

SIEĆ SENSOROWA DO REJESTRACJI DRGAŃ GÓRNEJ SIECI TRAKCYJNEJ W CELACH DIAGNOSTYKI EKSPLOATACYJNEJ

Krzysztof KARWOWSKI¹, Marek KUCIŃSKI², Mirosław MIZAN³, Andrzej WILK⁴

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki,

1. tel.: 58 3471158, e-mail: krzysztof.karwowski@pg.edu.pl
2. tel.: 58 3472857, e-mail: marek.kucinski@pg.edu.pl
3. tel.: 58 3471502, e-mail: miroslaw.mizan@pg.edu.pl
4. tel.: 58 3471087, e-mail: andrzej.wilk@pg.edu.pl

Streszczenie: Wraz ze wzrostem prędkości kolejowych pojazdów elektrycznych zwiększają się wymagania utrzymania sieci trakcyjnej w odpowiednim stanie technicznym. Ciągły monitoring i diagnostyka pozwalają wykrywać pogarszającą się jakość odbioru prądu z sieci jezdnej. Jedną z metod jest umieszczenie czujników przyspieszenia na przewodzie jezdny. Analiza przebiegu przyspieszenia pozwala określić jakość współpracy sieci jezdnej z pantografem. Symulacja dynamiki takiego układu ułatwia dobór parametrów akcelerometrów. Wykorzystanie bezprzewodowej sieci sensorowej redukuje konieczność izolacji elektrycznej czujników od sieci trakcyjnej. W artykule omówiono projekt i realizację sieci sensorowej do rejestracji przyspieszeń przewodów sieci jezdnej. Zaprezentowano wstępne wyniki pomiarów laboratoryjnych.

Słowa kluczowe: górna sieć trakcyjna, modelowanie i symulacja, analiza drgań, bezprzewodowa sieć sensorowa.

1. WSTĘP

Istotny wpływ na niezawodność i efektywność zelektryfikowanego transportu kolejowego ma prawidłowe działanie układu odbioru prądu z sieci trakcyjnej przez poruszające się pojazdy. Dla utrzymania sieci jezdnej we właściwym stanie technicznym rozwijane są systemy diagnostyki i monitoringu. Zły stan techniczny sieci jezdnej może powodować m.in.: wzrost oscylacji przewodu, miejscowe zwiększenie zużycia przewodu, a w skrajnych przypadkach – uszkodzenie współpracującego z siecią odbieraka prądu w pojeździe. W celu wdrożenia systemu monitoringu czy systemu diagnostycznego należy opracować metody wykrywania występujących w eksploatacji nieprawidłowych stanów sieci. Metody te winny opierać się na analizie parametrów stosunkowo łatwo mierzalnych; jednym z nich może być przebieg drgań przewodów jezdnych sieci, wzbudzonych np. siłą nacisku odbieraka prądu przejeżdżającego pociągu.

Celem pracy było wykonanie badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych w celu określenia cech drgań przewodów jezdnych oraz zaproponowanie metody przetwarzania sygnałów pomiarowych. Na podstawie symulacji określono charakter drgań sieci trakcyjnej. Do badań laboratoryjnych wykorzystano komputerową sieć sensorową WSN (ang. *Wireless Sensor Network*). WSN otwierają nowe możliwości w zakresie monitoringu i diagnostyki – zarówno infrastruktury, jak i pojazdów [1–3]. Korzyściami z wykorzystania łączności bezprzewodowej

w transmisji pomiędzy urządzeniami systemu jest uniknięcie izolacji czujników umieszczonych na górnej sieci trakcyjnej, znajdujących się pod wysokim napięciem, od koncentratora umieszczonego na konstrukcji wsporczej. Automatyczne monitorowanie stanu technicznego sieci jezdnej redukuje potrzeby konserwacji poprzez wcześniejsze wykrywanie usterek przed ich eskalacją oraz poprawia niezawodność.

