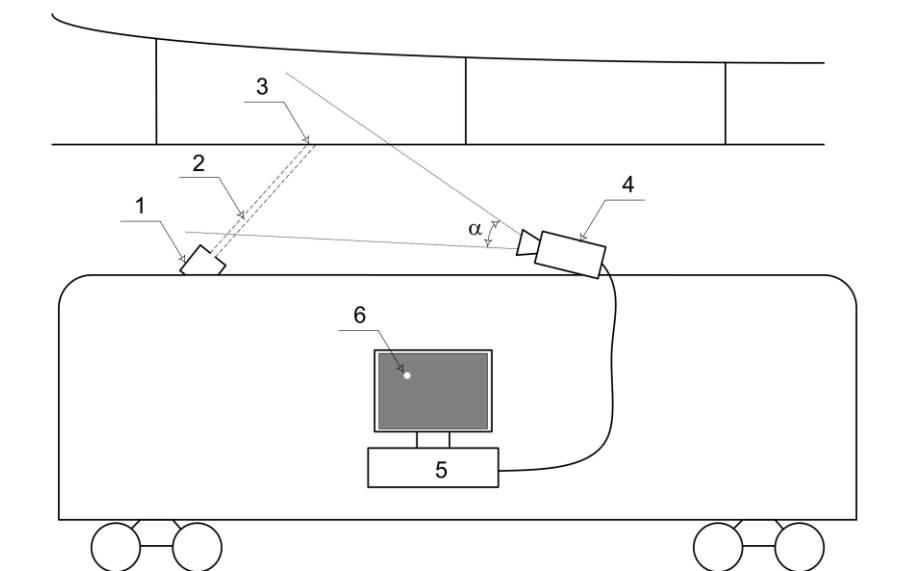
Analiza wymagań sprzętowych dla bezkontaktowego systemu pomiaru położenia przewodu jezdnej sieci trakcyjnej do celów diagnostycznych

WSTĘP

Zwiększanie mocy pojazdów trakcyjnych oraz podnoszenie ich prędkości sprawia, że rosną wymagania techniczne jakie musi spełniać sieć trakcyjna jezdna. Można tutaj wymienić zarówno te związane z koniecznością dostarczenia odpowiedniej mocy do pojazdu, jak i wymagania związane z parametrami geometrycznymi samej sieci. Zapewnienie właściwej geometrii sieci jezdnej jest ściśle powiązane z pojęciem jej diagnostyki technicznej. Wśród istniejących systemów diagnostyki możemy wyróżnić metody oparte na kontaktowych sposobach pomiaru wykorzystujących zmodyfikowane odbieraki prądu, oraz bezkontaktowych wykorzystujących lasery i kamery obrazowe [1, 2]. W artykule przedstawiono wymagania sprzętowe związane z akwizycją obrazu dla zaproponowanej bezkontaktowej metody pomiaru położenia przewodu jezdnej sieci trakcyjnej wraz z konkretnymi przykładowymi rozwiązaniami poszczególnych problemów.

1 ZAŁOŻENIA METODY POMIAROWEJ

Proponowana bezkontaktowa metoda lokalizacji przewodu jezdnej sieci trakcyjnej wykorzystuje technikę optyczną połączoną z zaawansowaną analizą obrazu. Idea pomiaru została przedstawiona na rysunku 1.



Rys. 1. Idea pomiaru położenia przewodu jezdnej (opis w tekście)

Umieszczone na dachu pojazdu diagnostycznego źródło światła (1) emituje szczelinową wiązkę podobną do kurtyny świetlnej (2) padającą na przewody jezdnej sieci trakcyjnej (3). Światło odbite od tych przewodów rejestrowane jest przez kamerę (4). Kąt widzenia obiektywu tej kamery musi być dobrany tak, by przewód jezdny w płaszczyźnie przecięcia wiązki światła zawsze leżał w jej polu widzenia. Pole to musi obejmować zakres dopuszczalnych zmian położenia przewodu wraz z

¹ Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel. 58 347 29 71, e-mail: j.skibicki@eia.pg.gda.pl

złożonym obszarem przekroczeń wartości dopuszczalnych. Obraz w postaci plamki świetlnej odbitej od przewodów (6), jest zapisywany przez rejestrator komputerowy (5). Przemieszczanie plamki świetlnej w polu obrazowym odpowiada przemieszczaniu się przewodu jezdnego sieci trakcyjnej. Komputerowa analiza obrazu pozwala na otrzymanie docelowych wyników pomiarowych. Szczegółowe założenia metody zostały zaprezentowane w [3].

