

Otrzymano: 23 marca 2018 / Zaakceptowano: 24 lipca 2018 / Zamieszczono na WWW: 20 grudnia 2018

*monitorowanie, diagnostyka, pomiary średnicy,
kolejowe zestawy kołowe,
kolej, błędy kształtu*

Arkadiusz KOLKA^{1*}

KONCEPCJA STANOWISKA DO IDENTYFIKACJI ŚREDNICY I BŁĘDÓW KSZTAŁTU KÓŁ KOLEJOWYCH POJAZDÓW BĘDĄCYCH W RUCHU

Artykuł powstał w oparciu o wyniki badań prowadzonych w Katedrze Budowy Maszyn w ramach prac badawczo-rozwojowych, projektów celowych i badań własnych autora. Przedstawiono w nim wyniki prac w ramach których opracowano metodykę pomiarów wskazanych cech geometrycznych kół pojazdów szynowych będących w ruchu., przedstawiono koncepcje realizacji pomiarów w rzeczywistym środowisku pomiarowym, wykonano stanowiska doświadczalne oraz przeprowadzono eksperymenty. Wyniki prac mogą być podstawą do budowy i realizacji układów pomiarowych w ciągłej diagnostyce pojazdów szynowych.

1. WPROWADZENIE

Rozwój sieci autostrad, transportu lotniczego z systemem satelitarnej kontroli lotu wydawał się być zapowiedzą końca rozwoju transportu kolejowego, a wielu decydentów traktowało kolej, jako zabytek techniki. Jednak mimo tego ponad trzydzieści lat temu rozpoczął się nowy okres w rozwoju transportu kolejowego w wielu krajach [1]. Wprowadzono przewozy kontenerowe, zwiększono dopuszczalne naciski na oś wagonów towarowych oraz zwiększono prędkości przewozów pasażerskich. Wszystkie te zmiany, a dodatkowo względy ekologiczne oraz względy bezpieczeństwa były przyczyną renesansu transportu kolejowego, jako integralnej części zsynchronizowanego systemu transportowego i nic nie wskazuje na to, aby trend ten miał się zmienić.

Należy sobie jednak zdawać sprawę, iż wzrost prędkości jazdy pojazdów powoduje istotny wzrost obciążeń zarówno elementów pojazdu (w tym zestawów kołowych) jak i toru. Nawet niewielki wzrost prędkości ze 100 do 120 km/h powoduje kilkukrotny przyrost obciążeń, a prędkości osiąmane przez współczesne pojazdy szynowe często przekraczają 200 km/h. W wyniku kontaktu koło-szyna występuje cały szereg niekorzystnych zjawisk, które mają negatywny wpływ zarówno na koło jak i na szynę. Nierównomierny rozkład naprężeń własnych na obwodzie koła jest przyczyną utwardzenia i nierównomiernego zużycia bieżni, co może być przyczyną poligonizacji kół, a następnie zmęczeniowego zniszczenia ich tarcz lub obręczy. Powstające w trakcie eksploatacji (np. podczas przejazdu przez krzyżownicę lub przez niegładkie połączenie szyn) nierówności

¹ Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Budowy Maszyn, Gliwice,

* E-mail: Arkadiusz.Kolka@polsl.pl

powierzchni koła, płaskie miejsca lub nalepy są przyczyną uderzeń kół o szynę, co powoduje niekorzystne oddziaływania dynamiczne zarówno na szynę jak i na samo koło.

Mechanizmy zużycia kół pojazdów szynowych oraz modelowanie powstawania tego zużycia, a także niekorzystna interakcja występująca pomiędzy zużytym kołem pojazdu szynowego a szyną, są przedmiotem licznych publikacji i opracowań naukowych. Już z samej ich liczby można wywnioskować jak poważnym problemem jest niekorzystny wpływ zużycia kół na inne elementy zarówno toru, jak i samego pojazdu szynowego. Stan tych wszystkich elementów ma bezpośredni związek z bezpieczeństwem ruchu szynowego.

