

## ANALIZA DRGAŃ PRZEWODÓW JEZDNYCH SIECI TRAKCYJNEJ W ASPEKTCIE OCENY JEJ STANU TECHNICZNEGO

Andrzej WILK<sup>1</sup>, Mirosław MIZAN<sup>2</sup>, Krzysztof KARWOWSKI<sup>3</sup>, Paweł KACZMAREK<sup>4</sup>

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

1. tel.: 58 3471087, e-mail: andrzej.wilk@pg.gda.pl
2. tel.: 58 3471502, e-mail: miroslaw.mizan@pg.gda.pl
3. tel.: 58 3471158, e-mail: krzysztof.karwowski@pg.gda.pl
4. tel.: 58 3472534, e-mail: pawel.kaczmarek@pkpenergetyka.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono możliwości wykorzystania analizy drgań przewodów jezdnych sieci trakcyjnej do oceny jej stanu technicznego. Zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych, w których rejestrowano drgania odcinka przewodu jezdnego o zróżnicowanym stopniu zużycia i przy różnych warunkach jego zawieszenia. Na bazie przeprowadzonych analiz w dziedzinie czasu i częstotliwości, wskazano zależności między stanem sieci a wybranymi parametrami rejestrowanych drgań. Wyniki badań wykorzystano do doboru wybranych parametrów modelu matematycznego odcinka przewodu jezdnego sieci, opartego na metodzie energetycznej Lagrange'a. Model jest dedykowany do badań certyfikacyjnych dla nowych i modernizowanych odcinków sieci, a także do wspierania procesów oceny stanu technicznego sieci i pantografów w systemach monitoringu infrastruktury kolejowej.

**Słowa kluczowe:** sieć trakcyjna, analiza harmoniczna drgań, modelowanie matematyczne, diagnostyka i monitoring.

### 1. WSTĘP

Istotny wpływ na niezawodność i efektywność zelektryfikowanego transportu kolejowego ma prawidłowe działanie systemu odbioru prądu z sieci trakcyjnej przez poruszające się pojazdy. Ponieważ sieć trakcyjna nie ma rezerwy, formułowane są dla niej wysokie wymagania jakościowe i niezawodnościowe. Muszą one być brane pod uwagę zarówno w fazie projektowania i budowy nowej sieci, jak też w czasie normalnej eksploatacji. W odniesieniu do procesu wdrażania nowych lub modernizowanych odcinków sieci rozwijane są stale komputerowe programy symulacyjne, zwłaszcza ukierunkowane na analizę interakcji sieci jezdnej i odbieraków prądu [1, 3, 4]. Wykonanie badań symulacyjnych współpracy tych dwóch elementów systemu zasilania pojazdów jest obecnie wymagane zarówno przez przepisy krajowe, jak również międzynarodowe [5]. Ze względu na: złożoność tematyki, różnice w konstrukcjach sieci stosowanych w poszczególnych krajach, a także różnicowane wymagania stawiane narzędziom symulacyjnym, nie istnieją w zasadzie uniwersalne, powszechnie stosowane programy do modelowania dynamiki sieci trakcyjnych. Jednym z celów prezentowanych tu prac badawczych było opracowanie wstępnej wersji zaawansowanego modelu sieci, który w przyszłości mógłby być wykorzystywany m.in. do badań certyfikacyjnych wymaganych według norm.

Dla utrzymania sieci we właściwym stanie technicznym w okresie jej eksploatacji, rozwijane są systemy diagnostyki i monitoringu. Zły stan techniczny sieci jezdnej może powodować m.in.: wzrost oscylacji przewodu, miejscowe zwiększenie zużycia przewodu jezdnego, a w skrajnych przypadkach – uszkodzenie współpracującego z nią odbieraka prądu w pojeździe. Zadaniem systemów diagnostycznych jest wykrycie degradacji stanu technicznego sieci w początkowym stadium tego procesu, aby zapobiec uszkodzeniom. W celu wdrożenia systemu diagnostycznego należy opracować metody wykrywania nieprawidłowych stanów sieci. Metody te winny opierać się na analizie parametrów stosunkowo łatwo mierzalnych; jednym z nich może być przebieg drgań przewodów jezdnych sieci. Wykonanie badań eksperymentalnych w celu określenia wpływu poszczególnych nieprawidłowości stanu sieci na cechy rejestrowanych drgań, zaproponowanie metod analizy wyników i sformułowanie wstępnych wniosków, zmierzających do opracowania kryteriów oceny wybranych parametrów sieci, było istotnym celem prowadzonych prac.

