



Instytut Pojazdów
Szynowych

POJAZDY SZYNOWE 2/2014

OCENA STANU WYBRANYCH ODCINKÓW TORU TESTOWEGO Z WYKORZYSTANIEM WSKAŹNIKA JAKOŚCI TORU

Mariusz Kostrzewski, dr inż.

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Podstaw Budowy Urządzeń Transportowych

e-mail: markos@wt.pw.edu.pl

Robert Konowrocki, dr inż.

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

e-mail: rkonow@ippt.pan.pl

Słowa kluczowe: oddziaływanie dynamiczne pojazd-tor, wskaźnik jakości toru, stan toru

Streszczenie

Artykuł dotyczy zagadnień monitorowania oddziaływań układu pojazd-tor w czasie eksploatacji. Oddziaływania te pochodzą od dynamiki pojazdu jak również od kinematycznych wymuszeń stanowiących efekt niedoskonałości toru. Praca zawiera opis badań eksperymentalnych na rzeczywistym obiekcie kolejowych, na podstawie których rozpatrywany jest wskaźnik określający jakość toru. W artykule przybliżono także monitorowanie z funkcją diagnozowania układu pojazd szynowy – tor. Zaprezentowano prototyp systemu monitorowania układu pojazd szynowy – tor. Zagadnienia rozpatrywane w artykule mają na celu rozpoznanie miejsc występowania zaburzeń na szlaku kolejowym oraz wskazania rodzaju tejsze niedoskonałości infrastruktury. Wykorzystanie wskaźnika jakości toru powinno prowadzić do określenia stanu toru, tj. globalnej oceny toru oraz wybranych jego parametrów. W artykule ograniczono się do omówienia wyników badań na doświadczalnym torze badawczym. W treści artykułu podano wstępne propozycje klasyfikacji stanu toru oparte na jakości oddziaływania pojazdu szynowego z torem oraz zaproponowano dalsze kierunki badań dotyczących tego zagadnienia.

1 WPROWADZENIE

Prototyp Systemu monitorowania stanu elementów układu pojazd szynowy – tor został opracowany w ramach projektu MONIT – „Monitorowanie Stanu Technicznego Konstrukcji i Ocena jej Żywotności”. Był to projekt badawczy realizowany w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (PO IG) Poddziałanie 1.1.2 Strategiczne programy badań naukowych i prac rozwojowych, w latach 2009-2013. Wstępne eksperymenty na prototypowym systemie miały miejsce na torze testowym w Żmigrodzie. Niniejszy artykuł traktuje nt. tych badań w aspekcie analizy stanu toru. Pomijana zostanie tu szersza analiza stanu pojazdu. Niemniej jednak z uwagi na założe-



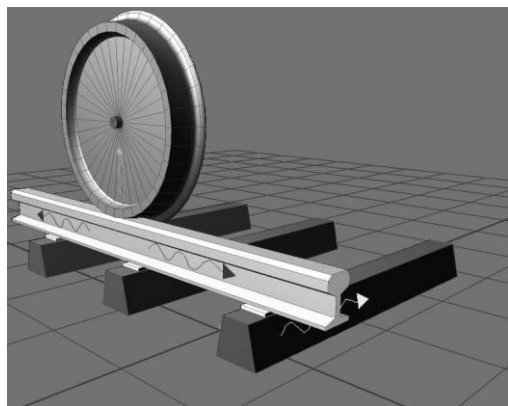
Instytut Pojazdów
Szynowych

POJAZDY SZYNOWE 2/2014

nia projektu nie sposób jest „odżegnać” pozostałe z parametrów branych pod uwagę na okazję monitorowania i diagnozowania układu pojazd szynowy – tor. Wniosek ten nawiązuje do faktu, że system służy jednocześnie analizie obydwu elementów układu pojazd szynowy – tor. Omówienia różnych aspektów związanych z badaniami symulacyjnymi, konstruowaniem i implementacją prototypu systemu na obiekcie rzeczywistym podejmowano w kolejno wymienionych pracach. Z punktu widzenia stanu pojazdu wyróżnić można prace, w których przedstawiono możliwość oceny stanu zawieszenia pojazdów szynowych za pomocą miar statystycznych sygnałów wibroakustycznych. Należy tu wymienić m.in. prace: Chudzikiewicz *et al.* (2009), Chudzikiewicz i Sowiński (2011), Chudzikiewicz *et al.* (2012), Chudzikiewicz i Kostrzewski (2013). Na szczególne wyróżnienie zasługuje grupa prac dotyczących doboru wskaźników diagnostycznych, w tym m.in.: Chudzikiewicz i Sowiński (2010), Melnik i Kostrzewski (2012), Chudzikiewicz i Kostrzewski (2013), Melnik i Chudzikiewicz (2013), Melnik i Sowiński (2013). Z kolei z punktu widzenia stanu toru, z uwagi na zasadniczą treść artykułu związaną z tymże, literatura została poddana omówieniu w kolejnym rozdziale niniejszego artykułu.