2 AKWIZYCJA OBRAZU – WYMAGANIA SPRZĘTOWE

Aby zrealizować pomiar położenia przewodu jezdnego przy wykorzystaniu proponowanej metody konieczne jest uzyskanie poprawnego technicznie obrazu zawierającego obraz plamki lub plamek świetlnych odbitych od przewodów jezdnych, który to obraz zostanie później poddany właściwej analizie komputerowej. Do tego celu potrzebny jest następujący sprzęt:

- kamera obrazowa;
- obiektyw wraz z filtrem optycznym;
- karta przechwytywania obrazu;
- oświetlacz szczelinowy.

Poniżej zostanie przedstawiona szczegółowa analiza wymagań jakie muszą być spełnione przez poszczególne elementy układu pomiarowego wraz z przykładowymi, wybranymi jako prototypowe, rozwiązaniami praktycznymi.

2.1 Kamera obrazowa

Wymagania techniczne stawiane kamerze obrazowej związane są z trzema podstawowymi parametrami, tj. szybkością zapisu (liczbą klatek na sekundę), rozdzielczością obrazu oraz prędkością migawki czyli czasem rejestracji pojedynczej klatki. W większości kamer pierwszy i trzeci parametr są ze sobą powiązane, tzn. prędkość migawki jest odwrotnością szybkości zapisu. Szybkość zapisu determinuje gęstość pomiarów, czyli określa z jaką rozdzielczością będą one realizowane. Oczywistym jest, że im wyższa prędkość jazdy pojazdu diagnostycznego tym szybkość zapisu musi być większa aby zapewnić założoną rozdzielczość pomiaru. Wymagana szybkość kamery w zależności od prędkości jazdy i założonej rozdzielczości pomiaru została pokazana w tabeli 1.

Tab. 1. Wymagana szybkość kamery w zależności od prędkości jazdy i założonej rozdzielczości pomiaru

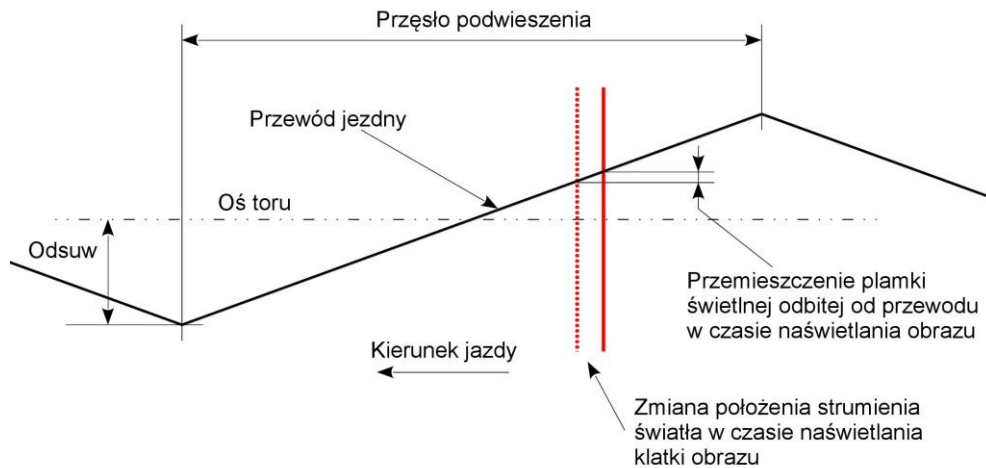
Prędkość jazdy [km/h]	Założona minimalna rozdzielczość pomiaru [m]						
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
50	139	69	46	35	28	23	20
100	278	139	93	69	56	46	40
150	417	208	139	104	83	69	60
200	556	278	185	139	111	93	79
250	694	347	231	174	139	116	99
300	833	417	278	208	167	139	119
Minimalna szybkość kamery [kl/s]							

Rozdzielczość obrazu rejestrowanego przez kamerę ma bezpośrednie przełożenie na dokładność pomiaru, tzn. im wyższa rozdzielczość tym dokładność pomiaru będzie wzrastać. Należy jednak pamiętać, że zwiększanie rozdzielczości liniowej obrazu powoduje wzrost ilości informacji generowanej przez kamerę, który to wzrost jest proporcjonalny do kwadratu zmian rozdzielczości liniowej. Przykładowo zmiana rozdzielczości kamery z 1000 x 1000 pikseli na 2000 x 2000 pikseli (dwukrotny wzrost rozdzielczości liniowej) spowoduje czterokrotne zwiększenie ilości informacji. Połączenie wymagań jak najwyższej rozdzielczości z dużą szybkością rejestracji (patrz tabela 1) wymusza zatem kompromis, gdyż jednoczesne zapewnienie bardzo wysokich wartości obu parametrów jest niemożliwe.

