

Przemysław PAZDRO, Mirosław MIZAN, Jacek SKIBICKI
POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI

Diagnostyka techniczna zawieszenia ślizgacza trakcyjnego odbieraka prądu

Prof. dr hab. inż. Przemysław PAZDRO

Specjalizuje się w dziedzinie trakcji elektrycznej i automatyki transportu szynowego. Ukończył Politechnikę Warszawską i rozpoczął pracę naukową w Politechnice Gdańskiej w 1956 r., gdzie uzyskał stopień naukowy doktora habilitowanego i przez wiele lat był kierownikiem Katedry Trakcji Elektrycznej oraz dziekanem Wydziału Elektrotechniki i Automatyki. W 1988 roku otrzymał tytuł naukowy profesora. Jest konsultantem technicznym Metra Warszawskiego i Zarządu Transportu Publ. Urzędu Miasta Gdańska.

e-mail: p.pazdro@ely.pg.gda.pl



Dr inż. Mirosław MIZAN

Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 1991 roku w Politechnice Gdańskiej. Pracuje w Katedrze Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki Politechniki Gdańskiej na stanowisku adiunkta. Główny kierunek badań naukowych obejmuje mikroprocesorowe układy sterowania napędów trakcyjnych oraz diagnostykę systemów i urządzeń w trakcji elektrycznej.

e-mail: m.mizan@ely.pg.gda.pl



Dr inż. Jacek SKIBICKI

Ukończył studia na Politechnice Gdańskiej w roku 2000. Na tej samej uczelni uzyskał stopień naukowy doktora w roku 2004. Od tego czasu pracuje na stanowisku adiunkta w Zakładzie Trakcji Elektrycznej, Wydziału Elektrotechniki i Automatyki. Zajmuje się problemami związanymi ze stabilnością trakcyjnych systemów zasilania; do obszaru jego zainteresowań wchodzi również dziedzina pojazdów elektrycznych i automatyki w transporcie.

e-mail: j.skibic@ely.pg.gda.pl



1. Wstęp

Jakość odbioru prądu z sieci jezdnej przez pojazdy jest istotnym problemem eksploatacyjnym. Zachodzi konieczność stałej kontroli stanu technicznego zarówno sieci jezdnej, jak i odbieraków prądu. Metodyka diagnozowania sieci jezdnej jest od lat opanowana - istnieją odpowiednie środki techniczne w postaci specjalnych wagonów diagnostycznych, również eksploatowanych na sieci Polskich Linii Kolejowych [1]. Kontrola stanu technicznego odbieraków prądu w praktyce eksploatacyjnej oparta jest w zasadzie na subiektywnych, ręcznych metodach pomiarowych. Jest to proces uciążliwy, gdyż wymaga wejścia na dach pojazdu. W Zakładzie Trakcji Elektrycznej Politechniki Gdańskiej prowadzone są badania, dotyczące diagnostyki technicznej trakcyjnych odbieraków prądu [2, 3]. Elementem tych badań jest poszukiwanie rozwiązań pomiarowych, które pozwoliłyby na ocenę stanu technicznego układu zawieszenia ślizgacza odbieraka. Jest to ważny węzeł konstrukcyjny, mający zasadniczy wpływ na poprawną współpracę dynamiczną odbieraka z siecią, zwłaszcza przy dużych prędkościach jazdy. Poglądowo działanie węzła zawieszenia ślizgacza odbieraka prądu wyjaśnia rys. 1. Dynamiczna siła stykowa F_d , zmieniająca się okresowo w wyniku ruchu pojazdu lub występująca czasem w postaci udarowej, powoduje - dzięki ugięciu sprężyn zawieszenia - przemieszczanie się pionowe ślizgacza. Tym samym zapewniona jest trajektoria ruchu punktu styku bez odskoków ślizgacza od przewodów jezdnych. Poprawnie działający układ zawieszenia ślizgacza łagodzi również dynamiczne oddziaływanie odbieraka na sieć jezdnią. Uszkodzenie sprężyn zawieszenia lub zatarcie przegubów może spowodować udary w punktach zawieszenia sieci jezdnej i jej uszkodzenie lub też poważne uszkodzenie samego odbieraka, co w konsekwencji może prowadzić do zaburzeń w ruchu pojazdów. Parametrem oceny sprawności węzła zawieszenia jest tzw. statyczna elastyczność zawieszenia czyli ugięcie dx pod wpływem określonej siły F czyli wartość dx/F wyrażona w [mm/N]. Pomiar tego parametru w eksploatacji jest kłopotliwy i często zaniedbywany.