Rys. 1 – Faliste zużycie szyn



Rys. 2 – Dynamiczne oddziaływanie zestawu kołowego z torem

Nawierzchnia kolejowa jest ważnym elementem drogi kolejowej, a w świetle podwyższania dopuszczalnych prędkości pojazdów szynowych i zwiększania nacisków na tor wymagane są jej coraz większe: wytrzymałość i bezpieczeństwo. Torowisko jako klasyczna konstrukcja nawierzchni, pracuje w zakresie elastoplastycznym, kumuluje odkształcenia trwałe podsypki, co prowadzi do zróżnicowania cech sprężystych i tłumienia na długości toru w trakcie eksploatacji. Zjawisko korugacji toków szynowych objawia się pewną falistością powierzchni tocznych szyn (rys. 1). Na odcinkach prostych szyn przyjmuje falisty kształt o długości fali 3-10 cm, a na łuku toru objawia się jako faliste zużycie wewnętrznego toku nazwane falistym poślizgiem, o większej



Instytut Pojazdów
Szynowych

POJAZDY SZYNOWE 2/2014

długości fali, tj. 10-20 cm. Stan powierzchni tocznych szyn oraz systemu przytwierdzenia ma również znaczący wpływ na dynamiczne oddziaływania pojazdu szynowego z torem. Podkreślić przy tym należy, że przyczółki mostów i wiaduktów mają intensywny wpływ na rozpatrywane zagadnienia. W miarę upływu czasu ich eksploatacji jakość podsypki ulega degradacji, zmieniając swoje własności sprężyste i tłumiące, jak wskazuje Kukulski (2012), Kukulski (2014).

Ze względu na powyższe powstała idea monitorowania jakości toru z pozycji pojazdu. Idea ta bazuje na pomiarze drgań na obudowach łożysk zestawów kołowych będących efektem oddziaływania koła z torem (rys. 2). Odpowiednie przetworzenie zmierzzonego sygnału pozwala z pewnym przybliżeniem określić stan torowiska i wstępnie określić lokalizacje oraz wielkości usterek na torze. Pod pojęciem wielkości usterki kryją się informacje czy dany tor, na którym istnieje taka usterka, nadaje się jeszcze do eksploatacji, czy należy poddać go naprawie. Monitorowanie będzie służyć również prognozowaniu dalszej ewolucji danych usterek oraz wynikających z tego zagrożeń. System monitorowania jakości toru zamontowany na pojeździe, przy równoległym zbieraniu danych dotyczących prędkości jazdy pociągu, ułatwi określenie przyczyn powstawania określonych usterek toru i pozwoli wyznaczyć wytyczne minimalizujące ich powstawanie. Opisywany system powinien zapewniać realizację oceny stanu toru dotyczącą różnej geometrii jego elementów na odcinku prostym, łuku, w czasie przejazdu przez rozjazdy, przepusty oraz mosty. Powinien umożliwić rozpoznanie usterek w postaci pęknięcia szyn, pęknięcia podkładu, usterki węzła przytwierdzenia lub wadliwego podbicia torowiska. Idealnie byłoby, aby identyfikowanie przez system wady toków szynowych były związane z ich zużyciem, takim jak: wadliwy zarys główki szyny, zużycie typu fale poślizgowe, wytarcie spowodowane obracającym się kołem w trakcie ruszania (wybuksowanie) oraz podczas gwałtownych hamowań.

2 PRZEGLĄD LITERATURY

Z punktu widzenia stanu toru, prace badawcze skupiające się w głównej mierze na opracowaniu i wykorzystywaniu wskaźnika jakości toru przedstawiono m.in. w artykułach: Bogacz *et al.* (2009a), Bogacz *et al.* (2009b), Bogacz *et al.* (2011a), Bogacz *et al.* (2012c), Konop i Konowrocki (2014). We wspomnianych efektach prac badawczych dokonano i omówiono wybrane analizy oceny jakości toru na podstawie pomiarów. W okresie prowadzonych badań projektowych nie jest to jedyne rozwiązane dotyczące badania stanu toru w zakresie rozpoznanego stanu techniki.

Monitorowanie stanu toru, jego nierówności, poprzecznej destabilizacji to obecnie poruszane w literaturze zagadnienia. Zarówno w literaturze jak i pośród praktycz-



Instytut Pojazdów
Szynowych

POJAZDY SZYNOWE 2/2014

nych rozwiązań technicznych wyróżnić można stacjonarne i niestacjonarne urządzenia i ich złożone układy służące badaniu i dokonywaniu pomiarów stanu toru.