Trzecim parametrem kamery jaki musi zostać przeanalizowany jest szybkość migawki, czyli czas potrzebny do rejestracji pojedynczej klatki obrazu. Czas ten musi być na tyle krótki, aby uzyskać wystarczająco ostry, nieporuszony obraz plamki światła odbitej od przewodu jezdnego. Nie jest natomiast istotny stopień ostrości, czy też poruszenia tła obrazowego. Aby określić wymaganą



szybkość migawki kamery należy ocenić maksymalną możliwą prędkość przemieszczania się przewodu jezdny w polu obrazowym. Przesunięcie to może następować zarówno w płaszczyźnie poziomej jak i pionowej. Mechanizm powstawania poruszenia obrazu na skutek przemieszczania się przewodu jezdny w płaszczyźnie poziomej pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Poruszenie obrazu na skutek przemieszczania przewodu jezdny w płaszczyźnie poziomej

Analizując mechanizm przedstawiony na rysunku 2. można dojść do wniosku, że w sytuacji gdy prędkość jazdy pojazdu diagnostycznego jest większa od zera, a czas rejestracji obrazu nie jest nieskończenie krótki, obraz plamki świetlnej odbitej od przewodu zawsze będzie poruszony. Istotne jest jednak aby to poruszenie nie było na tyle duże by uniemożliwić poprawną interpretację uzyskanego obrazu. Jako maksymalną wielkość nieprzeszkadzającego poruszenia obrazu można przyjąć przesunięcie przewodu w płaszczyźnie poziomej równe 20% jego średnicy. Przy takich założeniach maksymalny czas rejestracji obrazu jest dany zależnością:

$$t \leq \frac{0,2 \cdot l \cdot D}{2 \cdot x \cdot v} \quad (1)$$

gdzie:

- l – długość przęsła podwieszenia [m];
- D – średnica przewodu jezdny [m];
- x – maksymalna wartość odsuwu [m];
- v – prędkość jazdy pojazdu diagnostycznego [m/s].

Dla parametrów typowej sieci trakcyjnej, (długość przęsła 60 m, odsuw 30 cm, średnica przewodu 1,2 cm), maksymalny czas naświetlania klatki obrazu w zależności od prędkości jazdy został pokazany w tabeli 2.

Tab. 2. Maksymalny czas naświetlania w zależności od prędkości jazdy dla typowej sieci trakcyjnej

Prędkość jazdy [km/h]	50	100	150	200	250	300
Maksymalny czas naświetlania klatki [ms]	17,3	8,6	5,8	4,3	3,4	2,9

Oprócz przesunięć poziomych przewód jezdny zmienia swoje położenie również w osi pionowej. Jednak szybkość tych zmian, zarówno w skali globalnej (zmiana wysokości zawieszenia) jak i lokalnej (zwis wstępny na długości przęsła czy też zwis międzywieszakowy) jest znacznie mniejsza niż dla przesunięć w osi poziomej. Czasy naświetlania podane w tabeli 2 zapewniają więc uzyskanie wystarczająco ostrego obrazu również podczas przesunięć przewodu w osi pionowej.

