

Metody pomiaru drgań górnej sieci jezdnej

Streszczenie. Opracowanie referencyjnego modelu sieci trakcyjnej wymaga określenia parametrów mechanicznych poszczególnych jej elementów. Parametry te wyznacza się poprzez wykonanie pomiarów przebiegów drgań wywołanych wymuszeniami zewnętrznymi. W artykule przedstawiono rozważania na temat możliwych do zastosowania metod pomiarowych. Omówiono wybrane metody pokazując ich zalety i wady oraz oceniając przydatność do realizacji pomiarów drgań sieci trakcyjnej w warunkach laboratoryjnych i terenowych.

Abstract. The development of reference model of contact line requires the determination of mechanical parameters of its individual components. These parameters are determined by measurements of vibration and oscillation caused by external force. The article presents a reflection on the possible application of measurement methods. Some selected methods are presented by showing their features and assessing their suitability for practical implementation in laboratory and field measurement stand. (**Measurement methods of the overhead traction contact line vibrations**).

Słowa kluczowe: trakcja elektryczna, sieć trakcyjna, pomiary drgań, badania laboratoryjne.

Keywords: electric traction, contact line, measurement of vibration, laboratory research.

Wstęp

Wzrost prędkości jazdy pociągów, a także zwiększanie mocy przez nie pobieranej wymaga opracowania nowych typów sieci trakcyjnych zapewniających poprawną współpracę odbieraka prądu z siecią w zmienionych, w porównaniu z dotychczasowymi, warunkach pracy. Prawdłowa współpraca elementów odpowiedzialnych za przesył energii do pojazdu zapewnia uzyskanie wysokiego poziomu niezawodności funkcjonowania zelektryfikowanego transportu szynowego. Pomocnym narzędziem w projektowaniu sieci trakcyjnej jest możliwość uprzedniego sprawdzenia jej przyszłych właściwości na drodze symulacji teoretycznych. W tym celu na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej trwają obecnie prace nad tzw. modelem referencyjnym sieci trakcyjnej [3, 6]. Opracowanie takiego modelu wymaga określenia na drodze eksperymentu parametrów mechanicznych tj. sprężystości i współczynnika tłumienia drgań poszczególnych elementów sieci (przewodów jezdnych, lin nośnych oraz wieszaków). Ponadto konieczna jest również weryfikacja pomiarowa opracowanego modelu przez porównanie wyników uzyskiwanych za jego pomocą z tymi, które pochodzą z badań rzeczywistej sieci trakcyjnej. Aby tego dokonać niezbędne jest wykonywanie pomiarów reakcji sieci trakcyjnej oraz jej elementów na wymuszenia zewnętrzne. W artykule przedstawiono różne możliwe metody wykonywania takich pomiarów. Omówiono ich cechy i obszar zastosowania oraz zaprezentowano przykładowe wyniki pomiarów laboratoryjnych wykonane przy wykorzystaniu jednej z omówionych metod.

Przedmiot pomiaru i warunki jego wykonywania

Przedmiotem pomiaru jest zbadanie przebiegów drgań gasnących o charakterze oscylacyjnym sieci trakcyjnej, poszczególnych jej elementów lub ich fragmentów (np. odcinka przewodu jezdnego lub liny nośnej). Analizowane drgania wywołane są wymuszeniem zewnętrznym. W warunkach laboratoryjnych będzie to przyłożona siła, która w rezultacie wywoła wstępne odchylenie badanego elementu od stanu równowagi początkowej. W warunkach terenowych odchylenie to będzie rezultatem dynamicznego oddziaływania odbieraka prądu przemieszczającego się pojazdu trakcyjnego. Częstotliwość mierzonych oscylacji wynosi od kilku do około 20 Hz a amplituda początkowa drgań z reguły nie przekracza 10 cm. Konkretnie parametry jakie wystąpią zależą od przedmiotu badań i jego cech mechanicznych (wymiarów zewnętrznych, masy itp.), a także wartości siły wymuszającej. Częstotliwość próbkowania, z jaką realizowane będą pomiary powinna

wynosić zatem nie mniej niż 200 Hz. Liczba 10 próbek na okres drgań pozwala bowiem na prawidłowe odwzorowanie ich kształtu.