Zatem systematyczna kontrola geometrii kół kolejowych jest niezbędnym elementem diagnostyki pojazdów trakcyjnych, zapewniającym wczesne wykrywanie nadmiernego zużycia kół, a pośrednio zapobiegając zużyciu toru.

Błędy kołowości, różnice pomiędzy kołami zestawu kołowego są wielkościami kryterialnymi, decydującymi o zakwalifikowaniu ich do procesu regeneracji. Regeneracja zdeformowanych zestawów kołowych odbywa się na specjalnych obrabiarkach. W wielu przypadkach, taki proces wymaga wymontowania zestawu kołowego z pojazdu, co wyłącza go z użytku na długi czas, a to nieodłącznie wiąże się ze wzrostem kosztów eksploatacji. Zatem podjęcie decyzji o regeneracji we właściwym czasie wydaje się być niezwykle istotne. Jeżeli decyzja zostanie podjęta zbyt wcześnie to koszty eksploatacji niepotrzebnie wzrosną, a podjęcie decyzji zbyt późno może prowadzić do spowodowania niebezpieczeństwa wystąpienia katastrofy w ruchu kolejowym. Ze względu na zmienność procesu zużycia, najlepszym kryterium podjęcia decyzji o regeneracji jest pomiar umożliwiający określenie aktualnego stanu kół zestawu kolejowego [2].

Prace prowadzone w Katedrze Budowy Maszyn, miały na celu opracowanie założeń nowej skutecznej metody pomiarowej, umożliwiającej ocenę średnicy kół oraz identyfikację błędów kształtu [3, 4]. W ramach prac wstępnych opracowano metodykę pomiarów z użyciem wieloczuJNIKOWEGO toru pomiarowego zabudowanego w szynie, po której przejeżdża pojazd. W założeniu pomiary miały być prowadzone w ruchu, bez konieczności zatrzymywania pojazdu szynowego, co powinno umożliwić skrócenie czasu pomiaru oraz zwiększyć częstotliwość prowadzonych pomiarów, bez niepotrzebnego wydłużania jego przestojów. Przeprowadzone prace wstępne potwierdziły skuteczność proponowanej metody na wykorzystanym stanowisku pomiarowym. W dalszym toku prac skupiono się na skonstruowaniu, przebadaniu kilku rozwiązań układów pomiarowych o potencjale pozwalającym na dalszy ich rozwój i wykorzystanie w warunkach rzeczywistej eksploatacji pojazdów szynowych. Zaproponowano układy pomiarowe oparte o czujniki indukcyjne, enkodery oraz laserowe głowice triangulacyjne. Wyniki prac powinny pozwolić na określenie dokładności pomiarów każdej z metod, ekonomiczne aspekty ich zastosowania, pozwalając na podjęcie decyzji o wyborze najlepszego z proponowanych rozwiązań.

2. OBIEKT BADAŃ

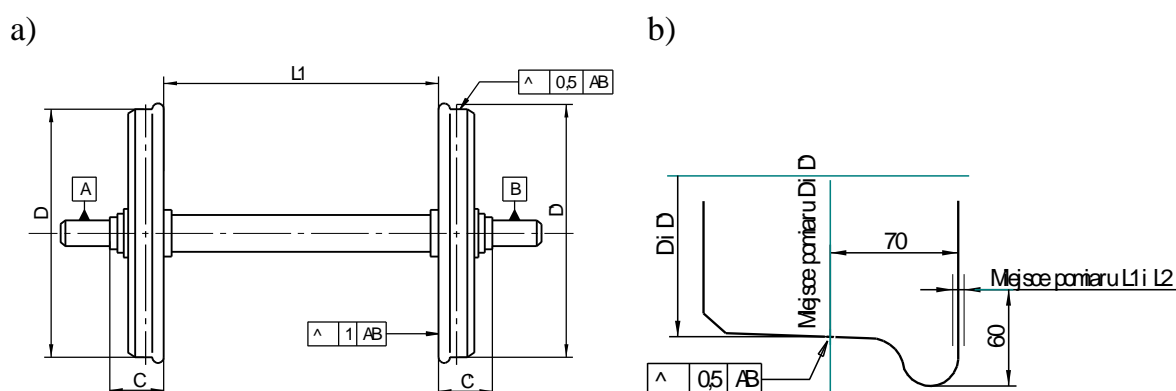
Obecnie stosowane są koła obręczowane o średnicach tocznych 850, 920, 940, 960, 1000, 1040, 1100, 1250 mm i monoblokowe o średnicach 920 i 1000 mm. Wymagania stawiane zestawom kołowym określa norma PN-K-91045 „Tabor kolejowy. Zestawy

