



POLITECHNIKA
GDAŃSKA



JACEK SKIBICKI

WIZYJNE METODY POMIAROWE
W DIAGNOSTYCE GÓRNEJ
SIECI TRAKCYJNEJ

GDAŃSK 2018

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Janusz T. Cieśliński

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Michał Szydłowski

REDAKTOR SERII

Zbigniew Krzemiński

RECENZENCI

Tadeusz Maciołek

Dariusz Świsulski

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

PROJEKT OKŁADKI

Jolanta Cieślawska

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
www.pg.edu.pl/wydawnictwo/katalog
zamówienia prosimy kierować na adres wydaw@pg.edu.pl

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2018

ISBN 978-83-7348-746-8

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 15,4, ark. druku 14,25, 174/1022

Druk i oprawa: Volumina.pl Daniel Krzanowski
ul. Księcia Witolda 7-9, 71-063 Szczecin, tel. 91 812 09 08

Autor dziękuje Kolegom Pawłowi Bawolskiemu i Sławomirowi Judkowi za pomoc w realizacji badań eksperymentalnych, a Przełożonym oraz Współpracownikom i Bliskim za życzliwe wsparcie.

Szczególne podziękowania autor składa Dyrekcji i Pracownikom Zakładu Północnego PKP Energetyka SA w Sopocie oraz Koledze Mateuszowi Płonce za wyrażenie zgody, organizację i pomoc przy wykonywaniu pomiarów na linii kolejowej.

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	9
1. WSTĘP	13
1.1. Przedmiot, cel i zakres rozprawy	13
1.2. Zawartość rozprawy	14
2. DIAGNOSTYKA GÓRNEJ SIECI TRAKCYJNEJ I ODBIERAKÓW PRĄDU	16
2.1. Podstawowe informacje o sieci trakcyjnej i odbierakach prądu	16
2.1.1. Budowa górnej sieci trakcyjnej	16
2.1.2. Odbieraki prądu	20
2.2. Znaczenie diagnostyki górnej sieci trakcyjnej i odbieraków prądu	21
2.3. Przegląd systemów diagnostyki stanu technicznego sieci trakcyjnej i odbieraków prądu	22
2.3.1. Diagnostyka sieci trakcyjnej	23
2.3.2. Diagnostyka odbieraków prądu	29
2.3.3. Monitoring współpracy odbieraków prądu z siecią trakcyjną	31
3. WIZYJNA METODA POMIARU GEOMETRII I PRZEMIESZCZEŃ SIECI TRAKCYJNEJ ...	33
3.1. Zasada pomiaru wizyjnego z użyciem kamery obrazowej	33
3.2. Metoda wizyjna do pomiaru przemieszczeń elementów sieci trakcyjnej wywołanych oddziaływaniem odbieraka prądu pojazdu	35
3.2.1. Pomiar przemieszczeń elementów sieci trakcyjnej w konfiguracji przestrzennej „z boku”	36
3.2.2. Pomiar przemieszczeń elementów sieci trakcyjnej w konfiguracji przestrzennej „z ukosa”	37
3.3. Metoda wizyjna do pomiaru geometrii przewodów jezdnych sieci trakcyjnej w celach diagnostycznych	39
3.3.1. Specyfika pomiaru geometrii sieci jezdnej na łuku – wymagane poprawki	42
3.3.2. Korekta ruchów pudła wagonu diagnostycznego	47
3.4. Wymagania sprzętowe, dobór przyrządów pomiarowych i wyposażenia dodatkowego	51
3.4.1. Kamera obrazowa	51
3.4.2. Obiektywy	53
3.4.3. Karta przechwytywania obrazu wraz z urządzeniem rejestrującym	55
3.4.4. Oświetlacz szczelinowy	56
3.4.5. Filtr optyczny	57
3.4.6. Pozostały sprzęt pomiarowy i rejestrujący oraz oprogramowanie	58
4. PRZETWARZANIE OBRAZU	60
4.1. Przetwarzanie obrazu w wizyjnych systemach pomiarowych	60
4.1.1. Etapy przetwarzania obrazu	60
4.1.1.1. Wyciąg barwny	61
4.1.1.2. Progowanie barwne	63
4.1.1.3. Przekształcenia morfologiczne	65