Pomimo tego, że w warunkach eksploatacji, pominąwszy oddziaływanie wiatru, sieć trakcyjna pobudzana jest w osi pionowej przez odbierak prądu pojazdu trakcyjnego, to nieregularny kształt przewodu jezdnego (obecność wycięcia pod uchwyt wieszaka), a także budowa samego ślizgacza wywołują zarówno drgania w osi pionowej jak i poziomej. Urządzenie pomiarowe musi więc mieć możliwość pomiarów przemieszczeń w przestrzeni dwuwymiarowej. Ponadto urządzenie to nie powinno zmieniać, w sposób znaczący, parametrów mechanicznych badanego elementu czyli samej sieci. Niewskazane jest więc mocowanie do przewodów jezdnych czy lin nośnych elementów dodatkowych, które w znaczący sposób zmieniają ich masę. Oprócz tego należy pamiętać, że w przypadku badań obiektu rzeczywistego w warunkach normalnej eksploatacji, elementy sieci trakcyjnej są pod napięciem, a więc system pomiarowy musi umożliwiać wykonywanie badań również w takich warunkach.

Metody pomiarowe

Realizacja pomiarów w warunkach przedstawionych w rozdziale pierwszym jest możliwa przy wykorzystaniu następujących metod pomiarowych:

- metody wykorzystującej dalmierze laserowe krótkiego zasięgu,
- metody wykorzystującej akcelerometrię,
- metody optycznej.

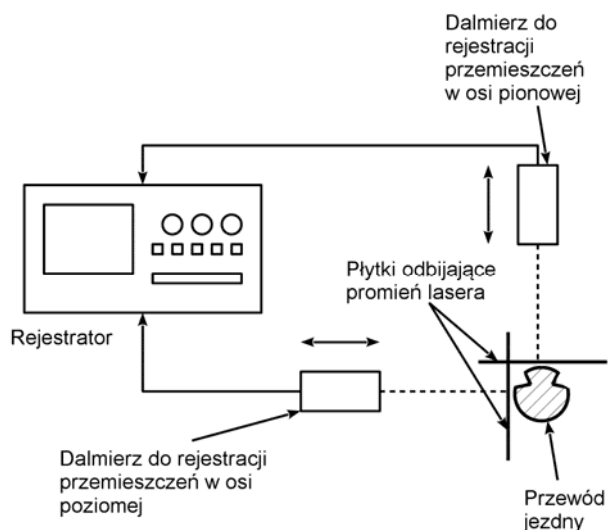
Poniżej omówiono te metody poddając analizie wymagania sprzętowe i oceniając ich przydatność do realizacji pomiarów wykonywanych w warunkach laboratoryjnych oraz terenowych.

Metoda wykorzystująca dalmierze laserowe krótkiego zasięgu

Metoda wykorzystuje do pomiaru dalmierze laserowe krótkiego zasięgu połączone z układem, który rejestruje generowany przez nie sygnał napięciowy lub prądowy. Uzyskanie pełnego obrazu drgań w osi poziomej i pionowej wymaga zastosowania dwóch dalmierzy mierzących przemieszczenia w tych osiach. Dalmierze krótkiego zasięgu mają zakres pomiarowy wynoszący od kilkunastu do kilkudziesięciu centymetrów, przy punkcie środkowym zakresu odległym od około dwudziestu centymetrów nawet do jednego metra od powierzchni czujnika. W wykonaniach przemysłowych umożliwiają uzyskanie częstotliwości pomiaru rzędu 1 kHz, przy rozdzielczości na poziomie

0,2 mm i niepewności względnej równej 2%. Ich parametry pozwalają więc na spełnienie wymagań stawianych metodzie pomiarowej.

Ze względu na niewielkie wymiary elementów sieci, konieczne jest umocowanie płytek refleksyjnych odbijających promienie laserowe emitowane przez dalmierze. Wymiary tych płytek muszą być nie mniejsze niż podwójna amplituda drgań maksymalnych, jaka występuje w drugiej osi drgań. Uproszczony schemat układu pomiarowego pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat układu pomiaru drgań elementu sieci trakcyjnej przy wykorzystaniu dalmierzy

Warunkiem uzyskania poprawnych wyników pomiarowych jest zachowanie kąta prostego pomiędzy promieniami laserów a płytkami odbijającymi oraz konieczność takiego ich zamocowania, aby płytki odbijające promień dalmierza rejestrującego przemieszczenia w osi pionowej/poziomej były zamocowane odpowiednio poziomo i pionowo. Niedokładne wypoziomowanie płytek odbijających sprawi, że uzyskane wyniki pomiarowe będą obarczone znaczną niepewnością pomiarową. Przykładowo, przy założeniu, że niepewność pochodząca od niedokładnego wypoziomowania płytek refleksyjnych powinna, dla wychylenia maksymalnego (10 cm), mieścić się w granicach rozdzielczości dalmierza (0,2 mm), dopuszczalna odchyłka od położenia poziomego (lub pionowego) wynosi zaledwie $0,1^\circ$.