Streszczenie

Zawieszenie ślizgacza odbieraka prądu decyduje o jego poprawnej współpracy dynamicznej z siecią - uszkodzenie prowadzi do zaburzeń w ruchu pojazdów. Zaproponowano metodę oceny stanu zawieszenia przez analizę jego wymuszonych drgań, wywołanych zewnętrznym impulsem siły. Analizowano przebiegi przyspieszenia i prędkości drgającego - wraz ze ślizgaczem badanego odbieraka - przewodu jezdnej, pochodzące z czujnika akcelerometrycznego i żyroskopowego. Na podstawie badań laboratoryjnych oraz przeprowadzonych na zbudowanym stanowisku terenowym, wybrano zestaw reprezentatywnych cech mierzonych sygnałów, silnie uzależnionych od stanu zawieszenia ślizgacza.

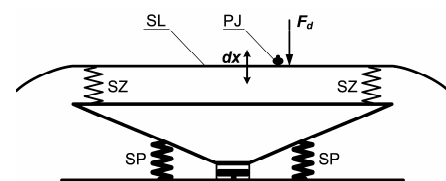
Słowa kluczowe: trakcja elektryczna, odbierak prądu, diagnostyka techniczna, analiza drgań.

Technical diagnostics of slipper suspension node of traction current collector

Abstract

The quality of current collection by electric traction vehicles depends on the dynamics of pantograph spring suspension of the slipper; its fault may cause serious disturbances in traffic. The proposed method of evaluation of its technical state is realized by the waveform analysis of slipper oscillation. The signals supplied by the specifically mounted accelerometer and gyroscopic sensor represent the acceleration and vertical speed of the contact point between current collector and overhead line. The oscillation is excited by the single mechanical stroke, generated in especially constructed mechanical structure with electromagnet. In the elaborated software for signal analysis the DFT is used; it allows to find several resonant points in the range of 1-10 Hz. The verification of proposed method was carried out in the laboratory and on the experimental field testing stand in the PKP Cargo depot in Gdynia. The obtained results confirmed the validity of proposed diagnostic idea. The set of specific attributes of signal waveforms and spectra was determined; these attributes provide high repeatability in the same conditions and strong dependence on the technical state of slipper suspension.

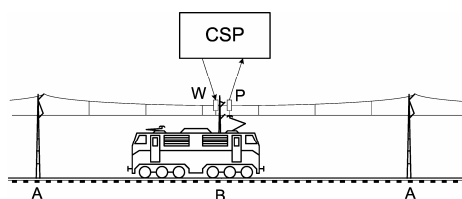
Keywords: electric traction, current collector, technical diagnostics, oscillation analysis.



Rys. 1. Oddziaływanie siły stykowej na odbierak prądu: F_d - dynamiczna siła stykowa, dx - przemieszczenie ślizgacza, SL - ślizgacz, PJ - przewód jezdny sieci trakcyjnej, SZ - sprężyny zawieszenia ślizgacza, SP - sprężyny unoszące odbierak

Fig. 1. Contact force reaction on current collector: F_d - dynamical contact force, dx - slipper's displacement, SL - slipper, PJ - overhead line's contact wire, SZ - slipper suspension's springs, SP - pantograph's springs