4.1.1.4. Częściowa filtracja	67
4.1.1.5. Odczytanie położenia punktów pomiarowych na matrycy	68
4.2. Zagadnienie korekty błędów przetwarzania obrazu	72
4.2.1. Korekta wstępna	73
4.2.2. Korekta właściwa	75
4.3. Uzyskanie wyniku pomiaru położenia obrazu obiektu na matrycy	79
5. ANALIZA NIEPEWNOŚCI POMIARU	81
5.1. Niepewność pomiaru – informacje ogólne	81
5.2. Kamera jako przyrząd pomiarowy	82
5.2.1. Wpływ poziomu oświetlenia – jasności obrazu mierzonego obiektu	83
5.2.2. Wpływ czułości matrycy kamery	86
5.2.3. Wpływ odległości od obiektu mierzonego związanej z ogniskową zastosowanego obiektywu	88
5.2.4. Niepewność pomiaru współrzędnych obiektu na powierzchni matrycy kamery w stabilnych warunkach środowiskowych	90
5.2.5. Wpływ zmian temperatury otoczenia i procesów termicznych zachodzących wewnątrz kamery	91
5.2.6. Wpływ drgań komunikacyjnych	96
5.2.7. Pomiar współrzędnych obiektu na powierzchni matrycy kamery w zmiennych warunkach środowiskowych	102
5.3. Wpływ konfiguracji przestrzennej na niepewność dla pomiarów przemieszczeń elementów sieci trakcyjnej wywołanych oddziaływaniem odbieraka prądu	102
5.3.1. Niepewność pomiaru dla wariantu „na wprost”	103
5.3.1.1. Współczynniki wrażliwości	104
5.3.1.2. Niepewność pomiaru odległości k pomiędzy centralnym punktem płaszczyzny obiektu a płaszczyzną obrazu	105
5.3.1.3. Niepewność pomiaru odległości F_f pomiędzy środkiem optycznym obiektywu a płaszczyzną obrazu	105
5.3.1.4. Niepewność pomiaru położenia obrazu obiektu x', y' na powierzchni matrycy	108
5.3.1.5. Końcowa niepewność standardowa pomiaru dla wariantu „na wprost”	109
5.3.2. Niepewność pomiaru dla wariantu „z boku”	110
5.3.2.1. Współczynniki wrażliwości dla pomiaru w osi poziomej x	110
5.3.2.2. Współczynniki wrażliwości dla pomiaru w osi pionowej y	112
5.3.2.3. Niepewność pomiaru kąta α pomiędzy osią optyczną obiektywu a przewodem jezdnym	113
5.3.2.4. Końcowa niepewność standardowa pomiaru dla wariantu „z boku”	114
5.3.3. Niepewność pomiaru dla wariantu „z ukosa”	116
5.3.3.1. Współczynniki wrażliwości dla pomiaru w osi poziomej x	117
5.3.3.2. Współczynniki wrażliwości dla pomiaru w osi pionowej y	119
5.3.3.3. Niepewność pomiaru kąta β , tj. nachylenia kamery względem poziomu	121
5.3.3.4. Końcowa niepewność standardowa pomiaru dla wariantu „z ukosa”	124
5.3.4. Weryfikacja pomiarowa	125