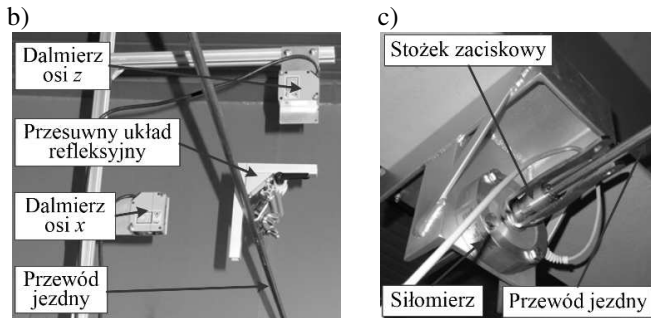
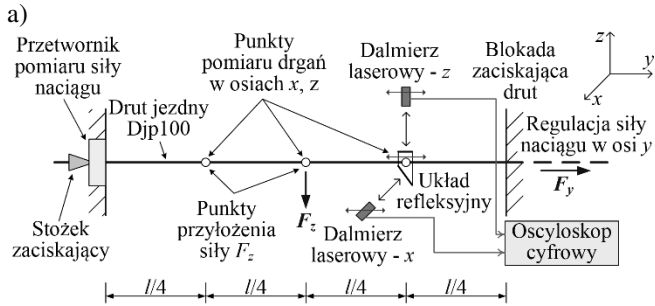
### 2. BADANIA LABORATORYJNE DRGAŃ PRZEWODU JEZDNEGO

#### 2.1. Stanowisko pomiarowe

Dla rejestracji przebiegów drgań przewodu jezdnego przygotowano stanowisko laboratoryjne; szkic jego struktury i widok wybranych elementów konstrukcyjnych przedstawiono na rysunku 1.

Pomiędzy dwoma podporami odległymi o  $l = 12$  m naprężono drut jezdny typu Djp100. Naciąg przewodu mierzono za pomocą siłomierza tensometrycznego. W wybranych punktach, odległych wzajemnie o  $1/4$  długości odcinka naprężenia, dokonywano skokowego odciążania drutu jezdnego z zawieszzonego uprzednio ciężaru, a następnie rejestrowano drgania drutu w dwóch osiach – pionowej  $x$  i poprzecznej  $z$ . Do pomiaru przemieszczeń używano laserowych dalmierzy zbliżeniowych o dokładności ok. 0,1 mm z wbudowanym filtrem dolnoprzepustowym, którego częstotliwość graniczną nastawiono na 100 Hz, oraz specjalnego lekkiego wyrównowanego zespołu płytek refleksyjnych, mocowanego sztywno do drutu w miejscu pomiaru. Struktura stanowiska umożliwia zmiany siły naciągu drutu

$F_y$ , a także dowolne niezależne od siebie usytuowanie miejsca pomiaru i punktu przyłożenia siły  $F_z$ .