Układ sieci – odbierak prądu, jest układem o pewnych masach, siłach elementów sprężystych oraz siłach tarcia. Pobudzony siłą zewnętrzną - cyklicznie lub uderowo - będzie reagował drganiami o określonym przebiegu czasowym i charakterystycznym rozkładzie widmowym. Przebiegi te są zależne od parametrów układu. Podczas normalnej eksploatacji masy elementów nie zmieniają się w sposób zasadniczy, natomiast sprężystość elementów i siły tarcia zależą od aktualnego stanu technicznego odbieraka. Analiza przebiegów wymuszonych drgań może zatem posłużyć do celów diagnostycznych. Potwierdziły to badania symulacyjne przeprowadzone na modelu matematycznym układu mechanicznego sieci – odbierak, z wykorzystaniem programów MathCad i PSpice [4]. Koncepcję stanowiska pomiarowego na kontrolnym odcinku sieci jezdnej przedstawiono na rys. 2.

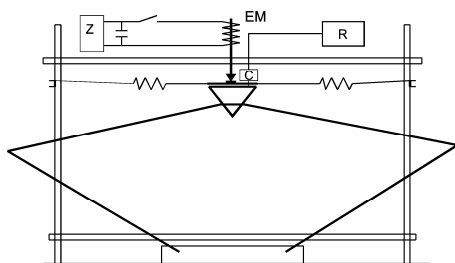


Rys. 2. Koncepcja terenowego stanowiska pomiarowego, gdzie: CSP – centrala sterująco-pomiarowa, W – wzbudnik drgań, P – przetwornik pomiarowy, A – słup wsporczy sieci, B – słup pomiarowy

Fig. 2. Idea of field test stand, where: CSP – steering and measurement station, W – oscillation exciter, P – sensor, A – overhead line's support pole, B – measurement pole

2. Stanowiska badawcze i układy pomiarowe

Dla praktycznej realizacji zaproponowanej koncepcji oceny stanu zawieszenia ślizgacza konieczne jest określenie przebiegu siły, pobudzającej układ do drgań – pojedynczy impuls czy charakter periodyczny, wybór wielkości mierzonych i odpowiednich czujników pomiarowych oraz metod analizy rejestrowanych przebiegów. W tym celu przeprowadzono wstępne badania laboratoryjne na rzeczywistym odbieraku i konstrukcji symulującej fizycznie sieć jezdnią. Zainstalowano odpowiedni układ elektromechaniczny, wymuszający ruch ślizgacza badanego odbieraka. Schemat stanowiska z odbierakiem rzeczywistym przedstawiono na rys. 3.



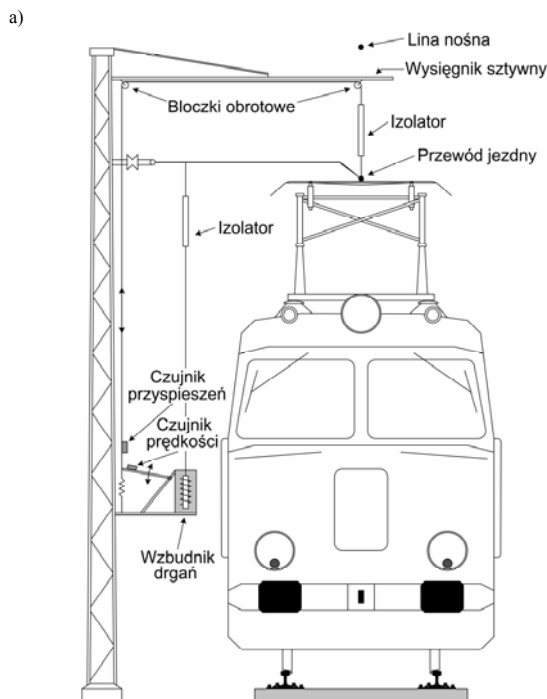
Rys. 3. Szkic konstrukcyjny stanowiska laboratoryjnego z rzeczywistym odbierakiem typu AKP4E, gdzie: Z – zasilacz, EM – elektromagnes pobudzający, C – czujnik pomiarowy, R – rejestrator