kołowe. Wymagania i Badania”. Poniżej przedstawiono rysunki wybranych zestawów kołowych oraz wymagania dotyczące dopuszczalnych odchyłek wymiarowych dla tych zestawów. Różnica średnic kół na okręgu tocznym koła kolejowego nie powinna przekraczać 0,5 mm, a za zgodą zamawiającego może wynosić maksymalnie 1mm.

Owalność okręgu tocznego i jego mimośrodowość względem osi obrotu zestawu kołowego nie powinna przekraczać 0,5 mm.

Dopuszczalne odchyłki zestawów kołowych przedstawiono na rys. 1.

Odchyłki zarysu zewnętrznego obręczy lub wieńca bezobrzęcowego wg PN-K-91056 nie powinny przekraczać: na powierzchni tocznej – 0,5 mm, na powierzchni obrzeża – 1,0 mm, na grubości obrzeża – 0,5 mm



Rys. 1. Podstawowe parametry zestawów kołowych: a) Zestaw kołowy z czopami zewnętrznymi;

b) Miejsca pomiaru na profilu poprzecznym koła

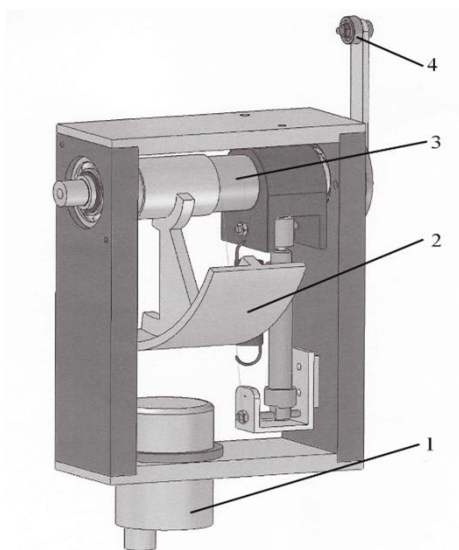
Fig. 1. General parameters of axle set: a) Axle set with outside mounting points, b) Placement of measuring points

3. STANOWISKO POMIAROWE

Przy budowie stanowiska pomiarowego zastosowano dwa podejścia. Pierwsze z nich zakładało wykorzystanie pomiarowego układu mechanicznego wyposażonego w dwa rodzaje czujników [5, 6]. Układ pomiarowy został przedstawiony na rys. 2. Dźwignia wychylna, wyposażona jest w rolkę (4), która ma współpracować z przetaczającym się kołem. Do osi, na której zamocowana jest dźwignia, przymocowana jest krzywka (2), współpracująca z bezdotykowym czujnikiem zbliżeniowym oraz jednocześnie z tą samą osią połączony jest wał enkodera.