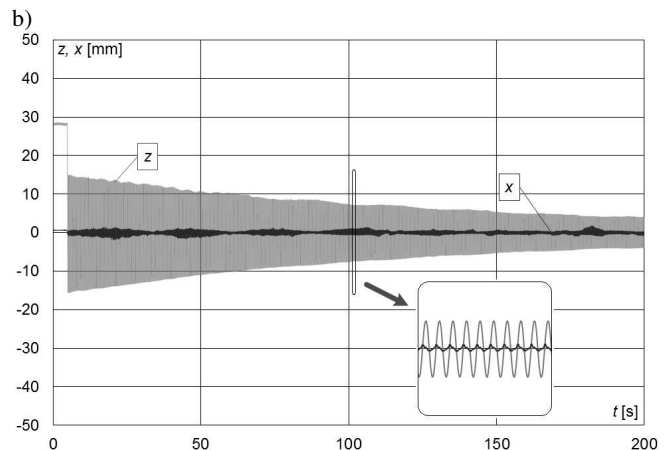
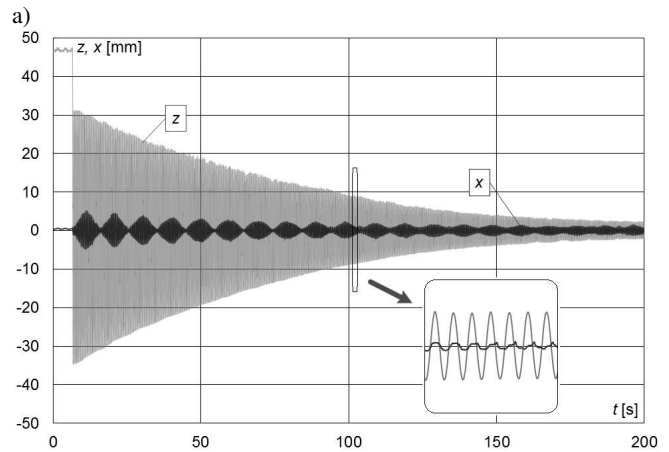


Rys. 1. Laboracyjne stanowisko pomiarowe: a) szkic struktury; b) zespół dalmierzy laserowych i płytek refleksyjnych na przewodzie; c) przetwornik do pomiaru siły naciągu przewodu

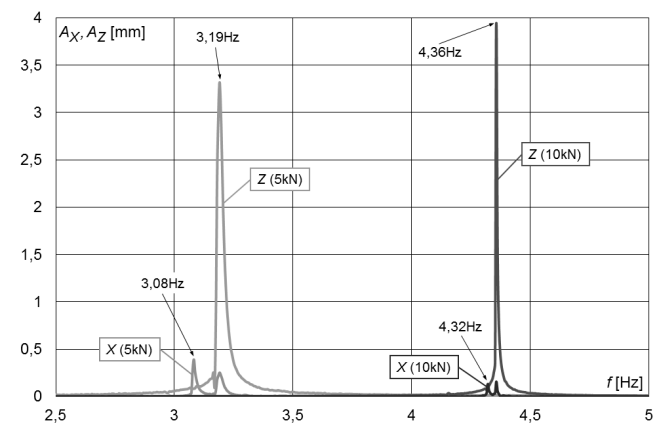
## 2.2. Wyniki pomiarów i ich analiza

Dla określenia wpływu stanu przewodu jezdnego na charakterystyczne cechy obserwowanych drgań, wykonano szereg pomiarów przy zmianach takich jego parametrów, jak: siła naciągu, kąt zawieszenia (obrotu) względem osi symetrii, stopień zużycia tj. powierzchnia przekroju poprzecznego. Ponadto badania wykonywano przy różnym usytuowaniu miejsca pobudzenia drgań – odcięcia drutu od wstępnej siły  $F_z$ , oraz dla różnych lokalizacji punktu pomiaru przemieszczeń; zmieniano także wartość siły  $F_z$ . Miało to na celu określenie najlepszej struktury stanowiska pomiarowego dla ewentualnej przyszłej jego realizacji w warunkach terenowych, która prowadziłaby do możliwie jednoznacznych kryteriów oceny.

Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi drgań rejestrowane w połowie napiętego odcinka przewodu jezdnego, po jego odcięciu skokową siłą o wartości 100 N, przy dwóch różnych wartościach siły naciągu przewodu: 5 kN i 10 kN. Naciąg przewodu jest jednym z ważnych parametrów sieci – ma on wpływ na amplitudę drgań, ale amplituda zależy także od wartości siły wzbudzającej oscylacje. W warunkach eksploatacyjnych, gdy wzbudzenie drgań jest skutkiem zmiennej siły pochodzącej np. od odbieraka prądu, bardziej miarodajnym kryterium oceny regulacji siły naciągu może być analiza widmowa drgań. Charakterystyka ta winna być tworzona przy dużej rozdzielczości, aby możliwe było oddzielenie składowych widma wywołanych wpływem czynników niezależnych od siły naciągu przewodu, jak np. drgania własne struktury odbieraka prądu – z reguły o ok. 1,5÷3-krotnie wyższej częstotliwości w stosunku do drgań własnych drutu jezdnego. Wymaga to rejestracji przebiegów z dużą częstotliwością próbkowania – w prezentowanych badaniach było to 625 S/s. Na rysunku 3 przedstawiono istotny dla oceny siły naciągu przewodu fragment charakterystyki widmowej drgań z rys. 2, uzyskanej za pomocą dyskretnej transformaty Fouriera (DFT).



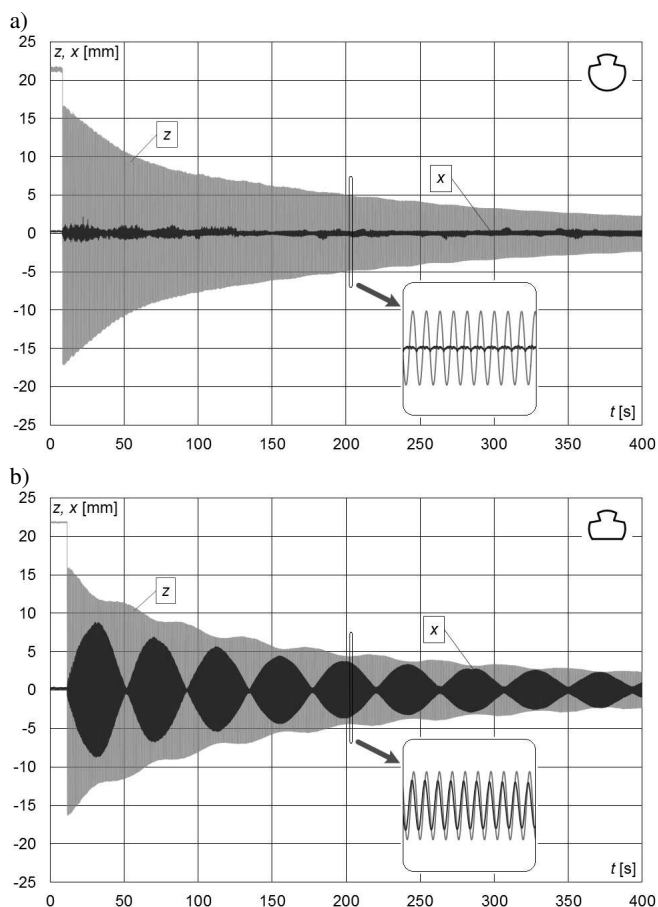
Rys. 2. Drgania przewodu jezdnego Djp 100 w osi z (pionowej) i w osi x (poziomej), po odcięciu skokową siłą pionową 100 N w 1/2 rozpiętości odcinka przewodu o długości 12 m, przy rejestracji drgań w 1/2 odcinka przy naciągu: a) 5 kN; b) 10 kN



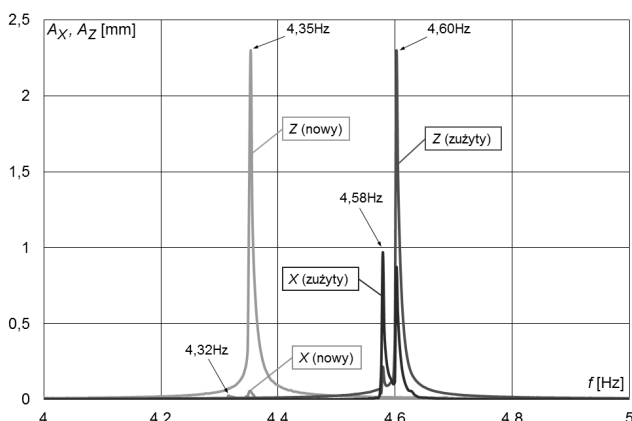
Rys. 3. Charakterystyka widmowa drgań przewodu Djp 100 dla warunków jak na rys. 2