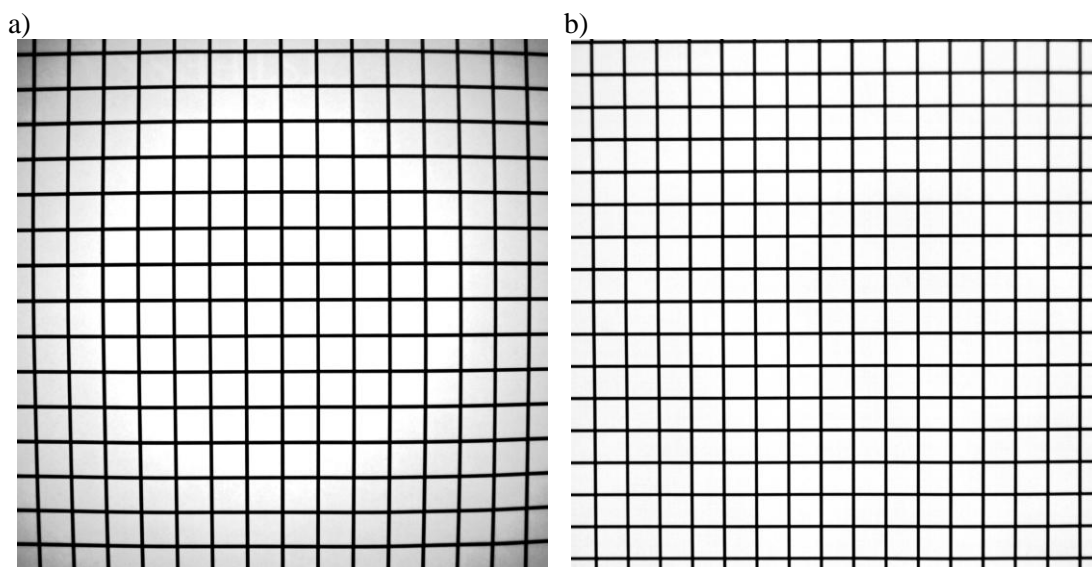


Produkowane współcześnie kamery szybkie umożliwiają rejestrację obrazu z szybkością przekraczającą nawet milion klatek na sekundę. Tak szybka rejestracja nie jest jednak możliwa w trybie ciągłym. Ograniczenie stanowi tu transfer danych z kamery do urządzenia przechwytyjącego. najszybszy obecnie transfer zapewnia standard Camera Link, który umożliwia transmisję danych z prędkością do 850 MB/s. To zapewnia, przy rozdzielczości 4 Mpix, ciągłą rejestrację obrazu z szybkością 180 kl/s. Przy zmniejszeniu rozdzielczości do 2 Mpix maksymalna szybkość wzrasta do 340 kl/s. Do badań eksperymentalnych wybrano kamerę Basler acA2040–180kc, o następujących podstawowych parametrach:

- rozdzielczość: 2046x2046 pikseli;
- szybkość rejestracji: 180 kl/s;
- interfejs: Camera Link;
- mocowanie obiektywu: C-mount;
- wymiary sensora: 11,26x11,26 mm.

2.2 Obiektyw

Jako że pomiar położenia przewodu oparty jest na śledzeniu plamki światła odbitej od jego powierzchni, a wyniki uzyskiwane są na drodze obliczeń na podstawie położenia plamki na obrazie (szczegółowe omówienie zasady pomiaru zamieszczono w [3]), wymagania odnośnie jakości technicznej obiektywu są bardzo wysokie. Szczególnie istotne jest aby geometria obrazu była poprawna, gdyż jakiegokolwiek zniekształcenia wnoszone w tej materii przez obiektyw przekładają się bezpośrednio na wyniki pomiarów. Wybrana kamera wymaga obiektywów z mocowaniem C-mount dostosowanych do przetwornika 1 calowego. Mogą być również, przy zastosowaniu stosownej przejściówki wykorzystywane obiektywy od lusterek małoobrazkowych. Niestety po wykonaniu prób okazało się, że nowoczesne obiektywy renomowanych firm dedykowane do kamer z mocowaniem C-mount nie spełniają stawianych im wymagań jeśli chodzi o geometrię obrazu. Wynika to z faktu, że ich konstruktorzy za główny cel obrali jak największą jasność obiektywów, co uniemożliwiło jednoczesne zapewnienie dobrej geometrii pola obrazowego. Obiektywy takie nie nadają się więc do wykorzystania w rozpatrywanym przypadku. Sięgnięto zatem po klasyczne obiektywy przeznaczone do lusterek małoobrazkowych, które okazały się zdecydowanie lepsze optycznie od współczesnych konstrukcji. Na rysunku 3 pokazano obrazy testowe uzyskane przez obiektyw dedykowany Schneider – Kreuznach Cinegon 1,8/16 mm, oraz Mir 1B 2,8/37 mm od lustrzanki małoobrazkowej. Oba obrazy zarejestrowano przy pełnym otworze względnym obiektywów.



Rys. 3. Obrazy testowe, gdzie: a) Schneider – Kreuznach Cinegon 1,8/16; b) Mir 1B 2,8/37



Na rysunku 3a widoczne są silne zniekształcenia beczkowate, a także znaczne winietowanie oraz spadek ostrości na brzegach kadru. Wolny od tych wad jest obraz widoczny na rysunku 3b, dlatego do badań eksperymentalnych wybrano obiektyw Mir 1B, zamocowany do kamery za pomocą przejściówki m42x1/C-mount.