Fig. 3. Scheme of laboratory test stand with real current collector of type AKP4E, where: Z – power supply, EM – force exciting electromagnet, C – sensor, R – recorder

Do badania odpowiedzi układu na zadane wymuszenie stosowano:

- akcelerometr elektroniczny – przymocowany sztywno do przewodu jezdnego umożliwił rejestrację przebiegu przyspieszenia ruchu drgającego sieci i ślizgacza,
- elektroniczny żyroskopowy czujnik prędkości – dzięki konstrukcji, zamieniającej liniowy ruch ślizgacza na ruch obrotowy czujnika, dostarczał sygnał prędkości drgań sieci i ślizgacza.

Sygnaly z czujników rejestrowano za pomocą oscyloskopowej karty pomiarowej Acquitek CH-3150 w komputerze PC. Opracowano własne oryginalne oprogramowanie, dokonujące analizy przebiegów czasowych – m.in. filtracji zakłóceń, wyznaczania wartości maksymalnej i minimalnej i ich różnicy, oraz analizy częstotliwościowej sygnału, opartej na dyskretnej transformacji Fouriera DFT. Dla weryfikacji sprzętu i oprogramowania dokonano pomiaru i analizy widmowej sygnałów także przy pomocy rejestratora cyfrowego HIOKI 8853 oraz oscyloskopu Tektronix TDS724C, uzyskując całkowitą zgodność wyników.



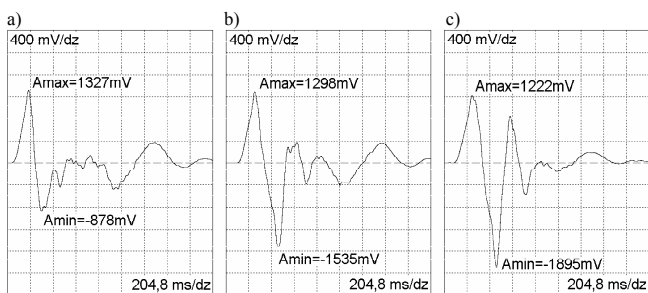
Rys. 4. Terenowe stanowisko pomiarowe: a) szkic konstrukcyjny, b) widok stanowiska; A – żyroskopowy czujnik prędkości, B – czujnik przyspieszeń, C – wzbudnik drgań

Fig. 4. Field test stand: a) scheme of construction, b) view of measurement equipment; A – gyroscopic speed sensor, B – accelerometer, C – force exciting electromagnet

W oparciu o wyniki badań laboratoryjnych opracowano szczegóły konstrukcji stanowiska terenowego, które zostało zbudowane na terenie Zakładu Taboru PKP CARGO w Gdyni Grabówku. Przyjęto uderowy charakter pobudzenia układu do drgań. Do budowy stanowiska, o strukturze zgodnej z koncepcją przedstawioną na rys. 2, wykorzystano odcinek sieci półskompensowanej, z jednym przewodem jezdny, pomiędzy dwoma słupami wsporczyimi A. Słup B nie będący elementem konstrukcyjnym sieci jezdnej, znajdujący się na środku odcinka, posłużył do zainstalowania na nim podzespołów układów: pomiarowego oraz pobudzającego drgania. Szkic konstrukcyjny stanowiska pokazany jest na rys. 4a, zaś jego widok w terenie na rys. 4b. Urządzenia do sterowania i rejestracji wyników umieszczono w budynku lokomotywowni. W proponowanym tu rozwiązaniu istotny z eksploatacyjnego punktu widzenia jest fakt, że pomiar odbywa się bez konieczności wprowadzania pojazdu na specjalne stanowisko i wchodzenia personelu na dach pojazdu, a ponadto centrala sterująco-pomiarowa może być umieszczona w klimatyzowanym pomieszczeniu.