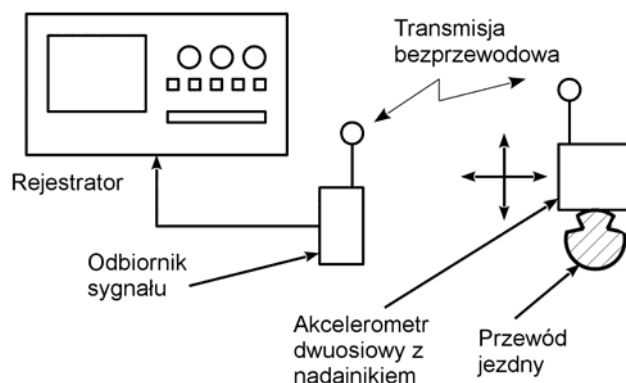
Budowa i wymagania stawiane przed układem dalmierzowym predestynują go do realizacji pomiarów w warunkach laboratoryjnych. Przy pomiarach wykonywanych w warunkach terenowych (na czynnej linii kolejowej przy jeżdżącym taborze trakcyjnym) problematyczna jest realizacja pomiarów przemieszczeń w osi poziomej dla przewodu jezdny. Ponadto mocowanie płytek refleksyjnych należy rozwiązać w taki sposób, aby nie było możliwości zahaczenia ich przez ślizgacz odbieraka prądu. Poza tym, dalmierz laserowy musi być umieszczony pomiędzy linią nośną a przewodem jezdny, czyli w obszarze wysokiego napięcia. Wywołuje to problemy z doprowadzeniem zasilania do czujnika oraz odebraniem sygnału pomiarowego. Przy pomiarach drgań linii nośnej pomiar przemieszczeń poziomych jest możliwy, pozostaje jednak kwestia konieczności umieszczenia czujników w obszarze wysokiego napięcia i trudności z tym związane.

Zaletą metody pomiarowej jest z pewnością prostota implementacji, duża dokładność uzyskiwanych wyników i

niski koszt zakupu podzespołów. Do wad należy zaliczyć wymóg bardzo precyzyjnego montażu poszczególnych elementów, trudności występujące podczas realizacji pomiarów terenowych oraz fakt, że konieczność montażu płytek refleksyjnych zmienia parametry mechaniczne badanego elementu.

Metoda wykorzystująca akcelerometrię

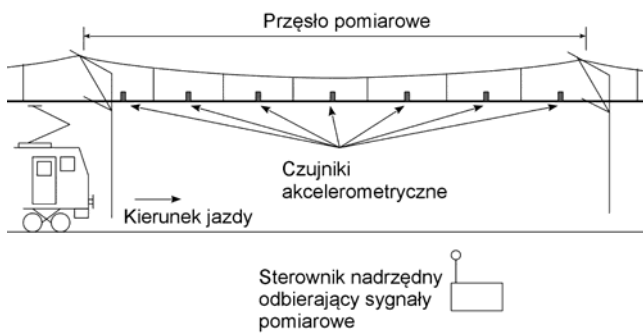
W przypadku tej metody, źródłem sygnału pomiarowego jest akcelerometr dwuosiowy przymocowany do badanego elementu sieci trakcyjnej. Sygnały wyjściowe z akcelerometru (przyspieszenie) są rejestrowane, a następnie, po obróbce polegającej na usunięciu z sygnału wartości stałej czyli tzw. „offsetu”, poddawane dwukrotnemu procesowi całkowania, co pozwala na uzyskanie żądanych przebiegów pomiarowych, czyli przemieszczenia w obu osiach. Uproszczony schemat układu pomiarowego pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat układu pomiaru drgań elementu sieci trakcyjnej przy wykorzystaniu akcelerometru

Ze względu na zbyt dużą zmianę własności mechanicznych badanego elementu sieci trakcyjnej wykluczone jest zastosowanie akcelerometrów ze złączem przewodowym. Wymaga to z kolei użycia czujnika zablokowanego z nadajnikiem sygnału i posiadającego własne źródło zasilania. Zwiększa to niestety jego masę, a także komplikuje użytkowanie przez konieczność okresowej wymiany ogniw zasilających. Dodatkowo, jednostronne mocowanie czujnika (tak jak pokazano na rysunku) zmienia moment bezwładności układu, w szczególności przy rejestracji drgań w osi poziomej. Niemniej jednak, zaletą tego rozwiązania jest możliwość wykonywania pomiarów zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i terenowych, gdy elementy sieci trakcyjnej są pod napięciem. Należy jedynie dążyć do tego, aby masa czujnika była jak najmniejsza, a tym samym by jego obecność miała pomijalnie mały wpływ na własności mechaniczne badanego układu. Obecnie dostępne akcelerometry umożliwiają pomiary przy częstotliwości próbkowania zbliżonej do pomiarów dalmierzowych.