2.3 Karta przechwytywania obrazu

Strumień danych obrazowych generowanych przez kamerę musi zostać przechwycony i zapisany w pamięci urządzenia rejestrującego (komputera). Konieczne jest więc zastosowanie karty przechwytywania obrazu (ang. frame grabber). Karta ta musi być dostosowana do standardu transmisji Camera Link wykorzystywanego przez kamerę, oraz umożliwiać przechwycenie strumienia danych z dużą prędkością. W standardzie Camera Link obecnie dostępne są karty pozwalające na rejestrację danych z prędkościami: podstawową 255 MB/s, średnią 510 MB/s, pełną 680 MB/s oraz pełną rozszerzoną 850 MB/s. Poszczególne szybkości są zgodne ze standardem Camera Link. Dostępne standardy złącza to: PCI (prędkości podstawowa i średnia), PCIe oraz PXI (wszystkie prędkości rejestracji). Karta ze złączem typu PXI wymaga ponadto specjalnej wersji komputera zbudowanej w standardzie modułowym PXI. Z dostępnych na rynku urządzeń wybrano kartę PCIE-1433 firmy National Instruments, dedykowaną do współpracy z kamerą Basler, zdolną przechwytywać obraz z prędkością do 850 MB/s, wykonaną w standardzie PCIe, czyli możliwą do zamontowania w standardowym komputerze klasy PC.

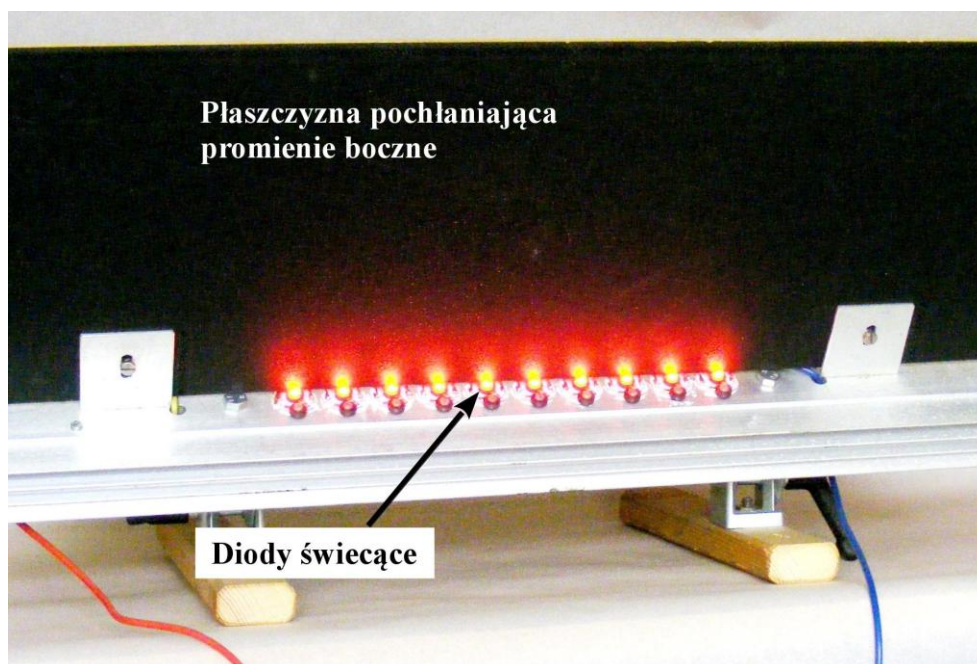
Oprócz przechwycenia obrazu konieczne jest jeszcze zarejestrowanie uzyskanych danych. Zapis do pamięci dyskowej z prędkością typową dla standardu Camera Link niesie za sobą szereg trudności. Jedynymi urządzeniami, które umożliwiają zapis danych z tak dużymi szybkościami są macierze dyskowe. Jako przykład takiego urządzenia można podać macierz NI HDD-8265 produkcji National Instruments o pojemności 24 TB i szybkości zapisu 750 MB/s. Takie parametry umożliwiają (dla wybranej kamery) zapis z pełną szybkością 180 kl/s i przy maksymalnej rozdzielczości przez prawie 9 h. Ponieważ jednak obecnie prowadzone prace badawcze będące na etapie sprawdzania słuszności założeń i koncepcji pomiaru, nie wymagają uzyskiwania wysokich szybkości rejestracji, tymczasowo zrezygnowano z zakupu macierzy dyskowej (będącej najbardziej kosztownym elementem całego układu pomiarowego) poprzestając na zapisie danych na zwykłym dysku twardym komputera. Oczywiście ograniczyło to w sposób znaczący maksymalną szybkość rejestracji obrazu.