2. WSPÓLPRACA ODBIERAKA PRĄDU Z SIECIĄ JEZDĄ

2.1. Zasada współpracy odbieraka prądu z siecią jezdną

Podstawowym warunkiem prawidłowego odbioru prądu z sieci jest zapewnienie ciągłości styku nakładek stykowych pantografu z przewodami jezdny i utrzymanie rezystancji zestyku na odpowiednio niskim poziomie. Rezystancja zestyku maleje ze wzrostem siły docisku odbieraka do przewodu, ale zbyt duża wartość siły powoduje nadmierne zużycie nakładek odbieraka i przewodów jezdnych oraz zwiększa uniesienie sieci. Stąd też wartości siły statycznej odbieraka prądu są znormalizowane [4].

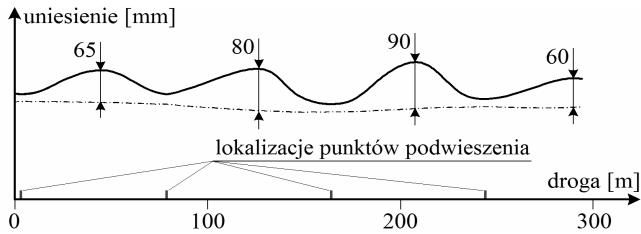
Podczas ruchu pojazdu wskutek nacisku pantografu na przewód jezdny następuje jego unoszenie. W punkcie styku przewodu z odbierakiem, uniesienie osiąga lokalnie maksymalną wysokość, przy czym jej wartość zmienia się periodycznie wzdłuż drogi, jak przedstawiono na rysunku 1. Wynika to ze zmian sztywności sieci między sąsiednimi punktami jej podwieszenia – wartość minimalna sztywności występuje pośrodku przęsła, a maksymalna w otoczeniu punktu podwieszenia [5]. Występująca w literaturze elastyczność sieci jest odwrotnością jej sztywności. Dla stałej prędkości pojazdu, zmianę sztywności sieci k_s wzdłuż przęsła podwieszenia można aproksymować wzorem:

$$k_s(t) = k_0 \left[1 + \alpha \cos\left(\frac{2\pi v}{L} t\right) \right] \quad (1)$$

przy czym:

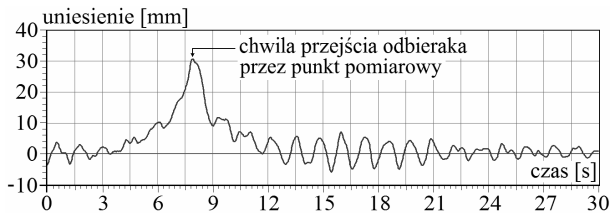
$$k_0 = \frac{k_{\max} + k_{\min}}{2}, \quad \alpha = \frac{k_{\max} - k_{\min}}{k_{\max} + k_{\min}} \quad (2)$$

gdzie: k_{\max} , k_{\min} – największa i najmniejsza sztywność sieci w przęśle podwieszenia, k_0 – sztywność średnia, α – współczynnik nierównomierności elastyczności, v – prędkość ruchu pojazdu, L – długość przęsła.



Rys. 1. Przykładowa trajektoria punktu styku odbieraka z siecią

Sieć jezdna i odbierak prądu tworzą złożoną strukturę mechaniczną, która ma charakter układu drgającego o wielu częstotliwościach własnych [4]. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy przebieg uniesienia przewodu w wybranym punkcie sieci, zarejestrowany podczas przejazdu pociągu [6].



Rys. 2. Przebieg uniesienia przewodu jezdnego w określonym punkcie sieci przy przejeździe pojazdu z prędkością ok. 60 km/h