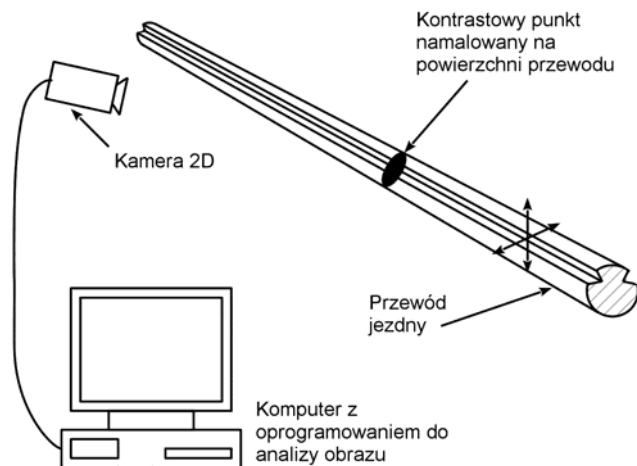
Wariantem metody pomiarowej wykorzystującej akcelerometrię jest zastosowanie układu sieci czujników bezprzewodowych [1, 2, 7, 8]. W tym przypadku do badanego elementu sieci trakcyjnej mocuje się nie jeden, ale kilka lub kilkanaście czujników, które komunikują się między sobą oraz przesyłają dane do sterownika nadrzędnego znajdującego się w pobliżu. Jeżeli w taki sposób zostanie opomiarowane całe przedsięwzięcie sieci trakcyjnej, wówczas można uzyskać kompleksowy obraz drgań sieci wywołanych przejazdem pojazdu trakcyjnego. Uproszczony schemat takiego układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat układu pomiaru drgań sieci trakcyjnej przy wykorzystaniu sieci czujników akcelerometrycznych

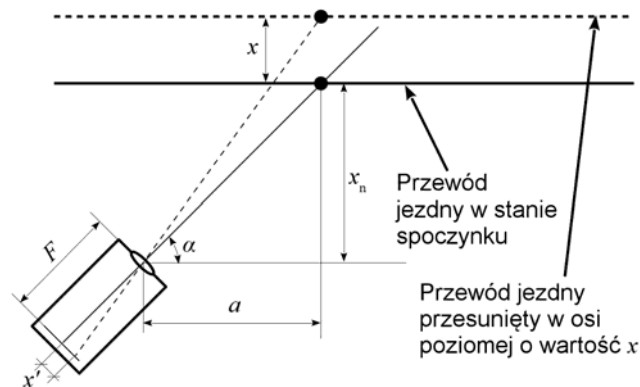
Metoda optyczna

Kolejną opcją układu pomiarowego do analizy drgań elementów sieci trakcyjnej jezdnej jest zastosowanie zmodyfikowanej metody optycznej, opracowanej pierwotnie na potrzeby diagnostyki sieci trakcyjnej [4, 5]. Metoda ta opiera się na wykorzystaniu szybkiej kamery 2D o dużej rozdzielczości oraz zaawansowanej analizie zarejestrowanego obrazu. Uproszczony schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Uproszczony schemat układu pomiaru drgań elementu sieci trakcyjnej metodą optyczną

Kamerę wizyjną należy umieścić z boku badanego elementu sieci trakcyjnej na takiej wysokości, aby w stanie spoczynku odwzorowanie kontrastowego punktu namalowanego na powierzchni przewodu znajdowało się na środku rejestrowanego obrazu. W takiej sytuacji dla przemieszczeń w osi poziomej (x) uzyska się zależności geometryczne pokazane na rysunku 5.



Rys. 5. Geometria układu optycznego do pomiaru drgań elementu sieci trakcyjnej (opis w tekście)

Kamera zamocowana jest względem przewodu jezdnej pod kątem α w taki sposób, że kontrastowy punkt namalowany na powierzchni przewodu w spoczynkowym stanie położenia leży w osi optycznej obiektywu. Przemieszczenie przewodu w osi poziomej o wartość x względem położenia początkowego x_n sprawia, że odwzorowanie obserwowanego punktu przyjmie na matrycy położenie oddalone od jej środka o odległość x' . O wielkości odwzorowania decydują ogniskowa obiektywu F oraz odległość zamocowania kamery od przewodu jezdnej. Przemieszczenie przewodu w osi poziomej dane jest w takiej sytuacji zależnością:

$$(1) \quad x = \frac{x' \cdot x_n}{\sin \alpha \cdot (F \cdot \sin(90 - \alpha) - x' \cdot \cos(90 - \alpha))}$$

gdzie: x' – przemieszczenie odwzorowania punktu na matrycy kamery w osi poziomej; x_n – odległość pomiędzy prostą przechodzącą przez ognisko obiektywu, równoległą do przewodu jezdnej, a przewodem jezdnym w stanie spoczynkowym; α – kąt pomiędzy osią optyczną obiektywu a przewodem jezdnym.