Pośród stosowanych urządzeń stacjonarnych przytoczyć można, takie układy diagnostyczne jak *Slope Indicator Track Monitoring System* (2013a, 2013b), *Sen-Track™ Track Monitoring System* (2014), *RST Instruments Track Monitoring System* (2014). Charakteryzują je pewne ograniczenia funkcjonalne. Na przykład system *Slope Indicator Track Monitoring System* (2013a, 2013b) monitoruje tor jedynie pod względem jego osiadania oraz pochylenia. Osiadanie toru kolejowego jest monitorowane przez czujniki, które są zamontowane bezpośrednio na podkładkach kolejowych. Skręcanie toru jest monitorowane przez czujniki wchrowatości toru zamontowane na podkładkach kolejowych wzdłuż toru. W przypadku podbudowy betonowej torowiska (tor bezpodkładowy) czujniki są zakotwiczone na płytach tworzących podbudowę. Czujniki podłączone są do automatycznego układu zbierania danych. Dane te są transmitowane do centrum danych, gdzie podlegają analizowaniu i w przypadku przekroczenia dopuszczalnych wartości generowane są alarmy ostrzegające o niekorzystnym stanie monitorowanego obiektu. Taki system jest instalowany na torach zlokalizowanych w pobliżu prowadzonych prac budowlanych, takich jak tunelowanie lub wykopy. System tego typu jest również instalowany na torach, które przechodzą przez obszary zagrożone osuwaniem się ziemi oraz podmywaniem podtorza. Zatem system ten niekoniecznie służy podobnym celom jak omawiane w niniejszym artykule.

Natomiast spośród urządzeń niestacjonarnych wyróżnić można: *BRSSOS Track Monitoring* (2014) czy *T&T Sistemi Railway Track Quality System* (2009). System niestacjonarny do określenia jakości toru kolejowego pod nazwą *Railway Track Quality System (RTQS)* jest urządzeniem przeznaczonym do monitorowania toru w celu obsługi i konserwacji tras kolejowych. Struktura tego systemu składa się z 2 podsystemów. Pierwszy to laserowe urządzenia pomiarowe określające kształty linii kolejowych, drugi to inercyjna jednostka pomiarowa (*IMU*), zbudowana z czujników przyspieszenia drgań oraz z żyroskopów. Urządzenie to pozwala określić własności toru i odnieść je do wielkości normatywnych. *RTQS* umożliwia pomiar geometrii szyn, układu współrzędnych poszczególnych toków toru. Jego maksymalna rozdzielczość pomiarowa to 0,5 mm długości toru przy prędkości jazdy 220 km/h. Rejestruje on także progresywny kilometraż mierzonego toru, różnice między rozstawem szyn toru a rozstawem kół zestawu kołowego, różnice promieni tocznych koła lewego i prawego, różnice kąta nabiegania koła lewego i prawego oraz geometryczną linię trendu torowiska.

System monitorowania toru częściowo związany z rozpatrywaną tematyką to np. system powstały w Turcji, system o nazwie *Railway Asset Management System*, który bazuje na bazie danych *GIS* (Guler *et al.*, 2004). Wprowadzono do tego systemu całą



Instytut Pojazdów
Szynowych

POJAZDY SZYNOWE 2/2014

turecką sieć kolejową i podzielono na segmenty według charakterystyki poszczególnych odcinków toru.

Podejście wg Glösmann i Kreuzer (2006) w zamyśle Autorów służy ocenie jakości torów kolejowych w oparciu o dynamikę koła wobec szyny w przypadku pociągów metra.

Bez wątplenia zauważa się podejmowanie prób w zakresie opracowania systemów monitorowania układu pojazd szynowy – tor przez innych Autorów. Przy czym autorzy pracy nie odnoszą się w sposób porównawczy wobec tych badań, z uwagi na nieprzewodzenie przez innych badań o charakterze poruszanych w niniejszym artykule. Na ogół ww. systemy, urządzenia i sfery badań odbywają się w formie wyabstrahowanej od bieżącej eksploatacji infrastruktury kolejowej przez suprastrukturę. Oznacza to, że systemy nie są instalowane bezpośrednio na pojazdach szynowych poddawanych regularnej eksploatacji, a wymagają niezależnego przemieszczania się po kolejowej infrastrukturze liniowej (instalacja w postaci urządzenia stacjonarnego lub ruchomego, specjalistycznego pojazdu kolejowego). Zgodnie z przyjętym założeniem projektowym, istotnym aspektem rozpatrywanego w artykule systemu jest instalacja *Systemu monitorowania stanu elementów układu pojazd szynowy – tor* na pojeździe oraz obsługa systemu na bieżąco, w tzw. trybie *on-line*.