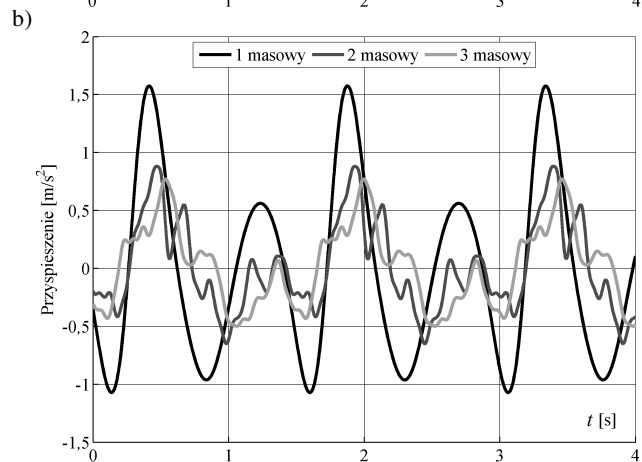
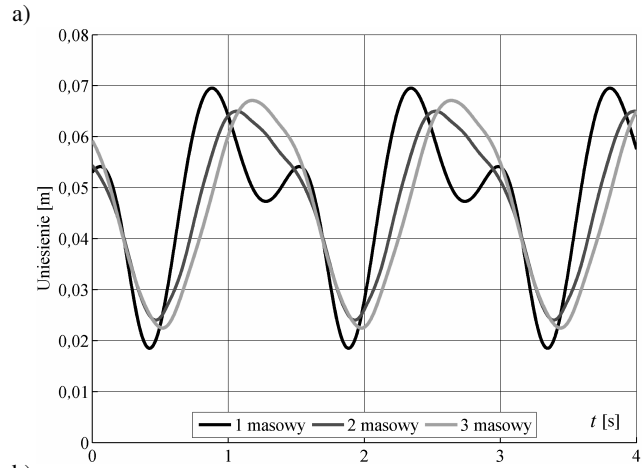
Drgania przewodów i elementów odbieraka generują składową dynamiczną siłę stykową. O kształcie przebiegu i widmie częstotliwości siły stykowej, prócz parametrów sieci i odbieraka, decyduje także prędkość jazdy i w pewnym stopniu czynniki niedeterministyczne, jak np. kierunek i prędkość wiatru, stan torowiska.

Dla oceny jakości współpracy odbieraka z siecią jezdną w TSI i normach [7] zdefiniowano wskaźniki, takie jak: wartość średnia minimalna i maksymalna siły stykowej w obszarze przęsła zawieszenia sieci, odchylenie standardowe oraz statystyczna wartość maksymalna i minimalna tej siły, maksymalne uniesienie przewodów pod konstrukcją wsporczą, procent utraty kontaktu. Akty te wymagają m.in. przeprowadzenia symulacji dla sprawdzenia czy sieć spełnia określone kryteria.

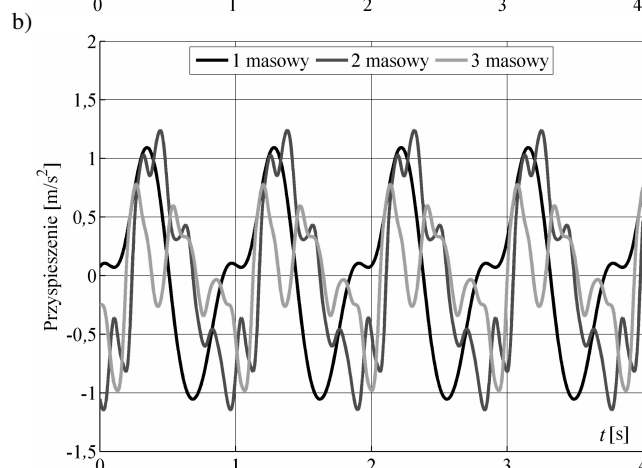
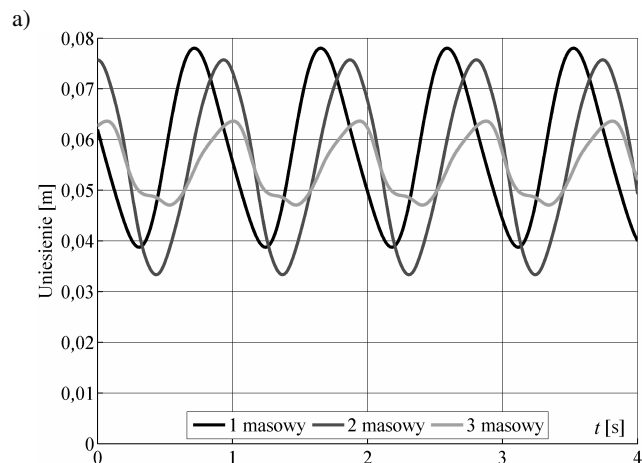
2.2. Modelowanie dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią jezdną