2.4 Oświetlacz szczelinowy

Kolejnym elementem bardzo istotnym, dla poprawnego działania układu pomiarowego jest oświetlacz szczelinowy. Jego zadaniem jest wyemitowanie płaskiej wiązki świetlnej, która odbije się od powierzchni przewodu i trafi do kamery obrazowej, dając tam obraz w postaci jasnych plamek. Konstrukcja oświetlacza powinna spełniać następujące wymagania techniczne:

- emitowany strumień świetlny musi mieć kształt szerokiej płaskiej wiązki, której grubość nie będzie zmieniać się w sposób znaczący w zależności od odległości od źródła;
- źródło światła powinno mieć charakter monochromatyczny, czyli emitować światło o jednej długości fali, ewentualnie o wąskim zakresie tej długości;
- ze względu na wymagany krótki czas rejestracji obrazu, zwłaszcza przy większych prędkościach jazdy, natężenie strumienia świetlnego powinno być możliwie duże;
- emitowany strumień światła nie może być niebezpieczny dla wzroku.

W pierwszej kolejności wzięto pod uwagę wykorzystanie jako oświetlacza światła laserowego. Jednak moc dostępnych standardowo oświetlaczy dających płaskorównoległy strumień światła jest zbyt niska jak dla potrzeb stanowiska. Ponadto światło laserowe jest niebezpieczne dla wzroku tak więc jego zastosowanie nie byłoby wskazane. Zdecydowano się więc na wykorzystanie, jako źródła światła, standardowych diod LED dużej mocy wraz ze specjalną konstrukcją zapewniającą uzyskanie strumienia świetlnego o wymaganym kształcie i parametrach. Prototyp oświetlacza pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Prototyp oświetlacza szczelinowego (jedna strona płaszczyny pochłaniającej jest usunięta)

Źródłem światła w prototypowym oświetlaczu jest 10 diod LED koloru czerwonego typu HPA8B-45K5R o mocy 5 W każda i kącie rozsyłu wynoszącym 35° . Zdecydowano się na użycie diod koloru czerwonego ze względu na fakt, że niewiele elementów w naturze ma kolor czerwony, w związku z tym występują mniejsze trudności w filtracji sygnału. Kolor czerwony jest oczywiście składową widma światła białego, tak że całkowite jego wyeliminowanie z otoczenia jest niemożliwe, ale stopień wpływu promieniowania tła jest, dla barwy czerwonej, zdecydowanie mniejszy niż dla innych kolorów.

Płaskorównoległą wiązkę uzyskano za pomocą specjalnej osłony składającej się z dwóch płaskich powierzchni zamocowanych równolegle pomalowanych od środka na kolor czarny matowy, których zadaniem jest pochłonięcie wszelkich promieni bocznych emitowanych przez diody. W rezultacie oświetlacz emituje wiązkę światła o wymaganych parametrach, zachowującą zadowalającą spójność na dystansie około 2,5 m, a więc wystarczającą dla potrzeb stanowiska pomiarowego.