3 OPIS WSKAŹNIKA JAKOŚCI TORU

W analizie dynamiki pojazdów szynowych ruch pojazdów przyjmuje się koncepcyjnie jako rozpatrywanie jego dwóch składowych. Pierwszą ze składowych stanowi ruch podstawowy. Jeżeli chodzi o drugą ze składowych, przyjmuje się, że jej istotę stanowią zaburzenia ruchu podstawowego. Ruchem podstawowym rozumiany jest ruch, jakim poruszałby się idealny pojazd po torze doskonałym fizycznie. Z kolei zaburzeniami nazywa się wszelkiego rodzaju ruchy dodatkowe. Wymuszeniami kinematycznymi są funkcje opisujące charakterystyki profilu nierówności toru w czasie. Ponieważ układ pojazd szynowy – tor jest bardzo złożony, dzieli się go zwykle na mniejsze podukłady, które podlegają analizie jako wydzielone elementy. W omawianych badaniach skupiono się jedynie na ruchach pionowych środka geometrycznego koła pojazdu, które są spowodowane takimi czynnikami jak:

- nierówności geometryczne toru,
- sprężyste odkształcenia toru występujące podczas jazdy,
- charakterystyka powierzchni tocznych kół,
- dynamiczne oddziaływanie układu napędowego w pojazdach trakcyjnych,



Instytut Pojazdów
Szynowych

POJAZDY SZYNOWE 2/2014

- w przypadku tramwajów odkształcenia kół wynikające z ich konstrukcyjnej podatności.

Na podstawie badań przeprowadzonych w projekcie określono pewien zbiór wskaźników jakości toru służących badaniu jego stanu (podstawę poniższych treści stanowią wybrane raporty projektu MONIT tj. Bogacz *et al.* (2010a, 2010b, 2011, 2012a, 2012b) oraz literatura „twarda”: Chudzikiewicz (2012, pp. 108-129).

Pierwsze propozycje parametrów (wskaźników) do oceny stanu torów kolejowych przy określonej prędkości jazdy są wyrażone zależnościami (1)-(3).

$$W_{t1} = c_{t1} \left[\int_0^{\infty} S_a(\omega) \omega^{-2/3} d\omega \right]^{0,15} \quad (1)$$

$$W_{t2} = c_{t2} \left[\int_0^{\infty} S_a(\omega) \omega^2 d\omega \right]^{0,15} \quad (2)$$

$$W_{t3} = c_{t3} \left[\int_0^{\infty} S_a(\omega) \omega d\omega \right]^{0,15} \quad (3)$$

gdzie c_{ij} z odpowiednio zanumerowanym indeksem j ($j = \{1, 2, 3\}$), oznacza stały współczynnik, a $S_w(\omega)$ [m^2s^{-3}] jest gęstością widmową przyspieszeń $a(t)$ punktu poruszającego się po nierównościach toru z prędkością v . Wartość współczynnika c_{ij} każdorazowo dobrana zostaje metodą prób tak, aby w przypadku badanych torów wskaźnik oceny W_t przyjmował wartości od 0 do 5. W badaniach przyjęto ponadto wzór aproksymacyjny na gęstość widmową zgodny z (4).

$$S_w(\omega) = \frac{\sigma_w^2 \sqrt{\pi}}{\sum_{j=1}^n \delta_j} \sum_{j=1}^n \frac{\delta_j}{2|\alpha_j|} \left\{ \exp \left[- \left(\frac{\beta_j - \omega}{2\alpha_j} \right)^2 \right] + \exp \left[- \left(\frac{\beta_j + \omega}{2\alpha_j} \right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

Wyznaczone w wyniku analizy numerycznej parametry wynoszą $n = 5$, $\sigma_w = 0.006434$ m, natomiast wartości pozostałych parametrów zamieszczono w tabeli 1.

j	1	2	3	4	5
δ_j	0.97488	-0.13298	0.077201	0.0499610	0.030936
α_j	2.46070	1.69530	0.322530	10.0030000	0.588390
β_j	0.78870	3.78800	8.516700	0.0059547	16.241000

Tabela 1 – Wartości parametrów dla aproksymacyjnego wzoru na gęstość widmową

Źródło: Chudzikiewicz (2012, pp. 110)



Instytut Pojazdów
Szynowych

POJAZDY SZYNOWE 2/2014

Przyjmuje się, że współczynniki podane w tab. 1. dotyczą gęstości widmowej nierówności toru kolejowego przy prędkości jazdy $v = 120$ km/h.

Zaproponowane wyrażenia (1-3) na ww. parametry stanowi uogólnienie wzoru na wskaźnik spokojności jazdy uwzględniający energię kinetyczną punktu materialnego odniesioną do jego masy i pochodną względem czasu przyspieszenia tego punktu.