W analogiczny sposób uzyskuje się zależność na przemieszczenie przewodu w osi pionowej, która jest dana wzorem:

$$(2) \quad y = \frac{y'}{F} \left(\frac{x_n}{\sin \alpha} + \frac{x' \cdot x_n}{\sin \alpha \cdot F \cdot \tan(90 - \alpha) - x'} \right)$$

gdzie: y' – przemieszczenie odwzorowania punktu na matrycy kamery w osi pionowej.

Jak można zauważyć wyniki pomiarów przemieszczeń w osi poziomej są zależne wyłącznie od zmiennej x' , a w osi pionowej od obu zmiennych. Wynika to ze zniekształceń geometrycznych obrazu wywołanych obserwacją punktu kontrolnego pod kątem α .

Główną zaletą optycznej metody pomiaru jest brak ingerencji w parametry mechaniczne badanego układu, co jest nieosiągalne przy wykorzystywaniu metod wykorzystujących dalmierze laserowe i akcelerometry (jedyną ingerencją jest namalowanie kontrastowego punktu na powierzchni badanego elementu sieci trakcyjnej). Cena również jest możliwie niekłopotliwego wykonywania badań w warunkach terenowych na czynnej linii kolejowej, gdyż, po dobraniu odpowiedniej ogniskowej obiektywu, kamera może być umieszczona poza zastrzeżonym obszarem związanym ze skrajnią taboru i skrajnią budowli. Dodatkowo istnieje możliwość jednoczesnego pomiaru drgań przewodu jezdnej i liny nośnej bez dodatkowego wyposażenia, co w poprzednich metodach wymagało zdublowania czujników pomiarowych. Do wad należy zaliczyć wysoki koszt aparatury pomiarowej (w porównaniu z poprzednio omówionymi metodami), potrzebę precyzyjnego spozycjonowania urządzeń, a także konieczność zarejestrowania i późniejszej obróbki dużej ilości danych przy pomocy specjalistycznego oprogramowania (strumień danych, jakie trzeba zarejestrować, a później poddać obróbce sięga nawet 600 MB/s).

Przy obecnie produkowanych kamerach, które przy ciągłej rejestracji umożliwiają obserwację z szybkością ok. 300 kl/s, uzyskuje się częstotliwość próbkowania wystarczającą dla potrzeb rozpatrywanego zagadnienia pomiarowego, aczkolwiek jest ona nieco mniejsza niż w poprzednich metodach. Rozdzielczość pomiaru przy odpowiednim dobraniu ogniskowej obiektywu teoretycznie może sięgać około 0,05 mm. Należy pamiętać, że stosowany obiektyw musi charakteryzować się brakiem zniekształceń geometrycznych i dystorsji obrazu.

Porównanie cech poszczególnych metod pomiarowych

Poniżej w tabeli 1 zestawiono najważniejsze, z punktu widzenia użyteczności metrologicznej, cechy poszczególnych metod pomiarowych.

Tabela 1. Zestawienie podstawowych cech poszczególnych metod pomiarowych

Metoda pomiarowa	Z dalmierzami laserowymi	Z akcelerometrami	Optyczna
Częstotliwość próbkowania	do 1 kHz	do 1 kHz	do 350 Hz
Rozdzielczość pomiaru	0,2 mm	?*	0,05 mm*
Trudność implementacji	mała	mała	duża
Koszt względny	średni	średni	wysoki
Przydatność do badań laboratoryjnych	pełna	pełna	pełna
Przydatność do badań terenowych	ograniczona	pełna	pełna