Współpraca odbieraka i sieci jezdnej może być analizowana z wykorzystaniem różnych modeli odbieraka, jak i sieci jezdnej [4, 5, 8, 9]. Punktem wyjścia są modele składające się ze skupionych mas, więzi tłumiących i sprężystych. Dodatkowo modele te mogą być parametryzowane np. poprzez zmianę współczynnika elastyczności sieci jezdnej.

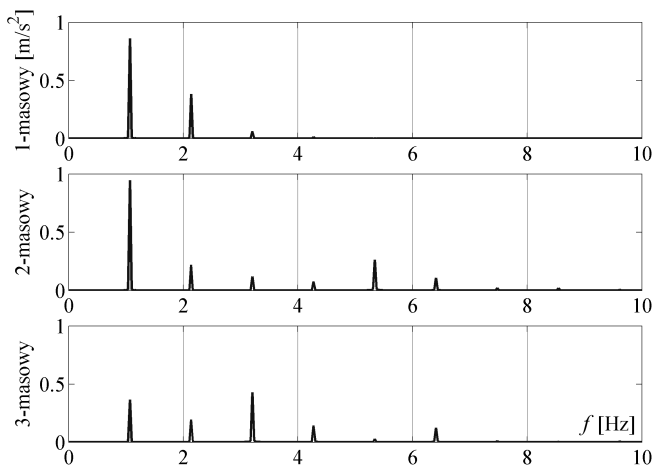
W pracy wykorzystano wcześniej publikowane modele odbieraka [6, 10]. Są to modele: 1-, 2- i 3-masowe. Dla tych modeli przeprowadzono symulacje dla stanu quasi-ustalonego w programie Matlab, których wyniki dla prędkości 160 km/h przedstawiono na rysunku 3, a dla prędkości 250 km/h na rysunku 4. Symulacje przy niższej prędkości wykonano dla współczynnika nierównomierności elastyczności sieci $\alpha = 0,29$, a przy wyższej dla $\alpha = 0,17$, tj. wartości dla typowych sieci trakcyjnych. W ten sposób określono wartości graniczne przyspieszeń i częstotliwości. Dla prędkości 160 km/h nie przekraczają one $1,6 \text{ m/s}^2$, a dla 250 km/h – $1,24 \text{ m/s}^2$. Widmo częstotliwości przyspieszenia przedstawiono na rysunku 5. Uzyskane wartości decydują o zakresach dedykowanego systemu pomiarowego.



Rys. 3. Dynamika ruchu przewodu jezdnego przy różnych modelach dla $v=160 \text{ km/h}$, $\alpha=0,29$, a) uniesienie; b) przyspieszenie



Rys. 4. Dynamika ruchu przewodu jezdnego przy różnych modelach dla $v=250 \text{ km/h}$, $\alpha=0,17$: a) uniesienie; b) przyspieszenie



Rys. 5. Widmo przyspieszeń odbieraka prądu z wykorzystaniem różnych modeli dla $v=250$ km/h, $\alpha=0,17$