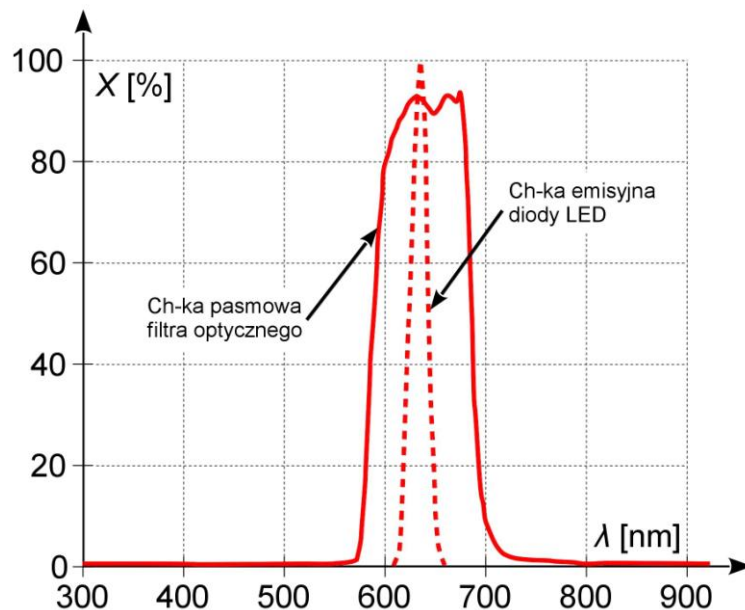
2.5 Filtr optyczny

Obraz rejestrowany przez kamerę jest obrazem barwnym zawierającym oprócz sygnału właściwego tj. obrazu plamek świetlnych odbitych od przewodów, również szereg informacji zbędnych, które muszą zostać usunięte w trakcie cyfrowej obróbki obrazu. Aby uprościć w pewnym stopniu tą obróbkę, część informacji zaburzających może zostać ograniczona już na etapie rejestracji obrazu poprzez odpowiednią filtrację optyczną.

W tym celu zastosowano filtr pasmowo przepustowy typu BP-640-100 firmy Schneider Kreuznach, o częstotliwości środkowej równej 640 nm i szerokości pasma przepuszczanego wynoszącej 100 nm. Charakterystyka częstotliwościowa tego filtra jest dopasowana do pasma emisyjnego czerwonej diody świecącej. Porównanie charakterystyk filtra optycznego i diody pokazano na rysunku 5.

Oczywiście, ponieważ światło widzialne dzienne (białe) zawiera w sobie również składową czerwoną, zastosowany filtr nie wyeliminuje całkowicie niepożądanych elementów z tła obrazowego. Pozwoli jednak na ich stłumienie i tym samym na uwypuklenie promieni odbitych od przewodu jezdnej sieci trakcyjnej. Późniejsza obróbka cyfrowa takiego obrazu będzie prostsza i wymagająca mniejszej liczby operacji, a więc szybsza w realizacji.

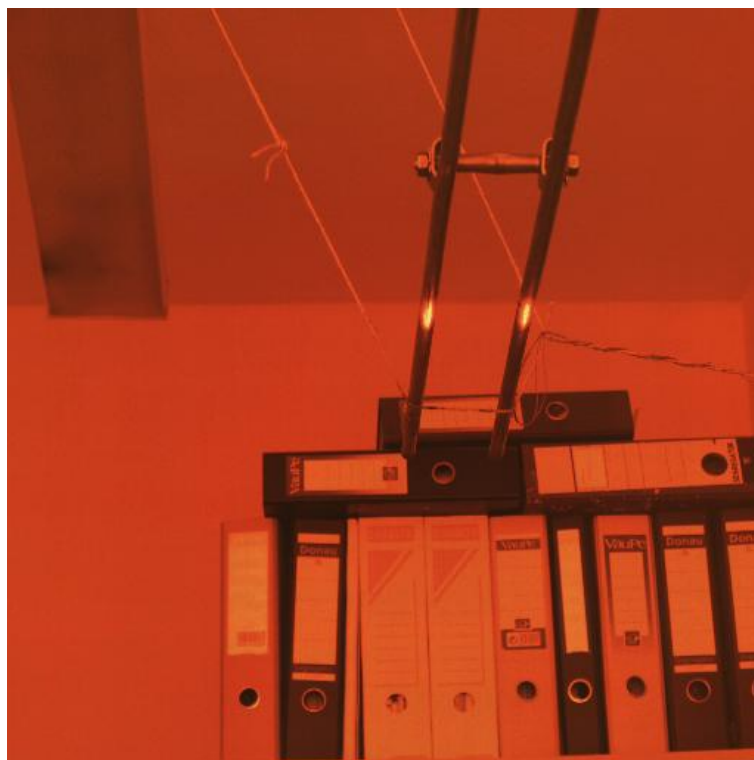




Rys. 5. Porównanie charakterystyki pasmowej filtra optycznego i charakterystyki emisyjnej diody LED

3 PRZYKŁADOWE REZULTATY

W celu weryfikacji przedstawionych powyżej założeń technicznych poszczególnych elementów składowych układu pomiaru położenia przewodu jezdnego sieci trakcyjnej zbudowano stacjonarne stanowisko laboratoryjne w skali 1:1. Przykładową klatkę obrazową zarejestrowaną przy wykorzystaniu tego stanowiska pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Przykładowy obraz zarejestrowany przy wykorzystaniu stacjonarnego stanowiska laboratoryjnego