W wyniku działania sił tarcia pomiędzy drutem jezdnym a nakładką stykową pantografów następuje stopniowe zmniejszanie się przekroju poprzecznego drutu. Zbyt silne zużycie przewodu obniża jego wytrzymałość mechaniczną i zwiększa rezystancję, co kwalifikuje przewód do wymiany. Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi drgań drutu fabrycznie nowego oraz drutu o ok. 15% (co do przekroju poprzecznego) równomiernym zużyciu przy identycznej sile naciągu, zaś na rysunku 5 fragment charakterystyk widmowych tych drgań w obszarze wokół składowej podstawowej. Cechą charakterystyczną jest tu wpływ stopnia zużycia na częstotliwość drgań przewodu. Na podstawie analizy przebiegów drgań, a zwłaszcza ich charakterystyk widmowych, można sformułować wniosek,

że silny stopień zużycia przewodu skutkuje znacznie zwiększoną amplitudą jego drgań w osi poprzecznej, która staje się porównywalna z amplitudą drgań pionowych. Takie zjawisko nie występowało dla przewodu o niskim stopniu zużycia. Ponadto na charakterystyce widmowej daje się zauważyć niewielką różnicę częstotliwości składowej podstawowej drgań w obydwu tych osiach.



Rys. 4. Drgania przewodu jezdnego Djp 100 w osi  $z$  i w osi  $x$  przy naciągu 10 kN, po odciążeniu skokową siłą pionową 150 N w  $1/4$  rozpiętości odcinka przewodu o długości 12 m, przy rejestracji drgań w  $1/2$  odcinka: a) dla przewodu nowego, b) dla zużytego

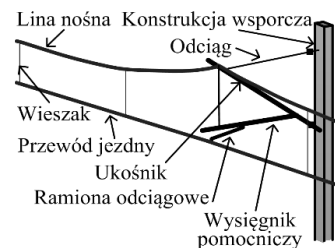


Rys. 5. Charakterystyka widmowa drgań przewodu Djp 100 dla warunków jak na rys. 4

### 3. MODEL SIECI JEZDNEJ

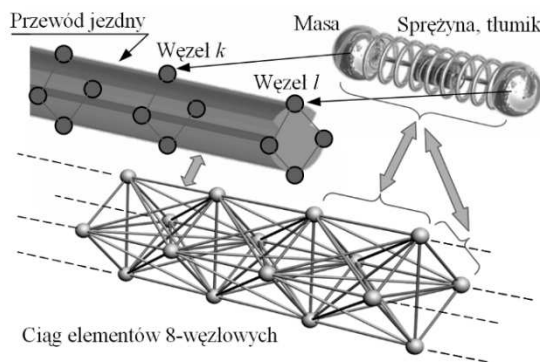
Głównymi elementami składowymi sieci trakcyjnej są: przewody jezdne, podtrzymująca je lina nośna i zbiór wieszaków pomiędzy nimi. Lina nośna jest zamocowana do wysięgników osadzonych na konstrukcjach wsporczych –

słupach rozstawionych wzdłuż toru. Położenie przewodów jezdnych pod konstrukcją wsporczą jest ustalone przez wysięgnik pomocniczy i ramiona odciągowe. Sposób zawieszenia sieci jezdnej na typowej słupowej konstrukcji wsporczej przedstawiono na rysunku 6. Na jeden odcinek naprężenia sieci wchodzi kilka do kilkunastu odcinków zawieszenia o przeciętnej rozpiętości ok. 60 m. Na końcach odcinka naprężenia przewody podlegają działaniu siły naprężającej przez odpowiedni układ obciążników.