W okresie realizacji prac projektowych wstępnie zaproponowane zostały następujące wartości stałych współczynników: $c_{t1} = 2.6420$, $c_{t2} = 0.7252$, $c_{t3} = 1.2070$. Przy czym Autorzy przeprowadzający ówczesnie badania przewidywali i wciąż przewidują możliwość przeprowadzenia korekty współczynników na podstawie oceny większej liczby wyników pomiarów eksperymentalnych (omawiane w niniejszym artykule wyniki badań dotyczą jazd po torze testowym, natomiast pomiary dokonywane były także w regularnej eksploatacji pojazdu szynowego w ruchu pasażerskim).

Zaproponowano także, składający się ze zbioru wskaźników (1)-(3), wskaźnik określony jest zależnością (5) i po podstawieniu wielkości (1)-(3): (5a). Przy czym parametry $u_j, j = \{1, 2, 3\}$ są uznawane za współczynniki wagowe, które powinny spełniać warunki:

$$u_1 + u_2 + u_3 = 1 \quad \text{oraz} \quad 0 \leq u_j \leq 1, \quad j = \{1, 2, 3\}.$$

$$W_{t4} = u_1 W_{t1} + u_2 W_{t2} + u_3 W_{t3} \quad (5)$$

$$W_{t4} = \left\{ \int_0^{\infty} S_a(\omega) \left[(u_1 c_{t1})^{20/3} \omega^{-2/3} + (u_2 c_{t2})^{20/3} \omega^2 + (u_3 c_{t3})^{20/3} \omega \right] d\omega \right\}^{0.15} \quad (5a)$$

W przypadku kolejnego z rozpatrywanych wskaźników, zapisanego zależnością (6), do jego obliczenia nie jest konieczne wyznaczenie funkcji gęstości widmowej. Jego bezpośrednie obliczenie następuje przy wykorzystaniu znanego przebiegu w czasie pochodnej przyspieszenia, zwanej zrywem.

$$W_{t2} = c_{t2} \left\{ \pi \lim_{T \rightarrow +\infty} \left[\frac{1}{T} \int_0^T \dot{a}^2(t) dt \right] \right\}^{0.15} \quad (6)$$

Po przeprowadzeniu wielu testów w ramach badań uznano, że wyrażenie (6) może być uznane za suboptymalne celem obliczania wskaźnika, ponieważ nie wymaga czasochłonnego, numerycznego wyznaczenia funkcji gęstości widmowej, wymaganej przy stosowaniu wyrażeń (1)-(3).

Wygodne do szybkiego obliczania wskaźnika mogą być również następujące trzy nowe propozycje parametrów oceny toru, które w ogólnej postaci przedstawiają



Instytut Pojazdów
Szynowych

POJAZDY SZYNOWE 2/2014

wyrażenia (7)-(9).

$$W_{t5} = c_{t5} \left\{ \lim_{T \rightarrow +\infty} \left[\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt \right] \right\}^p \quad (7)$$

$$W_{t6} = c_{t6} \left\{ \lim_{T \rightarrow +\infty} \left[\frac{1}{T} \int_0^T \dot{w}^2(t) dt \right] \right\}^q \quad (8)$$

$$W_{t7} = u_1 W_{t2} + u_2 W_{t6} + u_3 W_{t7} \quad (9)$$

Z uwagi na dużą dowolność w doborze wartości współczynników wagowych wskaźnik (9) stanowi, podobnie jak (5), zbiór wskaźników. Podobnie jak w przypadku wyrażenia (5) parametry $u_j, j = \{1, 2, 3\}$ są współczynnikami wagowymi, które powinny spełniać warunki:

$$u_1 + u_2 + u_3 = 1 \quad \text{oraz} \quad 0 \leq u_j \leq 1, \quad j = \{1, 2, 3\}.$$

Wskaźnik (7) zależy od przyspieszeń wymuszenia kinematycznego. Zatem zgodnie z II zasadą dynamiki zależy także od występujących sił, natomiast wskaźnik (8) zależy od kwadratu prędkości wymuszenia kinematycznego, czyli od energii kinetycznej drgających mas. Prędkość $\dot{w}(t)$ ma być wyznaczona przez całkowanie numeryczne rejestrowanych przyspieszeń funkcji wymuszenia kinematycznego. Przyjęto zatem, że w (8) średnia wartość prędkości w przedziale całkowania jest zerowa.

Poniżej zaproponowany jest dobór wartości wykładników potęgowych p i q , skalujących wartości wskaźników oraz wartości stałych współczynników c_{t5} i c_{t6} .

Wykładniki potęgowe p i q proponuje się dobrać tak, aby przy zmianie prędkości jazdy wartości wskaźników W_{t5} i W_{t6} ulegały zmianie podobnie jak wartość w przypadku wskaźnika W_{t2} . Wymaganie, aby wskaźniki W_{t5} i W_{t6} ulegały zmianie z prędkością jazdy podobnie jak wartość wskaźnika W_{t2} , zostanie spełnione, przy przyjętych wartościach parametrów: $p = 0.225$ oraz $q = 0.450$.