3. MONITORING I DIAGNOSTYKA SIECI JEZDNEJ

3.1. Metody monitoringu i diagnostyki sieci jezdnej

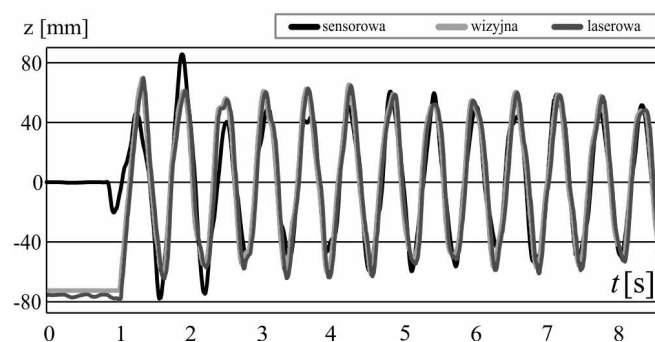
Dla utrzymania ciągłej sprawności sieci trakcyjnej stosowane są metody monitoringu i diagnostyki w warunkach eksploatacyjnych. Podstawowa metoda kontroli stanu sieci jezdnej oparta jest na wykorzystaniu specjalizowanych pojazdów diagnostycznych [11]. Rejestrują one parametry geometryczne sieci jezdnej – wysokości zawieszenia przewodów i ich odsuwu poziomego oraz stopień zużycia przewodów jezdnych, jak również parametry związane z jej dynamiczną współpracą z odbierakiem prądu, takie jak: siła stykowa, liczba i czas utraty kontaktu, uniesienie przewodów w punkcie podwieszenia, temperatura przewodów, wykrywanie łuku elektrycznego, wykrywanie tzw. miejsc sztywnych wywołujących udary odbieraka itp. Pomiar realizowany jest podczas przejazdu wagonu daną linią, zatem odbywa się w warunkach odpowiadających typowej eksploatacji sieci. Stosowane są różne metody pomiarowe, oparte często na technice wizyjnej – ultraszybkim kamerom, skanery 2D i 3D, dalmierze laserowe – wspieranej algorytmami analizy obrazu, ale dla określenia niektórych parametrów dynamicznych konieczne jest użycie specjalizowanego odbieraka, wyposażonego w przetworniki pomiarowe [12].

Inną metodą jest stacjonarny monitoring współpracy sieci z odbierakami prądu [6, 8]. Z reguły rejestrowany jest przebieg uniesienia przewodu jezdnej w czasie przejazdu pociągu w punkcie podwieszenia sieci z wykorzystaniem dalmierzy laserowych lub kamer, a niekiedy przyspieszenie za pomocą akcelerometrów. Rejestrowana jest również prędkość pojazdu, która ma wpływ na uniesienie przewodu. Analiza rejestrowanych przebiegów pozwala wykryć niewłaściwą współpracę pantografu z siecią [11, 13, 14]. Pojawiają się też koncepcje monitoringu całej sieci poprzez wyposażenie pewnych pojazdów standardowych w przyrządy pomiarowo-rejestrujące [15].

3.2. Bezprzewodowa sieć sensorowa do monitoringu i diagnostyki sieci jezdnej

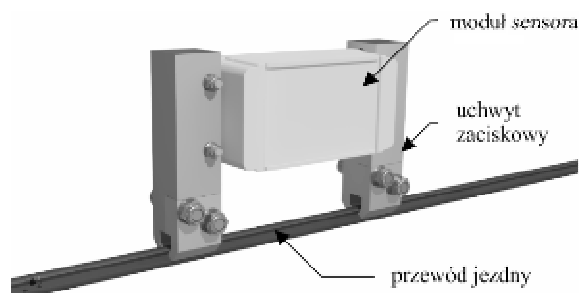
Obecnie wprowadzane są nowe rozwiązania w zakresie diagnostyki sieci trakcyjnych z wykorzystaniem technologii teleinformatycznych [13, 14, 16]. Jedną z możliwych metod pomiarowych opiera się na użyciu akcelerometrów zamocowanych na przewodzie jezdnej. W tym celu opracowano sensory wyposażone w czujniki przyspieszeń, łączność bezprzewodową oraz źródło zasilania.