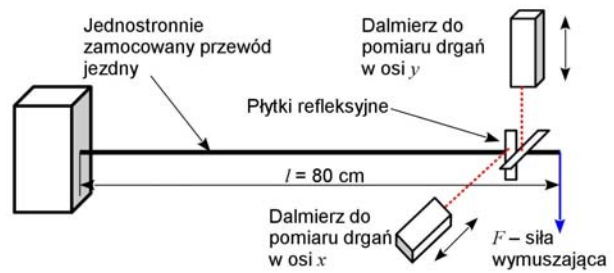
*Wymaga weryfikacji w trakcie badań

Jak można zauważyć, wszystkie metody nadają się do wykonywania pomiarów laboratoryjnych. Ze względu na niewielką trudność implementacji i niższy koszt aparatury wydaje się, że metody oparte na dalmierzach i akcelerometrach będą bardziej praktyczne w tych zastosowaniach. Sytuacja zmienia się w przypadku badań terenowych, szczególnie przeprowadzanych na czynnej linii kolejowej przy jeżdżącym taborze. W tych warunkach korzystniejsza w użyciu może być metoda optyczna, głównie ze względu na możliwość wykonywania pomiarów przy aparaturze zamocowanej poza skrajnią taboru i brak ingerencji mechanicznej w konstrukcję sieci trakcyjnej. Jedynie w sytuacji, gdy pożądane jest uzyskanie kompleksowego obrazu drgań całego przęsła sieci trakcyjnej, koniecznym rozwiązaniem jest użycie sieci bezprzewodowych czujników akcelerometrycznych.

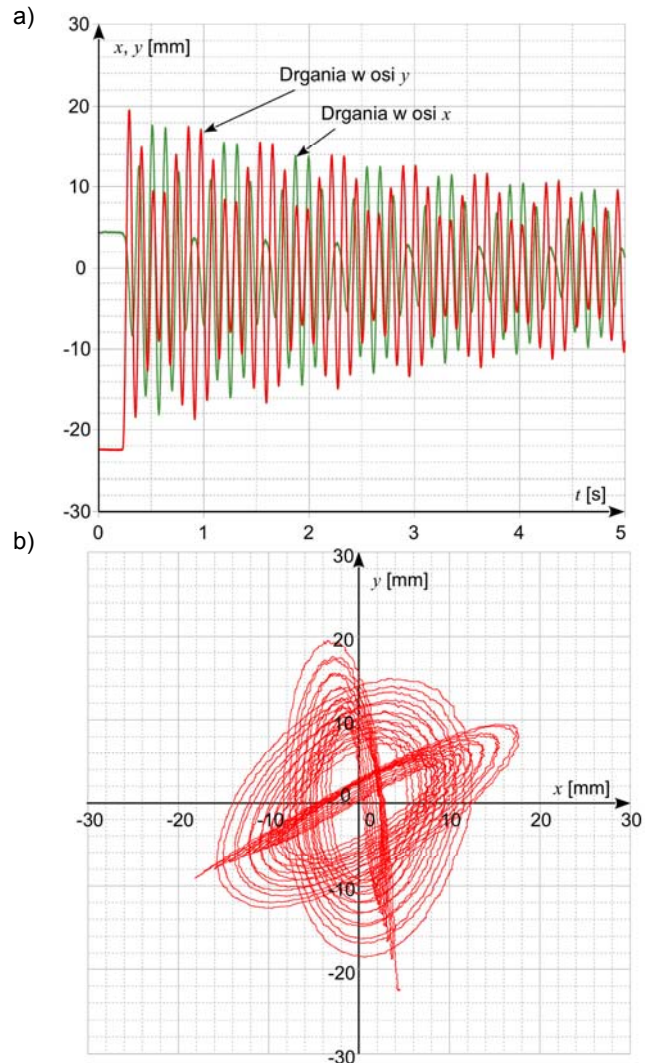
Wyniki pomiarów

W celu zobrazowania rozważanego problemu metrologicznego, na rysunkach 7 i 9 pokazano przykładowe wyniki pomiarów drgań przewodu jezdnego uzyskane w warunkach laboratoryjnych przy wykorzystaniu dalmierzy laserowych. Wyniki pomiarów przedstawione na rysunku 7 wykonano na stanowisku, którego uproszczony schemat zaprezentowano na rysunku 6. Odcinek przewodu jezdnego o długości $l = 80$ cm zamocowano jednostronnie i odchyłono od położenia spoczynkowego siłą wymuszającą F działającą w osi pionowej, przyłożoną do końca odcinka. Następnie siłę tę zdjęto skokowo, wywołując tym samym drgania swobodne o charakterze tłumionym.