Wartości stałych współczynników c_{t5} i c_{t6} zostały dobrane numerycznie w taki sposób, aby w przypadku tego samego toru wartości wskaźników W_{t5} i W_{t6} przyjmowały taką samą wartość jak W_{t2} . W wyniku obliczeń wyznaczone zostały i zaproponowane następujące wartości stałych: $c_{t5} = 2.46$ oraz $c_{t6} = 8.63$. W przypadku korygowania wartości parametru c_{t2} wartości tych stałych powinny być również odpowiednio skorygowane.

Pokrótkie prześledzono wszystkie proponowane do tej pory w literaturze nowoopracowane wskaźniki jakości toru, aczkolwiek analizy wykazały, że najbardziej



Instytut Pojazdów
Szynowych

POJAZDY SZYNOWE 2/2014

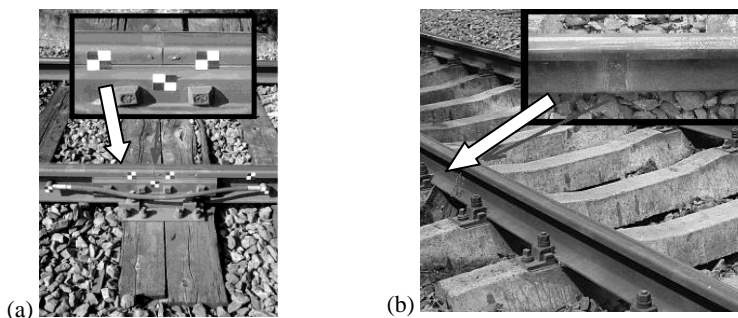
adekwatny do omawianych w niniejszym artykule potrzeb i jednocześnie najbardziej obiecujący do dalszych badań jest wskaźnik jakości toru wyznaczany wg zależności (7) i tymże posługują się autorzy niniejszej pracy. Wskaźnik (7) zależy od przyspieszeń wymuszenia kinematycznego, czyli zgodnie z II zasadą dynamiki także od występujących sił uwzględniając bezwładność pionową zestawów kołowych. W algorytmie Jednostki Akwizycji Danych prototypu *Systemu monitorowania stanu elementów układu pojazd szynowy – tor* wprowadzono następujące wartości współczynników w przypadku wskaźnika jakości toru wyznaczanego wg zależności (7): $c_{15} = 1$ i $p = 0.225$.

4 OPIS I WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Badania eksperymentalne przeprowadzono na torze doświadczalnym w Żmigrodzie należącym do Instytutu Kolejnictwa. Do badań użyto lokomotywy i wagonu pomiarowego (rys. 3). Wykonano kilka cykli jazd testowych z różnymi prędkościami (40-120 km/h). We wszystkich przypadkach rejestrowano drgania w wybranych punktach obudów łożysk zestawów kołowych, ram wózków oraz pudeł wagonu. Wykorzystano 2 równoległe rejestrujące systemy akwizycji danych.



Rys. 3 – Pojazd badawczy- lokomotywa i pomiarowy wagon

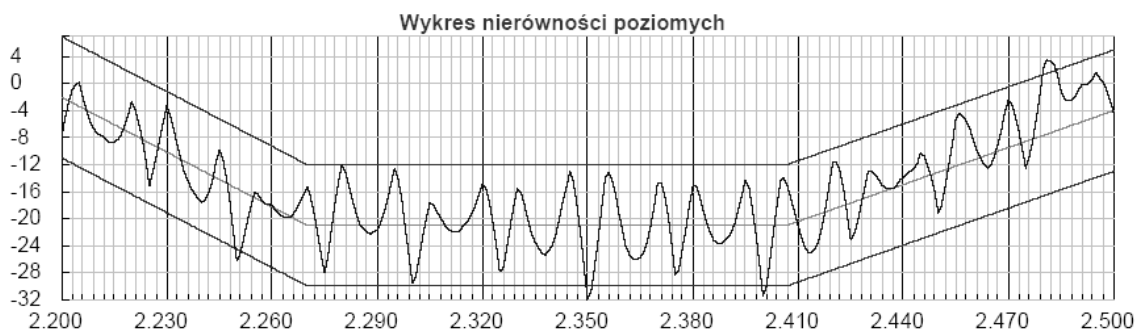
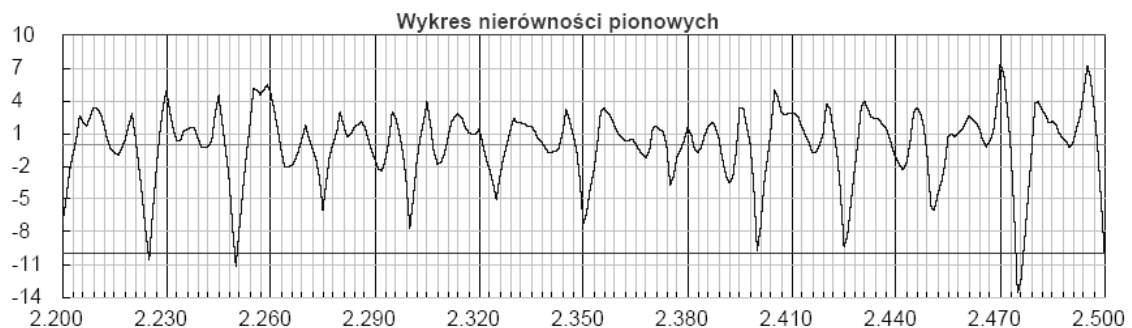