Pomiary z użyciem akcelerometrów poddane zostały weryfikacji z wykorzystaniem innych metody pomiarowych. Zbudowane stanowisko pomiarowe pozwala rejestrować drgania przewodu jezdnej przy odpowiednich siłach wymuszających – opis stanowiska i metodykę badań przedstawiono w [17]. Częstotliwość próbkowania oraz pasmo przenoszenia zastosowanych przyrządów pomiarowych dobrano o dwa rzędy wielkości powyżej częstotliwości mierzonych sygnałów. Metody: wizyjna oraz laserowa, pozwalały na bezpośrednią rejestrację położenia przewodu jezdnej. Z wykorzystaniem metody sensorowej rejestrowano przyspieszenia – zebrane pomiary zostały następnie przetworzone cyfrowo w celu uzyskania przebiegu zmian uniesienia przewodu jezdnej. W programie obliczeniowym wykonano m.in. dwukrotne całkowanie, filtrowanie szumów i składowej stałej. Wyniki przemieszczeń przewodu jezdnej w osi pionowej przy użyciu różnych metod pomiarowych przedstawiono na rysunku 6. Uzyskano zadowalającą zgodność w zakresie amplitudy oraz częstotliwości drgań przy pomiarach z wykorzystaniem akcelerometru. Brak możliwości określenia wartości uniesienia przewodu jezdnej w stanie spoczynkowym (widoczna wartość ujemna dla czasu od 0 do ok. 1 s, tj. przy występowaniu siły obciążającej przewód i wymuszającej drgania po odciążeniu przewodu – rys. 6) nie jest przeszkodą do wykorzystania metody sensorowej do diagnostyki bazującej na analizie przyspieszeń.



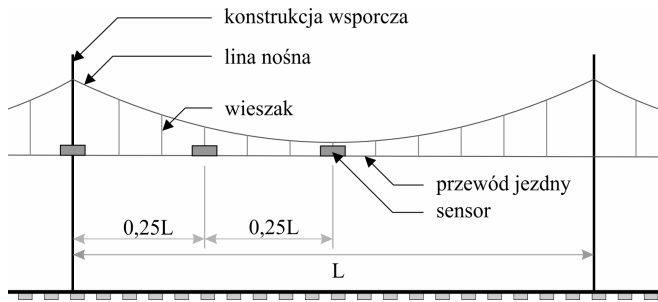
Rys. 6. Przykładowe przebiegi drgań przewodu jezdnej uzyskane przy użyciu różnych metod pomiarowych

W toku dalszych prac zaproponowano sposób montażu sensorów na przewodzie jezdnej, co przedstawiono na rysunku 7. Do montażu wykorzystuje się uchwyty do profilowanego przewodu jezdnej. Obudowa sensora typu IP 67 zabezpiecza go przed warunkami środowiskowymi.



Rys. 7. Sposób montażu sensora na przewodzie jezdnej

Umieszczenie kilku sensorów w odpowiednio wybranych miejscach pręśla podwieszenia sieci jezdnej powinno umożliwić wykrycie niepoprawnej współpracy z odbierakiem prądu przejeżdżającego pojazdu. Proponowane rozmieszczenie przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Propozycja rozmieszczenie sensorów na odcinku sieci

4. PODSUMOWANIE

Zastosowanie bezprzewodowej sieci sensorowej z wykorzystaniem akcelerometrów pozwala rejestrować przyspieszenia w wybranych punktach górnej sieci trakcyjnej. Osiągnięto zadowalającą zbieżność z wynikami zebranymi z wykorzystaniem bezpośrednich metod pomiaru uniesienia sieci trakcyjnej. Niezbędne są dalsze prace mające na celu zmniejszenie zużycia energii węzłów WSN oraz wykorzystanie zewnętrznych źródeł zasilania np. solarnych. Na bazie zebranych danych podczas próbnej eksploatacji na sieci trakcyjnej przygotowany zostanie algorytm wykrywający zdarzenia negatywnie wpływające na jakość odbioru energii elektrycznej z sieci trakcyjnej przez pojazdy.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Nāvika P., Rønquist A., Stichelba S.: A wireless railway catenary structural monitoring system: Full-scale case study, *Case Studies in Structural Engineering* 6 (2016) 22–30.
2. Hodge V. J., O’Keefe S., Weeks M., Moulds A., *Wireless Sensor Networks for Condition Monitoring in the Railway Industry: A Survey*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 16, No. 3, 2015.
3. Koyama T., Detection of pantograph failures using sensors fixed to the catenary system. *Railway Tech. Avalanche*. No. 41, December 27, 2012.
4. Judek S., Karwowski K., Mizan M., Wilk A., Modelowanie współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną. *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 12 (2015).
5. Wu T., Brennan M.J.: Basic analytical study of pantograph-catenary system dynamics. *Journal of Vehicle System Dynamics*, vol. 30, 1998, s. 443-456.