5.4. Wpływ zmiany odległości pomiędzy kamerą a obiektem na niepewność dla pomiarów przemieszczeń elementów sieci trakcyjnej wywołanych oddziaływaniem odbieraka prądu	129
5.4.1. Minimalna odległość pomiaru	130
5.4.2. Maksymalna odległość pomiaru	131
5.4.3. Współczynniki wrażliwości	132
5.4.4. Niepewności pomiarów pośrednich	135
5.4.4.1. Niepewność pomiaru odległości k pomiędzy centralnym punktem płaszczyzny obiektu a płaszczyzną obrazu	135
5.4.4.2. Niepewność pomiaru odległości F_r pomiędzy środkiem optycznym obiektywu a płaszczyzną obrazu	135
5.4.4.3. Niepewność pomiaru położenia obrazu obiektu x', y' na powierzchni matrycy	135
5.4.4.4. Niepewność pomiaru kąta β , tj. nachylenia kamery względem poziomu	136
5.4.4.5. Niepewność pomiaru kąta α pomiędzy płaszczyzną, w której leży oś optyczna obiektywu, a płaszczyzną, w której leży przewód jezdny	136
5.4.5. Niepewność pomiaru końcowego	138
5.4.6. Weryfikacja pomiarowa	140
5.5. Niepewność pomiaru geometrii kolejowej sieci trakcyjnej przy użyciu wagonu diagnostycznego	143
5.5.1. Niepewność pomiaru w warunkach normalnych	144
5.5.1.1. Współczynniki wrażliwości	145
5.5.1.2. Niepewności pomiarów cząstkowych	151
5.5.1.3. Końcowa niepewność pomiaru w warunkach normalnych	152
5.5.2. Poziom niepewności dla pomiarów wykonywanych w warunkach innych niż normalne	153
5.5.2.1. Poziom niepewności dla pomiarów wykonywanych na łuku	153
5.5.2.2. Poziom niepewności dla pomiarów wykonywanych przy obecności poprzecznych wahań pudła pojazdu	157
5.5.3. Możliwości ograniczenia poziomu niepewności pomiaru	161
6. REZULTATY BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH	166
6.1. Pomiary oscylacji krótkiego odcinka przewodu jezdnego zamocowanego jednostronnie	166
6.1.1. Metoda i przedmiot pomiaru	166
6.1.2. Wyniki pomiarów	167
6.2. Pomiary oscylacji odcinka przewodu jezdnego zamocowanego dwustronnie	170
6.2.1. Metoda i przedmiot pomiaru	170
6.2.2. Wyniki pomiarów	175
6.3. Pomiary oscylacji sieci trakcyjnej jednoprzewodowej	177
6.3.1. Metoda i przedmiot pomiaru	178
6.3.2. Wyniki pomiarów	179
6.4. Detekcja krytycznie uszkodzonych nakładek stykowych odbieraków prądu	182
6.4.1. Metoda i przedmiot pomiaru	182
6.4.2. Wyniki pomiarów	184
6.5. Pomiary diagnostyczne kolejowej sieci trakcyjnej	187

6.5.1. Metoda i przedmiot pomiaru	187
6.5.2. Wyniki pomiarów	189
6.5.2.1. Pomiar w warunkach normalnych, tj. dla toru prostego w dobrym stanie technicznym	189
6.5.2.2. Wyniki pomiarów podczas jazdy po łuku	191
6.5.2.3. Wyniki pomiarów przy obecności poprzecznych wahań pudła pojazdu	193
6.5.3. Możliwości oceny stanu technicznego sieci trakcyjnej przy użyciu wizyjnego systemu pomiarowego	198
6.5.3.1. Ocena kompensacji termicznej sieci trakcyjnej	198
6.5.3.2. Kontrola stanu technicznego wieszaków	200
6.5.3.3. Pomiar geometrii sieci trakcyjnej w przęśle naprężenia	203
6.5.3.4. Pomiar geometrii sieci trakcyjnej w obszarze rozjazdów	204
7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	207
BIBLIOGRAFIA	210
STRESZCZENIE W JĘZYKU POLSKIM	223
STRESZCZENIE W JĘZYKU ANGIELSKIM	225