Rys. 4 – Tor doświadczalny: tor stykowy (a), tor bezstykowy (b)



Instytut Pojazdów
Szynowych

POJAZDY SZYNOWE 2/2014



Rys. 5 – Wykresy nierówności pionowych i poziomych lewego toku na 300 m odcinku między 2,2-2,5 kilometrem toru doświadczalnego

Źródło: Instytut Kolejnictwa, Bogacz et al. (2011b, str. 11-12)

Tor doświadczalny mierzy 7 km długości (rys. 9) i charakteryzuje się różną geometrią nawierzchni. Toki szynowe wykonano w technice bezстыkowej (rys. 4b), oprócz odcinka na dystansie 1900 – 3100 m, gdzie zastosowano metodę stykową (rys. 4a). Przed przystąpieniem do badań wykonano pomiary geometrii toru toromierzem GRAW TEP o kroku pomiarowym profili poprzecznych szyn co 0,5 m oraz pomiarem profilu szyny z dokładnością ± 0.3 mm. Rys. 5 ilustruje wynik pomiaru nierówności na odcinku 300 m toru testowego na łuku o promieniu $R = 900$ m.

W czasie badań na torze doświadczalnym użyto do pomiaru dwóch systemów pomiarowych. Składały się one z układów pomiaru prędkości, lokalizacji pojazdu, krzywizny toru oraz wartości przyspieszeń mierzonych na obudowach łożysk zestawów kołowych. System przypisany do pojedynczego wagonu składał się z jednostki akwizycji danych rejestrującego sygnały z kanałów pomiarowych z 10 czujników przyspieszenia (rys. 6). Specyfikacje parametrów obu systemów zamieszczono w tabelach 2 i 3.



Instytut Pojazdów
Szynowych

POJAZDY SZYNOWE 2/2014

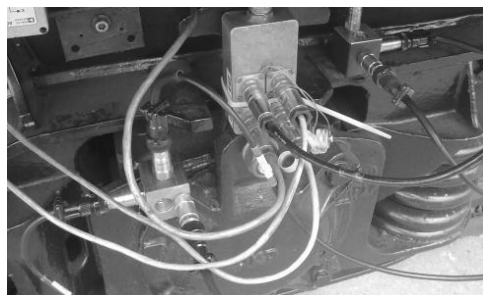
Lp.	Typ	Opis parametrów
1.	piezoelektryczne czujniki przyspieszeń VIS-311-A/B	- zakres pomiarowy do 100 g, - czułość: 1 mV/g
2.	wzmacniacz pomiarowy	- zakres pomiarowy: 200 g - zakres częstotliwości: 0 – 12 kHz - błąd nieliniowości i histerezy: 0,8% - błąd funkcji przenoszenia: 0.28 dB
3.	żyroskopowy czujnik prędkości kątowej	- zakres pomiarowy: 36 (6) deg/s - zakres częstotliwości: 20 Hz - strefa nieczułości: 0.2 (0.1) deg/s
4.	układ do pomiaru prędkości VST-1	- błąd pomiaru: $\pm 0,5$ km/h

Tabela 2 – Parametry czujników pomiarowych system pomiarowy 1

Lp.	Typ	Opis parametrów
1.	piezoelektryczne czujniki przyspieszeń A200-02, A200-04, A200-10	- zakres pomiarowy do 200 g, - czułość: 0.5 mV/g
2.	wzmacniacz pomiarowy ESAM TRAVELLER	- zakres pomiarowy: 200 g - zakres częstotliwości: 0 – 20 kHz - błąd nieliniowości i histerezy: 0,5% - błąd funkcji przenoszenia: 0.2 dB

Tabela 3 – Parametry czujników pomiarowych użytych w badaniach system wzorcowy układ pomiarowy 2

Przy tak dobranej aparaturze pomiarowej rozszerzona niepewność pomiaru przyspieszeń wynosiła odpowiednio 4,8% w przypadku systemu pierwszego i 4,2 % w przypadku systemu drugiego.