6. Mizan M., Karwowski K., Karkosiński D.: Monitoring odbieraków prądu w warunkach eksploatacyjnych na linii kolejowej. *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 12 (2013).
7. PN-EN 50318:2003 Zastosowania kolejowe – Systemy odbioru prądu – Walidacja symulacji oddziaływania dynamicznego pomiędzy pantografem a siecią jezdna górną, PKN, Warszawa 2003.
8. Karwowski K., Mizan M., Karkosiński D.: Monitoring of current collectors on the railway line. *Transport (online)* 2016, s. 1-9 (e-ISSN 1648-3480).
9. Wilk A., Karwowski K., Judek S., Mizan M.: A new approach to determination of the two-mass model parameters of railway current collector. Twelfth International Conference MET’2015 Modern Electrified Transport 4 - 7 October 2015 Trogir – Croatia.
10. Wilk A., Karwowski K., Judek S., Mizan M.: Modelowanie i symulacja dynamiki ruchu trakcyjnego odbieraka prądu. *Przegląd Elektrotechniczny* nr 10 (2016), s.243-248 (ISSN 0033-2097).
11. Giętkowski Z., Karwowski K., Mizan M.: Diagnostyka sieci trakcyjnej. Wydaw. PG, Gdańsk 2009.
12. Ikeada M., Nagasaka S., Usuda T.: A precise contact force measuring method for overhead catenary system. *World Congress on Railway Research*, Köln, Germany, Sept. 2001, s. 1-12.
13. Usuda T., Ikeda M., Koyama T., Detecting method of pantograph failure by measuring catenary vibration. SPARK, 2013.
14. Usuda T., Ikeda M., Yamashita Y., Method for Detecting Step-shaped Wear on Contact Strips by Measuring Catenary Vibration. *QR of RTRI*, Vol. 52, No. 4, Nov. 2011.
15. Collina A., Fossati F., Resta F.: An innovative OHL diagnosis procedure based on the pantograph dynamics measurements. *World Congress on Railway Research*, Köln, Germany, Sept. 2001, s. 1-10.
16. Karwowski K., Kuciński M., Kulig E.: Monitoring górnej sieci trakcyjnej z wykorzystaniem bezprzewodowej sieci sensorowej – węzeł pomiarowy. TTS 12/2015.
17. Wilk A., Mizan M., Kaczmarek P., Karwowski K., Skibicki J.: Badania eksperymentalne i symulacyjne dynamiki modelowego odcinka sieci trakcyjnej. *Zesz. Nauk. Wydz. Elektrotechniki i Automatyki PG* nr 57 (2017).

SENSOR NETWORK FOR REGISTRATION OF OVERHEAD CONTACT LINE VIBRATION FOR OPERATIONAL DIAGNOSTICS PURPOSES

Together with increasing traction vehicle’s speed a need to maintain overhead contact lines in an appropriate technical condition constantly rises. Permanent monitoring and diagnostics is necessary to detect unfavorable phenomenon deteriorating current collecting quality e.g.: excessive wear of contact strips, incorrect vehicle’s pantograph force settings. One of the methods is to place acceleration sensor on the contact wire. Analysis of measured waveforms should allow quality estimation of cooperation the overhead contact line with the pantograph. Preliminary simulation of the dynamics of such a system facilitates selection of important accelerometer parameters. Wireless network selection as sensor network communication medium bypasses necessity for electric insulation between measurement system’s elements and overhead line. The design has to take into an account low power usage and renewable sources energy harvesting methods. The paper presents the results of simulation of dynamic pantograph cooperation with the overhead contact line. The design and realization of wireless sensor network to investigate the contact line acceleration are described. Preliminary laboratory measurement’s results are presented.

Keywords: overhead contact line, modelling and simulation, vibration analysis, wireless sensor network.