3. Pomiary laboratoryjne i terenowe

W badaniach laboratoryjnych z rzeczywistym odbierakiem symulowano niesprawność zawieszenia zwiększając stopniowo tłumienie drgań sprężyn aż po całkowite zablokowanie ruchów ślizgacza. W przypadku zastosowania czujnika żyroskopowego (rys. 5) kryterium oceny stanu zawieszenia ślizgacza może być analiza przebiegu czasowego sygnału, a ściślej – stosunek wartości maksymalnej do minimalnej. Przy sprawnym zawieszeniu ślizgacza (rys. 5a) stosunek ten był we wszystkich zarejestrowanych przypadkach wyraźnie większy od jedności, tzn. $|A_{max}| > |A_{min}|$. Przy zawieszeniu o zwiększonej sile tłumienia drgań, co ma symulować układ częściowo niesprawny, stosunek jest z reguły nieco mniejszy od jedności lub bliski jedności (rys. 5b). W przypadku zawieszenia zablokowanego całkowicie stosunek jest wyraźnie mniejszy od jedności, tzn. $|A_{max}| < |A_{min}|$ (rys. 5c). Ta właściwość sygnału występowała powtarzalnie przy dużej liczbie przeprowadzonych badań. W rozkładzie widmowym sygnału nie uwidoczniły się cechy tak wyraźnie uzależnione od stanu badanego obiektu.



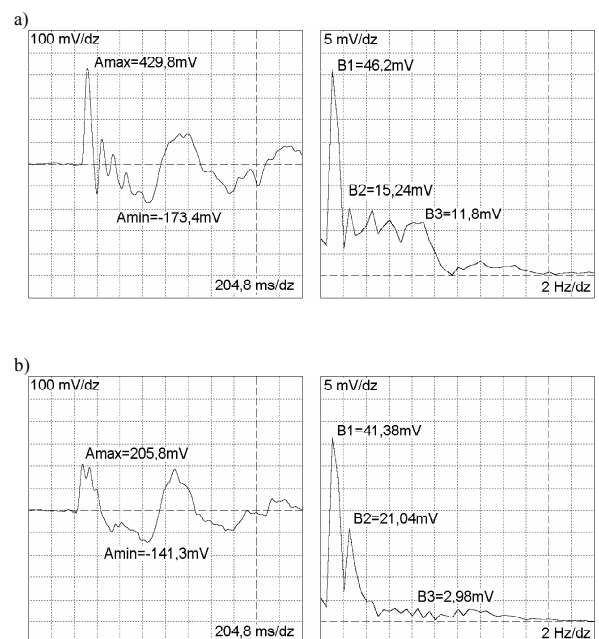
Rys. 5. Przebieg prędkości drgań rzeczywistego ślizgacza i laboratoryjnego modelu sieci, wzbudzonych uderowo, przy: a) poprawnie funkcjonującym zawieszeniu, b) zwiększonych oporach ruchu zawieszenia, c) zablokowanym mechanicznie zawieszeniu; rejestracja przy pomocy czujnika żyroskopowego

Fig. 5. Vertical speed waveform of overhead line's model and real pan slipper by stroke-wise excitation when the slipper's springs are: a) in normal condition, b) softly damped, c) stiff blocked; measurement based on gyroscopic speed sensor

Dla czujnika akcelerometrycznego również uzyskano reprezentatywne wyniki pomiarów, charakteryzujące się jednak większym poziomem zakłóceń wynikających z jego cech własnych.

Konstrukcja stanowiska terenowego, przedstawiona na rys. 4, jest w stosunku do wersji laboratoryjnej znacznie bardziej złożonym układem mechanicznym, ze względu na konieczność zapewnienia izolacji od wysokiego napięcia sieci trakcyjnej (3 kV), a układ pomiarowy jest znacznie silniej narażony na zakłócenia elektromagnetyczne, z uwagi na występowanie ich silnych źródeł