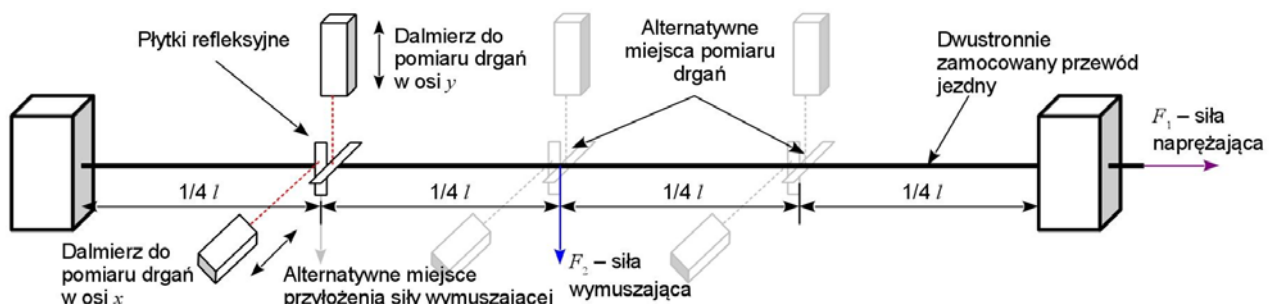
Wyniki pomiarów zaprezentowane na rysunku 9 wykonano dla bardziej rozbudowanego stanowiska, którego schemat pokazano na rysunku 8.



Rys. 6. Schemat stanowiska laboratoryjnego do pomiaru drgań odcinka przewodu jezdnego zamocowanego jednostronnie

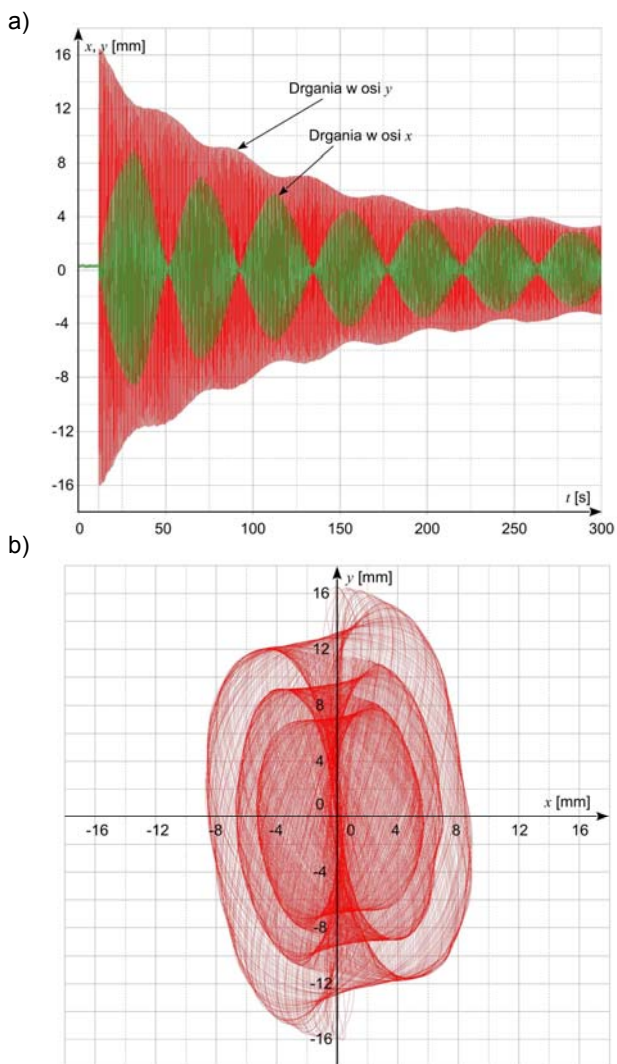


Rys. 7. Przykładowe wyniki pomiarów dla odcinka przewodu jezdnego zamocowanego jednostronnie przy wymuszeniu skokowym, gdzie: a) przebieg drgań w osi pionowej i poziomej; b) trajektoria drgań swobodnej końcówki przewodu



Rys. 8. Schemat stanowiska laboratoryjnego do pomiaru drgań odcinka przewodu jezdnego zamocowanego dwustronnie i naprężonego

Odcinek przewodu jezdnego o długości $l = 12$ m zamocowano dwustronnie i naprężono siłą F_1 . Następnie odchyłono przewód od położenia spoczynkowego siłą F_2 działającą w osi pionowej, przyłożoną w $1/4$ lub połowie długości przewodu. Po skokowym odjęciu tej siły przewód zaczyna drgać swobodnie. Pomiary drgań wykonywano w $1/4$, połowie i $3/4$ długości przewodu.



Rys. 9. Przykładowe wyniki pomiarów dla dwustronnie zamocowanego, naprężonego odcinka przewodu jezdnego przy wymuszeniu skokowym, gdzie: a) przebieg drgań w osi pionowej i poziomej; b) trajektoria drgań przewodu w miejscu pomiaru

Pokazane na rysunkach 7 i 9 przykładowe wyniki pomiarów ukazują złożoność problemu metrologicznego. W obu przypadkach, mimo siły wymuszającej przyłożonej w jednej osi, występują drgania pionowe oraz poziome o charakterze tłumionym i skomplikowanych trajektoriach ruchu obserwowanych w miejscach pomiaru drgań. Wyraźnie widoczne jest prawie całkowite (rysunek 7a) lub częściowe (rysunek 9a) naprzemienne przekazywanie energii ruchu drgającego pomiędzy pionowym i poziomym kierunkiem oscylacji.