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

Oznaczenia

a	– odległość pomiędzy elementem pomiarowym a osią czopu skrętu wózka jezdnego
a_n	– odległość punktu pomiarowego od osi czopa skrętu wózka dla przewodu jezdnego zawieszonoego na wysokości znamionowej
A	– rozstaw pomiędzy osiami czopów skrętnych wózków pojazdu diagnostycznego
b	– odległość między punktem bazowym odchylenia a osią symetrii toru
d	– rozdzielczość odczytu wyniku z przyrządu pomiarowego
D	– średnica przewodu jezdnego
e	– odległość pomiędzy punktem bazowym odchylenia a podłużną osią symetrii wagonu diagnostycznego
e_n	– odległość pomiędzy podłużną osią symetrii wagonu diagnostycznego a położeniem punktu pomiarowego dla znamionowej wysokości zawieszenia przewodu jezdnego
f	– ogniskowa obiektywu
f_g	– częstotliwość graniczna filtra
F	– siła
F_f	– odległość między środkiem optycznym obiektywu a płaszczyzną obrazu
F_n	– siła naprężająca
F_w	– siła wymuszająca
h	– wysokość zawieszenia przewodu jezdnego nad główką szyny
h_b	– wysokość położenia poziomu bazowego względem główki szyny
h_k	– minimalna wysokość zamocowania kamery nad główką szyny
h_m	– wysokość zawieszenia przewodu jezdnego nad poziomem bazowym
h_n	– nominalna wysokość zawieszenia przewodu jezdnego nad główką szyny
h_p	– zmierzona wartość wysokości zawieszenia przewodu jezdnego
h_r	– rzeczywista wartość wysokości zawieszenia przewodu jezdnego
H	– czułość matrycy kamery
H_b	– bazowa czułość matrycy kamery
I	– prąd
k	– odległość między centralnym punktem płaszczyzny obiektu a płaszczyzną obrazu
k_r	– współczynnik rozszerzenia niepewności
l	– długość obiektu
l_{pix}	– wymiar pojedynczego piksela matrycy kamery
n	– liczba pomiarów
o	– wartość odsuwu
o_p	– zmierzona wartość odsuwu
o_r	– rzeczywista wartość odsuwu
$P_{\Delta T}$	– poprawka temperaturowa wyniku pomiaru
r	– promień łuku
r_{pix}	– liniowa rozdzielczość matrycy
R	– rezystancja
s	– droga
t	– czas
T	– temperatura
$u()$	– poziom niepewności standardowej wielkości mierzonej

U	– napięcie
$U()$	– poziom niepewności rozszerzonej wielkości mierzonej
v	– prędkość jazdy
v_d	– prędkość drgań
x	– położenie obiektu mierzonego w osi poziomej
x'	– położenie obrazu obiektu w osi poziomej płaszczyzny matrycy
x_w	– wymiar obiektu wzorcowego do wyznaczania ogniskowej obiektywu
x_w'	– wymiar obrazu obiektu wzorcowego na matrycy kamery
X	– współrzędne obrazu obiektu na matrycy w osi poziomej wyrażone w pikselach
X_K	– poziomy wymiar matrycy wyrażony w pikselach
X_{\min}	– współrzędne poziome lewego górnego rogu kadru na powierzchni matrycy
y	– położenie obiektu mierzonego w osi pionowej
y'	– położenie obrazu obiektu w osi pionowej płaszczyzny matrycy
Y	– współrzędne obrazu obiektu na matrycy w osi pionowej wyrażone w pikselach
Y_K	– pionowy wymiar matrycy wyrażony w pikselach
Y_{\min}	– współrzędne pionowe lewego górnego rogu kadru na powierzchni matrycy
α	– kąt odchylenia pomiędzy osią optyczną obiektywu a przewodem jezdny lub płaszczyzną, w której leży przewód jezdny
β	– kąt nachylenia kamery względem poziomu
γ	– kąt odchylenia poprzecznego wagonu od położenia zasadniczego
δ	– kąt nachylenia oświetlacza szczelinowego względem poziomu
λ	– długość fali świetlnej
θ	– współczynnik rozkładu statystycznego <i>t</i> -Studenta
ζ_d	– współczynnik niepewności pomiaru od obecności drgań
ζ_T	– współczynnik poprawki temperaturowej wyniku pomiaru
Θ	– stopień przepuszczalności fali świetlnej przez filtr optyczny
ρ	– kąt nachylenia podłużnego pojazdu diagnostycznego względem poziomu odniesienia
σ	– odchylenie standardowe rozrzutu stochastycznego
Ψ	– średni poziom jasności obrazu