i rozległość przestrzenną stanowiska. Badania przeprowadzono na rzeczywistym odbieraku typu AKP4E lokomotywy EU07. Badano odbierak w pełni sprawny oraz odbierak z zablokowanym zawieszeniem ślizgacza. Ponieważ mierzone sygnały mogą w warunkach rzeczywistych podlegać zakłóceniom o niedeterministycznym charakterze (np. podmuchy wiatru), dla obu przypadków przeprowadzono serie kilku pomiarów. Ponadto sygnały z obu czujników – ze względu na ich podatność na zakłócenia – muszą być poddane wstępnej filtracji cyfrowej w urządzeniach pomiarowych. Czujnik żyroskopowy wykazywał znacznie większą odporność na wpływ zakłóceń niż czujnik akcelerometryczny, stąd wymagany poziom filtracji był w jego przypadku zdecydowanie niższy. Zaobserwowano wyraźne różnice w wynikach przy odbieraku sprawnym i uszkodzonym dla obydwu stosowanych czujników. Przykładowe wyniki pomiarów prędkości drgań dla odbieraka sprawnego i uszkodzonego przy wykorzystaniu żyroskopu pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Przebieg i rozkład widmowy sygnału prędkości drgań ślizgacza i sieci na stanowisku terenowym, wzbudzonych uderowo, przy: a) poprawnie funkcjonującym zawieszeniu, b) zablokowanym mechanicznie zawieszeniu; rejestracja przy pomocy czujnika żyroskopowego

Fig. 6. Vertical speed waveform and its spectrum of real overhead line and pan slipper in the field test stand by stroke-wise excitation, when the slipper's springs are: a) in normal condition, b) stiff blocked; measurement based on gyroscopic speed sensor

W przypadku zastosowania czujnika żyroskopowego podstawę przyjęcia miarodajnego kryterium oceny zawieszenia ślizgacza daje zarówno analiza przebiegu uzyskanego sygnału, jak i jego rozkładu widmowego. Jako kryterium diagnostyczne można tu przyjąć stosunek wartości bezwzględnych dodatniego i ujemnego maksimum sygnału: $|A_{max}|/|A_{min}|$, a także różnicę tych wartości: $A_{max}-A_{min}$. Dla rozkładów widmowych takim kryterium może być stosunek amplitudy $B1$ składowej podstawowej, związanej z częstotliwością drgań własnych sieci (ok. 1 Hz) do amplitudy $B2$ składowej związanej z częstotliwością drgań pantografu (ok. 2,5 Hz), jaka pojawia się zwłaszcza przy zablokowanym ślizgaczu, lub ewentualnie do amplitudy $B3$ składowej drgań układu, związanych z zawieszeniem ślizgacza (ok. 9 Hz), która uwidacznia się tylko przy odbieraku sprawnym. Oparcie kryteriów oceny raczej na stosunku wartości dwóch parametrów, niż na samych ich wartościach, wynika ze spodziewanej silnej zmienności warunków pomiaru na stanowisku terenowym. Należy oczekiwać, że wpływ tych zmian (np. temperatura, oszronienie sieci itp.) na poszczególne składowe przebiegów będzie zblizony. W tablicy 1 zamieszczono podsumowanie wyników z przeprowadzonej serii prób –

w każdej rubryce podano zakres uzyskanych wartości (od minimalnej do maksymalnej); wybrano tu zestaw parametrów diagnostycznych, które mogą być przyjęte jako kryterium oceny stanu zawieszenia ślizgacza. Tendencje zmiany wartości każdego z tych kryteriów w funkcji sztywności zawieszenia ślizgacza są takie same jak w badaniach laboratoryjnych; ich inne zakresy liczbowe wynikają z nieco innej konstrukcji stanowiska terenowego. Uzyskaną powtarzalność wyników dla serii prób przeprowadzonych w identycznych warunkach należy uznać jako bardzo dobrą.