W czasie, gdy pojazd szynowy przejeżdża przez stanowisko pomiarowe, dźwignia jest wychylana poprzez naciskające na nią koło pojazdu co powoduje obrót osi z krzywką i wałem enkodera. Enkoder odpowiada za odczyt zmiany położenia kąтового osi, a czujnik indukcyjny dokonuje odczytu odległości do powierzchni krzywki, co pozwala na pośrednie wyznaczenie zmiany kątowej osi. W efekcie końcowym, rejestrowane sygnały pozwalają na ocenę przebiegu zmiany położenia kątowej dźwigni w czasie przejazdu koła. Drugie podejście polegało na użyciu czujników pomiarowych w postaci miniaturowych triangulacyjnych głowic laserowych BOD 26K produkcji Balluff (rys. 3). Głowice te miały

w założeniu realizować pierwotne rozwiązanie zaproponowane w badaniach rozpoznawczych, w których używano dotykowych czujników pomiarowych. Czujniki te w porównaniu z modułami pomiarowymi, były bardziej kompaktowe i pozbawione elementów mechanicznych, co powinno przekładać się na łatwość zabudowy oraz większą niezawodność podczas eksploatacji stanowiska. Badania prowadzono stosując układ pomiarowy jedno i wieloczujnikowy zbudowany w formie toru (rys. 4), po którym poruszał się model zestawu kołowego napędzany z wykorzystaniem układu serwonapędowego (rys. 5).



Rys. 2. Model modułu pomiarowego: 1 – bezdotykowy czujnik indukcyjny, 2 – krzywka, 3 – Wał, 4 – dźwignia z rolką
Fig. 2. Model of diameter measuring unit: 1 –non-contact inductive sensor, 2 – cam, 3 – shaft, 4 – lever with roller



Rys. 3. Głowica laserowa firmy Balluff
Fig. 3. The Balluff distance sensor BOD 26K

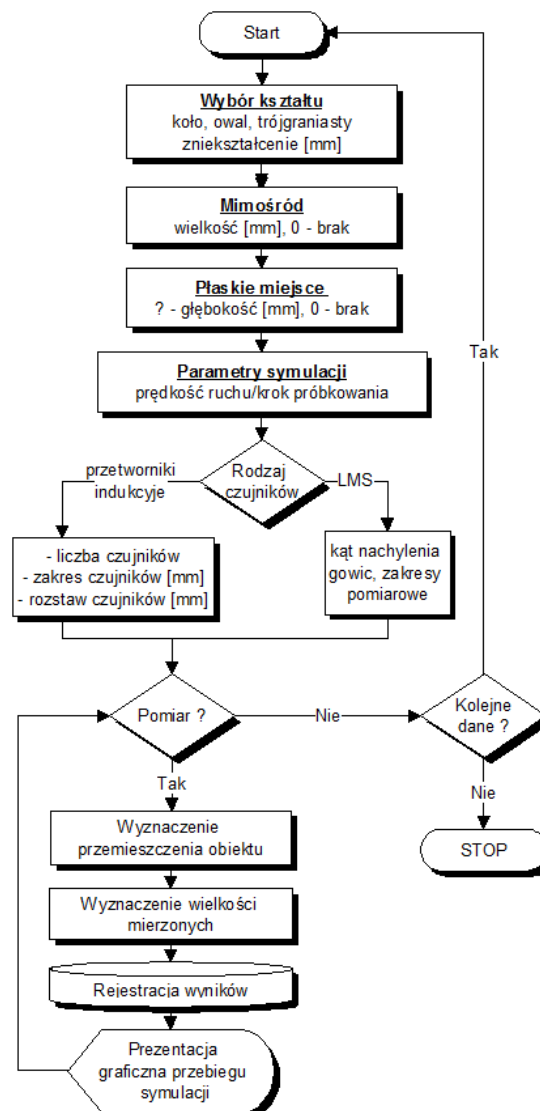


Rys. 4. Model toru z zabudowanymi układami pomiarowymi
Fig. 4. Rail of measure stand with assembled measuring units



Rys. 5. Układ sterowania i układ napędowy stanowiska pomiarowego
Fig. 5. Computer Numerical Control and drive unit