Jak widać wyraźnie, obraz przedstawiony na rysunku 6 zawiera dwie, jaśniejsze od otoczenia, plamki świetlne będące odbiciem strumienia emitowanego przez szczelinowe źródło światła od przewodów jezdnych sieci trakcyjnej. Oczywiście prezentowany obraz nie jest jeszcze wynikiem pomiaru. W celu uzyskania tego wyniku obraz ten musi zostać poddany obróbce komputerowej, w czasie której zostaną z niego usunięte wszystkie elementy niebędące odbiciem światła od przewodów

jezdnych. Obraz wynikowy po takim przekształceniu powinien zawierać jedynie wspomniane plamki świetlne na czarnym tle. Kolejnym etapem jest ustalenie położenia tych plamek na obrazie i na tej podstawie, oraz biorąc pod uwagę stałe wymiary charakterystyczne układu pomiarowego, można uzyskać wynik pomiaru czyli informację o aktualnym położeniu w przestrzeni przewodu (przewodów) jezdnej sieci trakcyjnej [3].

WNIOSKI

Diagnostyka sieci trakcyjnej jest niezwykle ważnym elementem pozwalającym na prawidłowe funkcjonowanie zelektryfikowanego systemu transportu kolejowego. Wykorzystanie systemów pomiaru bezkontaktowego pozwala na sprawdzenie geometrii sieci jezdnej w stanie statycznym (bez oddziaływania odbieraka prądu na sieć). Wykonywanie diagnostyki zarówno przy użyciu systemów kontaktowych i bezkontaktowych pozwala na w pełni kompleksową diagnostykę sieci jezdnej. Przedstawione w artykule rozważania dotyczące parametrów technicznych elementów składowych stanowiska pomiarowego pokazujące złożoność zagadnienia, są etapem przybliżającym do opracowania w pełni funkcjonalnej, nowoczesnej metody bezkontaktowego pomiaru położenia przewodu jezdnej sieci trakcyjnej do celów diagnostycznych.

Streszczenie

Zwiększanie mocy pojazdów trakcyjnych oraz podnoszenie ich prędkości sprawia, że rosną wymagania techniczne jakie musi spełniać sieć trakcyjna jezdna. Można tutaj wymienić zarówno te związane z koniecznością dostarczenia odpowiedniej mocy do pojazdu, jak i wymagania związane z parametrami geometrycznymi samej sieci. Zapewnienie właściwej geometrii sieci jezdnej jest ściśle powiązane z pojęciem jej diagnostyki technicznej. Wśród istniejących systemów diagnostyki możemy wyróżnić metody oparte na kontaktowych sposobach pomiaru wykorzystujących zmodyfikowane odbieraki prądu, oraz bezkontaktowych wykorzystujących lasery i kamery obrazowe. W artykule przedstawiono wymagania sprzętowe związane z akwizycją obrazu dla bezkontaktowej metody pomiaru położenia przewodu jezdnej sieci trakcyjnej opartej na wykorzystaniu kamery obrazowej 2D. Analiza wymagań została uzupełniona konkretnymi przykładowymi rozwiązaniami poszczególnych problemów. Na zakończenie zaprezentowano przykładowe rezultaty uzyskane przy wykorzystaniu prototypowego stanowiska laboratoryjnego.

Analysis of the hardware requirements for contact-less measuring system of catenary contact wire position for diagnostic purposes

Abstract

Increase in the power consumed by electric traction vehicles and increase of their speed result in higher technical requirements for the contact line parameters. We can mention, both those connected with delivering a sufficient level of electric power to the vehicle, and those connected with geometrical parameters of the contact line itself. Ensuring proper geometry of contact line is closely related with the concept of the technical diagnostics. Among the existing diagnostic systems, we can distinguish methods based on contact measurement systems using modified current collectors, and contact-less systems using lasers and imaging cameras. This article presents the hardware requirements related to the acquisition of the image for the contact-less method of measuring the position of catenary contact wire, based on the use of 2D imaging camera. Requirements analysis was supplemented by specific examples of problems solutions. The example results received by using a prototype laboratory stand were also presented.

BIBLIOGRAFIA

1. Kiessling F. Contact lines for electric railways: planning, design, implementation, maintenance. Publicis 2009.
2. Fararooy S, Mair C. Review of railway overhead wire geometry measurement systems. IEE Current Collections for High Speed Trains Seminar, Ref. No. 1998. p. 4/1–4/4.
3. Skibicki J. The new version of contact-less method for localisation of catenary contact wire – theoretical assumption. Przegląd Elektrotechniczny 2013 nr 7.