Ze złożonością wyników, uzyskiwanych tylko dla pojedynczego przewodu jezdnego, można wnioskować, jak rozbudowany charakter drgań będzie obserwowany przy pomiarach kompletnej sieci trakcyjnej składającej się z dwóch przewodów jezdnych, jednej lub dwóch lin nośnych oraz łączących je wieszaków. Pokazuje to wyraźnie, jak ważny jest poprawny i przemyślany wybór metody

pomiarowej tak, by uzyskane wyniki były prawidłowe, z niepewnością na poziomie akceptowanym dla potrzeb badawczych.

Wnioski

Szczegółowe pomiary własności mechanicznych sieci trakcyjnej oraz jej zachowania przy różnych typach wymuszeń wymagają rozważnego wyboru metody pomiarowej, tak by uzyskane wyniki były poprawne i mogły zostać użyte do dalszych prac. Szczególnie wysokie wymagania odnośnie wiarygodności pomiarów stawia problematyka opracowania modelu referencyjnego sieci trakcyjnej, na potrzeby którego to modelu należy określić wartości współczynników sprężystości i tłumienia poszczególnych składników tej sieci. Aby tego dokonać, konieczne jest przeprowadzenie pomiarów, by zbadać jak zachowują się elementy sieci poddane wymuszeniom zewnętrznym, często w warunkach odmiennych od rzeczywistych. Jako przykład takich warunków można podać badanie drgań przewodu jezdnego zamocowanego pod kątem 90° . Na podstawie analizy uzyskiwanych przebiegów można wyznaczyć żądane parametry mechaniczne. Zaprezentowane w artykule rozważania pokazują możliwości realizacji takich pomiarów. Wybór konkretnej metody zależy głównie od warunków przeprowadzania pomiarów. Podczas dotychczas prowadzonych prac, realizowanych w warunkach laboratoryjnych, wykorzystywano dalmierze laserowe. Jednak konieczność potwierdzenia uzyskanych wyników, jak również zbadania zachowania się sieci trakcyjnej w warunkach rzeczywistej eksploatacji, co będzie niezbędne do weryfikacji opracowanego modelu referencyjnego, wymusza poszukiwanie alternatywnych metod pomiarowych. Z omówionych rozwiązań obiecujące jest wykorzystanie metody optycznej, a w przypadku pomiarów zachowania całego przęsła podwieszenia, akcelerometrów skonfigurowanych w sieć, które to metody planowane są do użycia na dalszym etapie prac badawczych.

Autor: dr inż. Jacek Skibicki, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233, Gdańsk, E-mail: jacek.skibicki@pg.gda.pg

LITERATURA

- [1] Aboelela E., Edberg W., Papakonstantinou C., Vokkarane V., Wireless sensor network based model for secure railway operation, *25th IEEE International Performance, Computing and Communications Conference, 2006 Phoenix*, 623-628
- [2] Hodge V.J., O'Keefe S., Weeks M., Moulds A., Wireless sensors networks for condition monitoring in the railway industry: A Survey, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16 (2015), No. 3, 1088-1106
- [3] Karwowski K., Michna M., Mizan M., Wilk A., Analiza drgań przewodu jezdnego sieci trakcyjnej w aspekcie oceny jej stanu technicznego, *Logistyka*, nr 4 (2015), 3941-3949
- [4] Skibicki J., The new version of contact-less method for localisation of catenary contact wire – theoretical assumption, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 7 (2013), 100-104
- [5] Skibicki J., Analiza wymagań sprzętowych dla bezkontaktowego system pomiaru położenia przewodu jezdnego sieci trakcyjnej do celów diagnostycznych, *Logistyka*, nr 6 (2014), 9599-9606
- [6] Wilk A., Karwowski K., Michna M., Mizan M., Skibicki J., Kaczmarek P., Modelowanie matematyczne górnej sieci trakcyjnej dla potrzeb diagnostyki odbieraków prądu, *Konferencja SEMTRAK 2014, Kraków*, 249-258
- [7] Usuda T., Ikeda M., Koyama T., Detecting method of pantograph failure by measuring catenary vibration, *World Congress on Railway Research, Sydney*, 2013
- [8] Usuda T., Ikeda M., Yamashita Y., Method for detection step-shaped wear of contact strip by measuring catenary vibration, *QR of RTRI*, 52 (2011), No 4, 237-243