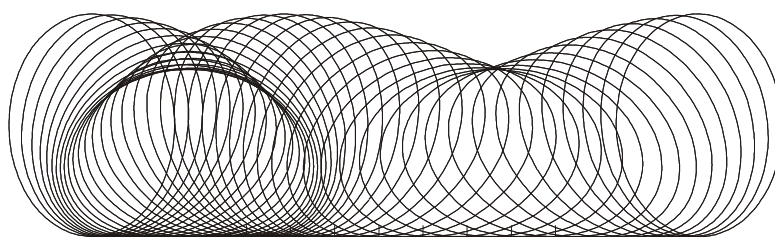
Zaproponowano dwie metody wyznaczania wielkości średnicowych. Jedna z nich zakładała przyjęcie założenie, iż przebiegi sygnałów wzorcowych są znane. Identyfikacja średnicy koła polegała na porównaniu sygnałów rejestrowanych w czasie jego przejazdu z przebiegami wzorcowymi generowanymi na podstawie danych wejściowych przez system sterujący układem pomiarowym.



Rys. 6. Algorytm programu do wyznaczania przebiegów teoretycznych
Fig. 6. Theoretical signal generator algorithm

W przypadku tej metody bardzo istotne było zachowanie stałej prędkości osi koła w trakcie przejazdu przez wszystkie moduły pomiarowe. Z tego względu stanowisko zostało wyposażone w precyzyjny układ napędowy, składający się ze sterowania numerycznego oraz serwonapędu. Dzięki takiemu rozwiązaniu, możliwe było nastawianie prędkości przejazdu zestawu kołowego w szerokim zakresie. Powiązanie układu sterowania prędkością oraz układu rejestrującego sygnały pomiarowe umożliwiło ich wzajemną synchronizację.

W celu przeprowadzenia prac badawczych opracowano oprogramowanie autorskie, którego celem było pozyskiwanie różnorodnych teoretycznych przebiegów pomiarowych [3, 7]. Algorytm tego programu przedstawiono na rys. 6. Program pozwalał na konfigurację układu pomiarowego poprzez zmianę liczby modułów pomiarowych. Uwzględnione modele kół tocznych mogły być opisane przez dowolnie zadaną średnicę. Program pozwalał na wprowadzanie różnych kształtów podstawowych w tym, okrąg (bez deformacji), owal, koło trójgraniaste. Dodatkowo możliwe było uwzględnienie wady w postaci mimośrodowego zamocowania koła oraz wprowadzenie wad lokalnych w postaci płaskiego miejsca. Program umożliwiał określenie parametrów stanowiska pomiarowego z uwzględnieniem, rodzaju zastosowanego układu pomiarowego, liczby modułów pomiarowych, nastaw wstępnych dla poszczególnych modułów, własności zastosowanych urządzeń pomiarowych (zakresy pomiarowe, czułości itp.) Program symulacyjny umożliwiał wygenerowanie sygnałów pomiarowych przy określonych parametrach próbkowania i zadanej prędkości przejazdu zestawu kołowego. Zarówno sama symulacja przejazdu, jak również sygnały z poszczególnych czujników pomiarowych mogły być prezentowane graficznie oraz zostać zapisane do pliku. Na rys. 7 zaprezentowana została symulacja przejazdu koła zawierająca błąd kształtu w postaci deformacji owalnej, dodatkowo w połączeniu z mimośrodowością osi obrotu.