Skróty

BIPM	– Międzynarodowe Biuro Miar i Wag (fr. Bureau International des Poids et Mesures)
BR	– Koleje Brytyjskie (ang. British Rail)
CCD	– typ matrycy światłoczułej (ang. <i>charge-coupled device</i>)
CCL	– Laboratorium Odbioru Prądu – japoński instytut naukowo-badawczy (ang. Current Collection Laboratory)
CD	– Koleje Czeskie (cz. České Dráhy)
CNTK	– Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa
COBiRTK	– Centralny Ośrodek Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa
DAQ	– moduł do zbierania danych pomiarowych (ang. <i>data acquisition</i>)
DB	– Koleje Niemieckie (niem. Deutsche Bahn AG)
DR	– Koleje Rzeszy Niemieckiej (niem. Deutsche Reichsbahn)
DST	– Diagnostyka Sieci Trakcyjnej – system pomiarowo diagnostyczny stosowany na PKP
EV	– bezwymiarowa jednostka ekspozycji fotograficznej (ang. <i>exposure value</i>)
FDMA	– system do pomiaru położenia przewodu jezdny (niem. <i>Fahrdrabtmessanlage</i>)
FS	– Włoskie Koleje Państwowe (wł. Ferrovie dello Stato S.p.A.)
FWP	– Fabryka Wrobów Precyzyjnych
GUS	– Główny Urząd Statystyczny

IFB	– Instytut Badawczy na Rzecz Techniki Kolejowej (niem. Institut für Bahntechnik GmbH)
JR	– Koleje Japońskie (ang. Japan Railways)
KIET	– Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu
LabVIEW	– graficzny język programowania opracowany przez firmę National Instruments (ang. <i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>)
MÁV	– Koleje Węgierskie (węg. Magyar Államvasutak)
MOP	– Monitoring Odbieraków Prądu – system pomiarowy stosowany na PKP
NS	– Koleje Holenderskie (hol. Nederlandse Spoorwegen)
OCS	– japoński system diagnostyki górnej sieci trakcyjnej (ang. <i>Overhead Catenary System</i>)
ÖBB	– Austriackie Koleje Państwowe (niem. Österreichische Bundesbahnen)
PCI	– magistrała komunikacyjna stosowana w komputerach (ang. <i>peripheral component interconnect</i>)
PKP	– Polskie Koleje Państwowe
PLK	– Polskie Linie Kolejowe
PXI	– modułowa platforma budowy komputerów przemysłowych (ang. <i>PCI eXtensions for instrumentation</i>)
RFT	– niemiecka firma produkująca urządzenia i przyrządy elektroniczne (niem. Rundfunk- und Fernmelde-Technik)
RGB	– sposób kodowania barw w obrazie (ang. <i>red, green, blue</i>)
RTRI	– japoński Kolejowy Instytut Naukowo-Badawczy (ang. Railway Technical Research Institute)
RŽD (РЖД)	– Koleje Rosyjskie (ros. Российские Железные Дороги)
SNCF	– Narodowe Towarzystwo Kolei Francuskich (fr. Société Nationale des Chemins de Fer Français)
SSD	– komputerowe urządzenie pamięci masowej bez części ruchomych (ang. <i>solid-state drive</i>)
UIC	– Międzynarodowy Związek Kolei (fr. Union Internationale des Chemins de fer)
VARIS	– wizyjny system inspekcji infrastruktury kolejowej (ang. <i>Vision Analysis for Railway Inspection System</i>)
VGA	– standard jakościowy zapisu obrazu wideo (ang. <i>video graphics array</i>)
ŽSR	– Koleje Republiki Słowackiej (sł. Železnice Slovenskej Republiky)