Rys. 6. Przykładowy sposób zawieszenia sieci jezdnej na elementach słupowej konstrukcji wsporczej

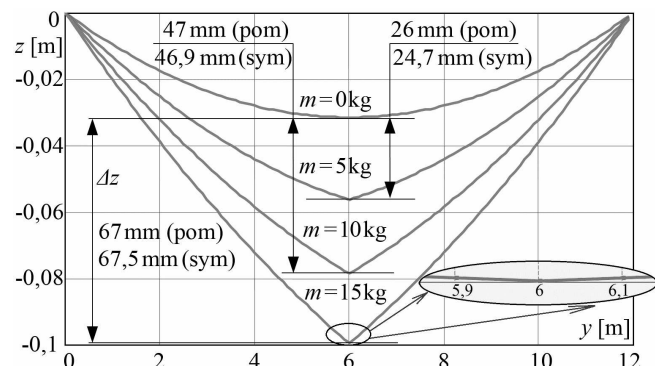
Kluczowe znaczenie przy modelowaniu własności dynamicznych sieci, szczególnie w aspekcie analizy jej interakcji z odbierakami prądu przejeżdżających pociągów, ma opracowanie precyzyjnego modelu przewodu jezdnego. Zaproponowany przez autorów model, różny koncepcyjnie od większości modeli prezentowanych dotąd w literaturze [1, 3, 4], zakłada podział przewodu jezdnego i liny nośnej na zbiór skupionych elementów zachowawczych (kinetycznych i potencjalnych) oraz dyssypatywnych. Przyjęty sposób tego podziału przedstawiono na rysunku 7. W poszczególnych węzłach umieszczone są skupione masy. Sąsiadujące ze sobą węzły połączone są za pomocą skupionych sprężyn i tłumików. Układ ten zapewnia sztywność podłużną i poprzeczną, a rozłożenie węzłów w przekroju poprzecznym przewodu umożliwia symulację np. wpływu jego zużycia.



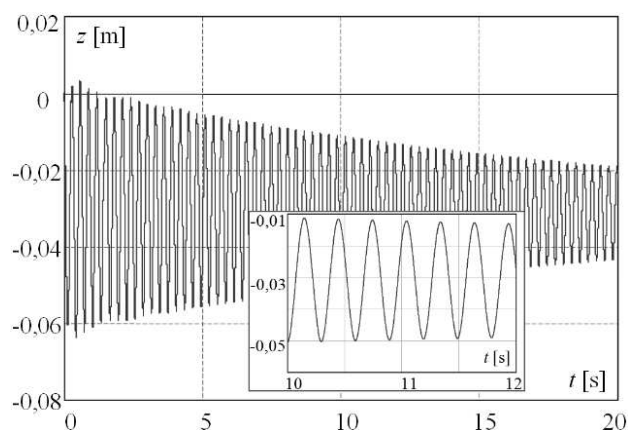
Rys. 7. Sposób podziału przewodu jezdnego na zbiór skupionych elementów zachowawczych i dyssypatywnych

Model matematyczny sieci, obejmujący docelowo także inne jej elementy i uwzględniający warunki brzegowe, sformułowano z wykorzystaniem metody energetycznej Lagrange'a; szczegółowe równania opisujące ten model zostały zaprezentowane w [2]. Istotnym problemem jest określenie parametrów mechanicznych poszczególnych elementów modelu. W odniesieniu do przewodu jezdnego wykonano w tym celu pomiary statycznego ugięcia oraz dynamicznych drgań, a także wykorzystano jego dane katalogowe, co pozwoliło określić masy węzłowych elementów bezwładnościowych, podatności zastępczych elementów sprężystych oraz współczynniki tłumienia kinetycznego zastępczych tłumików.

Na rysunku 8 przedstawiono wykres – wyznaczonego z modelu – przemieszczenia statycznego z wzdłuż przewodu przy różnym obciążeniu, przyłożonym w połowie rozpiętości odcinka. Zmierzone względne ugięcia pionowe  $\Delta z$  przewodu pod wpływem ciężarka o masie  $m = 5, 10$  i  $15$  kg wynosi odpowiednio: 26, 47 oraz 67 mm. Symulacja ugięcia  $\Delta z$  przewodu pod wpływem ciężarka o tych masach daje wyniki odpowiednio: 24,7, 46,9 oraz 67,5 mm.