Tab. 1. Porównanie ewentualnych kryteriów oceny zawieszenia ślizgacza opartych na analizie sygnału z czujnika żyroskopowego
Tab. 1. Comparison of possible diagnostic criteria based on analysis of signal from gyroscopic speed sensor

Zawieszenie:	sprawne	usztynwione
$A_{max}-A_{min}$ [mV]	528,1 ÷ 603,2	347,2 ÷ 381,6
$ A_{max} / A_{min} $	2,48 ÷ 2,62	1,40 ÷ 1,61
$B1/B2$	3,03 ÷ 3,58	1,88 ÷ 2,11
$B1/B3$	3,70 ÷ 3,92	12,4 ÷ 16,0
$B2/B3$	1,03 ÷ 1,29	5,85 ÷ 8,00

Również wykorzystując czujnik akcelerometryczny uzyskano obiecujące rezultaty. Przebiegi były wyraźnie uzależnione od stanu technicznego węzła zawieszenia odbieraka.

4. Wnioski

Analiza wyników przeprowadzonych badań laboratoryjnych i terenowych pozwala sformułować następujące wnioski:

- badanie stanu węzła zawieszenia ślizgacza odbieraka prądu poprzez analizę wymuszonych drgań sieci, z którą ten odbierak współpracuje, jest możliwe,
- łatwiejsze w realizacji jest pobudzenie udarowe układu do drgań – pojedynczym impulsem siły o odpowiednio dobranych parametrach; odpowiedź układu na takie wymuszenie jest wyraźnie uzależniona od stanu zawieszenia ślizgacza badanego odbieraka,

- jako podstawową wielkość diagnostyczną można przyjąć przyspieszenie lub prędkość drgającego przewodu, których pomiar można zrealizować przy użyciu akcelerometru lub czujnika żyroskopowego, połączonych układem cięgieł z przewodem jezdnym,
- jako miarodajne kryterium oceny można zaproponować dla przebiegu czasowego dopuszczalny przedział wartości amplitudy pierwszego okresu odpowiedzi układu lub stosunku wartości maksymalnej do minimalnej, zaś dla rozkładu widmowego przedział stosunku wartości amplitud wybranych charakterystycznych składowych sygnału (np. o częstotliwości drgań własnych odbieraka, ślizgacza i sieci).

Przeprowadzone badania w warunkach rzeczywistych – dla każdego z proponowanych tu kryteriów – dały całkowicie wiarygodną ocenę, tzn. w serii kilkunastu prób nie pojawiła się ani jedna, która dawałaby wynik należący do niewłaściwego przedziału wartości. Ze względu na ograniczony zakres tych badań wydaje się jednak, że w ewentualnej realizacji praktycznej należałoby stosować równocześnie kilka spośród zaproponowanych tu kryteriów oceny oraz obydwaj rodzaje czujników – dla zwiększenia wiarygodności wyniku diagnozy.

5. Literatura

- [1] Z. Giętkowski, K. Karwowski, M. Mizan, P. Pazdro: Review of Research and Development on the Technical Diagnostics in the Field of Electric Traction. *Pomiary Automatyka Kontrola* 2003 nr 12.
- [2] K. Karwowski, P. Pazdro: Operational technical diagnostics of current collectors. *ZEV+DET Glas. Ann.* 9/10 Sept. 2001.
- [3] P. Pazdro, M. Mizan: Technical diagnostics of traction current collectors. *Int. Conf. on Ship Propulsion and Railway Traction Systems*. Bologna, Italy, 4-6 October 2005.
- [4] J. Skibicki, M. Wołoszyn: Diagnostyka techniczna węzła zawieszenia ślizgacza odbieraka prądu – analiza i symulacja. 7. Międzynarodowa Konferencja Naukowa MET'2005. Warszawa 29.09 – 01.10.2005 r.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Zapraszamy do PRENUMERATY czasopisma PAK w 2007 roku

**Cena prenumeraty rocznej: 180,00 zł/1 egz.
Cena prenumeraty półrocznej: 90,00 zł/1 egz.**

Prenumeratę i kolportaż prowadzą:

WYDAWNICTWO POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
ul. Świętokrzyska 14A, pok. 530, 00-050 Warszawa,
tel./fax: 022 827 25 40

Redakcja czasopisma POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b,
tel./fax: 032 237 19 45, e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl