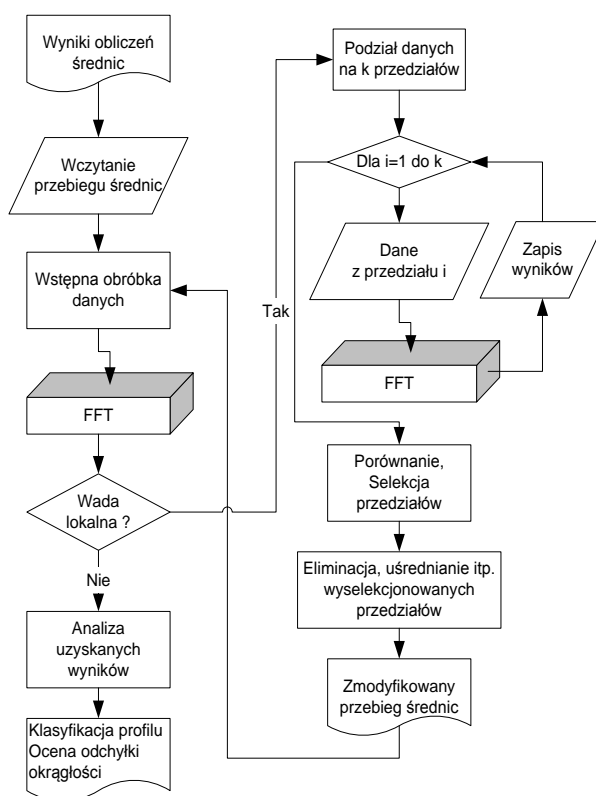


Rys. 7. Symulacja ruchu koła o profilu mimośrodowo-owalnym
Fig. 7. Visualisation of movement oval wheel with eccentricity error

4. PRZETWARZANIE SYGNAŁÓW POMIAROWYCH

Efektem przeprowadzonych prac było opracowanie metodyki przetwarzania sygnałów pomiarowych [4], które pozwalają na uzyskanie, jako wyniku działań diagnostycznych, informacji o rzeczywistej średnicy koła pojazdu będącego w ruchu, oraz identyfikacji błędów kształtu i ich wielkości. Informacje te powinny zapewnić możliwość oceny wielkości występujących wad. W ramach badań oceniano zarówno funkcjonalność pomiarową pojedynczych modułów wyposażonych w różne czujniki pomiarowe (indukcyjne, laserowe, enkodery) jak również wpływ zwielokrotniania zastosowanych układów na możliwości poprawy dokładności pomiarów oraz wrażliwość na występowanie błędów kształtu. Zaproponowano autorską metodykę przetwarzania sygnałów pomiarowych z uwzględnieniem 3 metod pomiaru, nazwanych w zależności od ilości uwzględnianych jednocześnie sygnałów z modułów pomiarowych 1DS, 2DS, 3DS. Każda z metod ma swoje zalety i wady. Metoda 1DS, zakłada użycie do wyznaczenia poszukiwanych wielkości sygnału z pojedynczego modułu pomiarowego. Metoda ta jest najmniej dokładna i wyznaczenie

średnicy koła jest najmniej precyzyjne. Jednocześnie zastosowanie tej metody, pozwala na objęcie pomiarami całego obwodu koła, przy relatywnie małej liczbie modułów pomiarowych. Objęcie całego obwodu koła może być istotne, jeżeli będziemy chcieli identyfikować wady lokalne (np. płaskie miejsca).



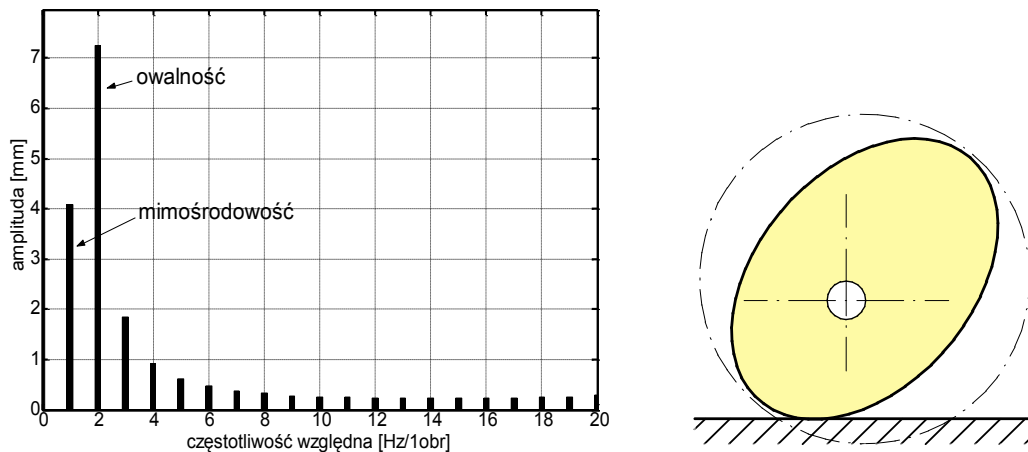
Rys. 8. Algorytm przetwarzania sygnałów w z wykorzystaniem FFT

Fig. 8. Signal processing including FFT analysis

Metodą najdokładniejszą jest metoda 3DS, wykorzystująca sygnały z trzech modułów pomiarowych jednocześnie, co zapewnia możliwość uzyskiwania dokładności pomiaru wystarczających do wyznaczenia wielkości średnicy. Metoda ta powoduje jednak konieczność zabudowy modułów pomiarowych w niewielkim rozstawie, a to z kolei powoduje, że zastosowanie dużej liczby modułów koniecznych do objęcia całego obwodu koła pomiarami może być nieopłacalne. Rozważano także metodę pośrednią 2DS, w której w kontakcie z kołem mierzonym pozostają jednocześnie dwa moduły pomiarowe. Metoda ta łączy w sobie zalety i wady wcześniej wspomnianych metod. Przy zastosowanych rozwiązaniach technicznych, uzyskiwano tą metodą zadowalające wyniki pomiaru średnicy przy zwielokrotnieniu pomiaru na obwodzie koła. Należy pamiętać, że kryterium podjęcia decyzji o regeneracji zestawu kołowego jest nie tyle wielkość średnicy zmierzonej, co różnica zmierzonych średnic kół zabudowanych na jednej osi (zestaw kołowy).

Oddzielnym problemem jest identyfikacja błędów kształtu. Analiza wpływu różnych profili kół na wyniki obliczeń średnic pozwala na stwierdzenie [6, 7], iż każdy z rozpatrywanych profili, niezależnie od wybranej metody rejestracji i wyznaczania

średnicy (1DS, 2DS, 3DS), cechuje charakterystyczny przebieg wykresu obliczonych średnic. Zdecydowano się opracować algorytm (rys. 8) przetwarzania sygnału w dziedzinie częstotliwości. Wydaje się być możliwym zidentyfikowanie profilu rzeczywistego koła na podstawie wykresów średnic. Algorytm identyfikacji odchyłek okrągłości powinien pełnić rolę klasyfikatora, który samodzielnie podejmowałby decyzję, co do dalszych losów badanego zestawu kołowego. Ponieważ zgodnie z założeniami opracowanych metod pomiarowych, wyznaczana jest zmiana promienia/średnicy w trakcie jednego obrotu koła, zdecydowano się wprowadzić pojęcie częstotliwości względnej widma odniesionej do prędkości obrotowej koła i wyrażonej w Hz/1obr. Będzie ona odpowiadała liczbie fal na obrót. Analizując wykresy obliczonych średnic, uzyskane dla kół o profilach owalnym i trójgraniastym oraz mimośrodowym, zauważono, iż charakteryzują się one określoną liczbą fal przypadających na jeden obrót koła. Wykresy średnic dla trójgraniastości i płaskich miejsc nie mogą być tak jednoznacznie ocenione, ponieważ pojawiają się tam nagłe zmiany wartości obliczanych średnic.



Rys. 9. Przykładowe widmo amplitudowe sporządzone dla koła o profilu mieszanym, mimośrodkowo-owalnym
Fig. 9. Frequency spectrum for measurement of oval and eccentricity wheel

Podobnie niejednoznaczne będą wykresy otrzymane dla kół o profilach mieszanych, których występowanie w rzeczywistości będzie najbardziej prawdopodobne. Przy wykorzystaniu FFT w zaproponowanym algorytmie, uzyskano narzędzie, które pozwala na jednoznaczną ocenę występowania błędów kształtu nawet dla kół, w których wiele wad występuje jednocześnie. Na rys. 9 przedstawiono wykres widma częstotliwości po przetworzeniu przebiegu rejestrowanych średnic dla koła, które ma kształt owalny i jednocześnie porusza się mimośrodkowo.

5. PODSUMOWANIE

Opracowano koncepcję i wykonano doświadczalne stanowisko do pomiaru średnic i identyfikacji błędów kształtu, z wykorzystaniem autorskich rozwiązań pomiarowych,

opracowano algorytmy i programy komputerowe do symulacji procesu pomiarowego i przetwarzania sygnałów ze stanowiska doświadczalnego [8, 9]. Zaproponowano analizę sygnałów zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości. Można stwierdzić, iż zastosowanie przetwarzania wykresów średnic w dziedzinie częstotliwości pozwala na: jednoznaczną identyfikację podstawowych profili kół, niezależnie od ich początkowego położenia kąтового na stanowisku pomiarowym, możliwość bezpośredniej oceny wielkości odchyłki okrągłości na podstawie amplitud dominujących składowych, identyfikację wad lokalnych i ich odróżnienie od innych postaci profili kół, dla których przebieg czasowy jest podobny, możliwość zlokalizowania fragmentów przebiegów czasowych, zawierających informacje o wadach lokalnych, łatwość zautomatyzowania procesu identyfikacji kształtu, bez konieczności budowania klasyfikatora np. w oparciu o metody sztucznej inteligencji. Zastosowane rozwiązania układów pomiarowych zostały objęte ochroną patentową.

LITERATURA

- [1] KOLKA A., 2004, *Opracowanie metody wyznaczania parametrów średnicowych kół pojazdów szynowych będących w ruchu*. Projekt Badawczy KBN, Gliwice.
- [2] KOSMOL J., SOKOŁOWSKI A., 1995, *Układy nadzorujące obróbkę zestawów kolejowych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Transport, 27, Gliwice.
- [3] KOLKA A., 2002, *Metoda wyznaczania wielkości średnicowych kół pojazdów szynowych w ruchu*, Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice.
- [4] KOLKA A., KOSMOL J., 2001, *Railway Wheel Set Monitoring and Machining System*, Proceedings of the International Conference – Computer Integrated Manufacturing, 1, WNT, Warszawa,
- [5] KOLKA A., 2000, *Stanowisko do badań wielkości geometrycznych obiektów ruchomych*, Prace Naukowe KBM, 1, Politechnika Śląska, Gliwice.
- [6] KOLKA A., KOSMOL J., 2000, *Nowa metoda pomiarów zestawów kołowych będących w ruchu*, Proceedings the Scientific Conference – Materials, Mechanical, Manufacturing Engineering, Silesian University of Technology, Gliwice.
- [7] KOLKA A., KOSMOL J., 2001, *Form identification of wheeled objects while movements*, Annals of DAAAM for 2001 & Proceedings of the 12th International DAAAM Symposium, Vienna.
- [8] KOSMOL J., KOLKA A., 2005, *Simulation research of a method of identification of diameter of railway vehicle being in motion*, 7th Int. Conference on Computer Integrated Manufacturing – CIM'2005, Gliwice – Wisła.
- [9] KOLKA A., KOSMOL J., 2005, *Identification of Diameter of Axle Set Using Rotary Encoders*, 9th International Conference TMT 2005, Antalya, Turkey.

DIAMETER IDENTIFICATION OF AXLE SETS OF TRAIN IN MOTION

In the paper an idea of a method of identification diameters and circular errors of wheel axle which enables to make decision about regeneration of the wheel sets, measuring stand, and results of experimental works are presented. The ideal solution for an identification of a wheel diameter is a stand in the form of a rail section. Rail vehicles while passing the stand are measured. It means that circular errors of all wheels of a vehicle are identified. Having results of such identification we are able to make decision about regeneration of a wheel. The decision would be made automatically, without operators.

Keywords: *monitoring, diagnostics, measurement, wheel sets, axle sets, railway, circular errors*