Rys. 8. Ugięcie  $z = f(y)$  drutu jezdnego w stanie ustalonym z siłą naciągu  $F_z = 5$  kN pod działaniem dodatkowego ciężaru o masie  $m$



Rys. 9. Wynik symulacji drgań odcinka przewodu jezdnego

Na rysunku 9 pokazano wyniki drgań  $z = f(t)$ , w  $\frac{1}{2}$  rozpiętości odcinka pomiarowego dla nieużytego przewodu Dj100, poddanego skokowej sile wymuszającej. Częstotliwość drgań swobodnych wynosi 3,29 Hz i jest bliska częstotliwości zmierzonej, która wynosi 3,19 Hz.

#### 4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych drgań przewodów jezdnych sieci, które wskazują możliwość wykorzystania analizy tych drgań do wykrycia pewnych nieprawidłowości stanu technicznego sieci. Zaproponowano odpowiednie metody analizy, oparte na dyskretnej transformacji Fouriera, i sformułowano wstępne kryteria detekcji takich przypadków. Dla pełnej weryfikacji tej metody konieczne będzie przeprowadzenie badań także w warunkach terenowych. Stwierdzono, że model przewodu jezdnego, oparty na metodzie energetycznej Lagrange'a, dobrze odwzorowuje statyczny stan jego zawieszenia i częstotliwości drgań swobodnych. Kontynuowane są prace nad poszerzeniem oprogramowania o modele innych elementów sieci i nad wyznaczeniem parametrów tarcia suchego i wiskotycznego dla modelu przewodu. Pozwoli to stworzyć narzędzie, które mogłoby wspierać systemy diagnostyki sieci, ale także być wykorzystane do projektowania sieci trakcyjnych, zwłaszcza dla kolei dużych prędkości.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Finner L., Poetsch G., Sarnes B., Kolbe M.: Program for catenary-pantograph analysis, PrOSA statement of methods and validation according EN 50318, Vehicle System Dynamics, Vol. 53, No. 3 (2015), s. 305-313, ISSN 0042-3114
2. Kaczmarek P., Karwowski K., Kuciński M., Michna M., Skibicki J., Wilk A.: Model referencyjny sieci trakcyjnej – koncepcja modelowania, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 40, 2014, s. 57-60, ISSN 2353-1290
3. Liu Z., Jönsson P-A., Stichel S., Rønquist A.: On the implementation of an auxiliary pantograph for speed increase on existing lines, Vehicle System Dynamics, Vol. 54, No. 8 (2016), s. 1077-1097, ISSN 0042-3114
4. Oumri M., Rachid A.: A mathematical model for pantograph-catenary interaction, Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, Vol. 22, No. 5 (2016), pp. 463-474, ISSN 1387-3954
5. PN-EN 50318 Zastosowania kolejowe – Systemy odbioru prądu – Walidacja symulacji oddziaływania dynamicznego pomiędzy pantografem a siecią jezdna górną. PKN, Warszawa 2003

### ANALYSIS OF OSCILLATIONS OF OVERHEAD CONTACT LINE TO ESTIMATE ITS TECHNICAL CONDITION

The paper presents the possibilities of using forced oscillation analysis of catenary wires to assess its technical condition. The results of laboratory tests are considered in which vibration of one section of the contact wire with varying degrees of wear and the different conditions of his suspension are recorded. On the basis of the analysis in the time and the frequency domain specific relationships between technical state of the wire and selected parameters of the recorded vibrations are searched. As a conclusion possible criteria for assessing the state of the contact line are formulated based on the spectral characteristics of measured vibrations. An initial version of novel mathematical model of the overhead contact line section is also elaborated. The model is based on the energy method of Lagrange. The paper describes the methodology for determining certain parameters of this model using the results of laboratory tests. The model is prospectively dedicated to the certification testing for new built and repaired sections of the overhead catenary, as well as to support the evaluation processes of contact line or pantographs technical condition in any diagnostic and monitoring system.

**Keywords:** overhead contact line, harmonic analysis, mathematical modeling, diagnostics and monitoring.