Rys. 6 - Czujniki przyspieszeń użyte do pomiarów drgań na obudowie łożyska zestawu kołowego

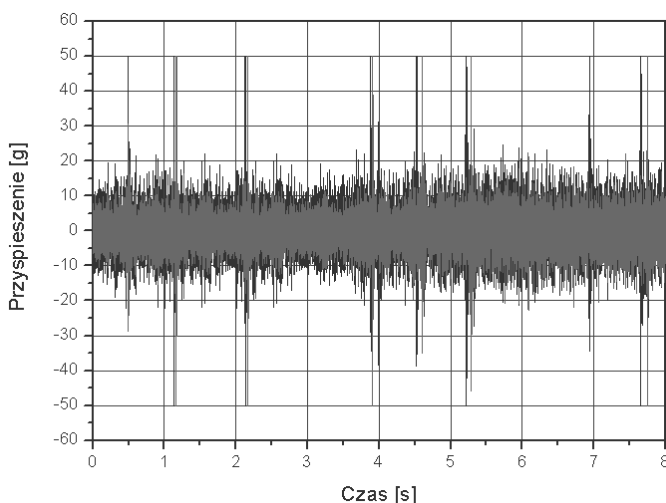
Tak dobranym systemem pomiarowym wykonano badania testowe. Poniżej zaprezentowano przykładowe wyniki przyspieszeń zarejestrowanych na obudowach łożysk zestawu kołowego podczas przejazdu po torze stykowym (rys. 7) i bezstykowym



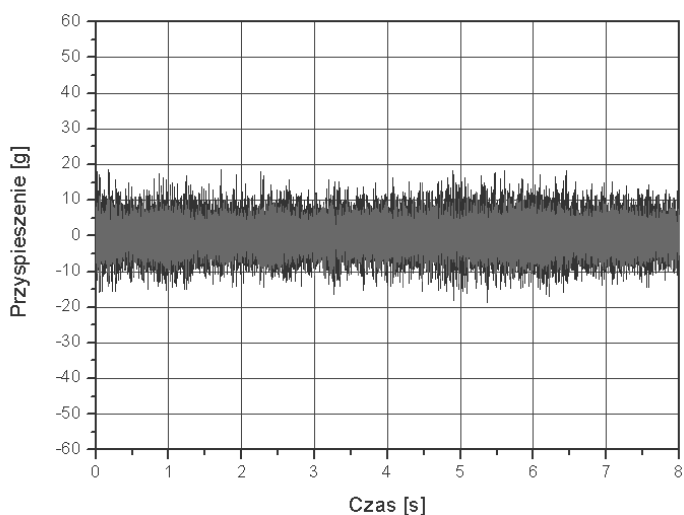
Institut Pojazdów
Szynowych

POJAZDY SZYNOWE 2/2014

(rys. 8) bez filtracji sygnału. Czarna i szara linia ilustrują odpowiednio lewą i prawą obudowę łożyska. Na rys. 7 widać charakterystyczne piki przyspieszeń wynikających z zastosowanej techniki budowy toków szynowych testowego odcinka toru. Z tak otrzymanego sygnału poddanego filtracji oraz obróbce wg algorytmu opisanego w rozdziale 4., wyznaczano wskaźnik jakości toru.



Rys. 7 – Wyniki pomiaru przyspieszeń na torze testowym
(odcinek stykowy, tor prosty, pomiary z fragmentu toru dokonywane od pkt. B (rys. 9))

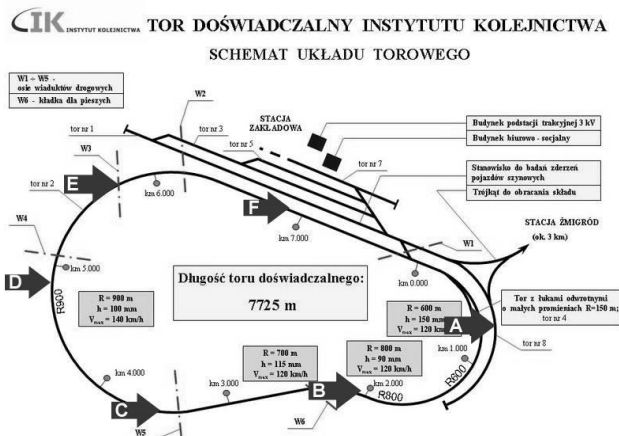


Rys. 8 – Wyniki pomiaru przyspieszeń na torze testowym
(tor bezstykowy tor prosty, pomiary z fragmentu toru dokonywane od pkt. F (rys. 9))



Instytut Pojazdów
Szynowych

POJAZDY SZYNOWE 2/2014



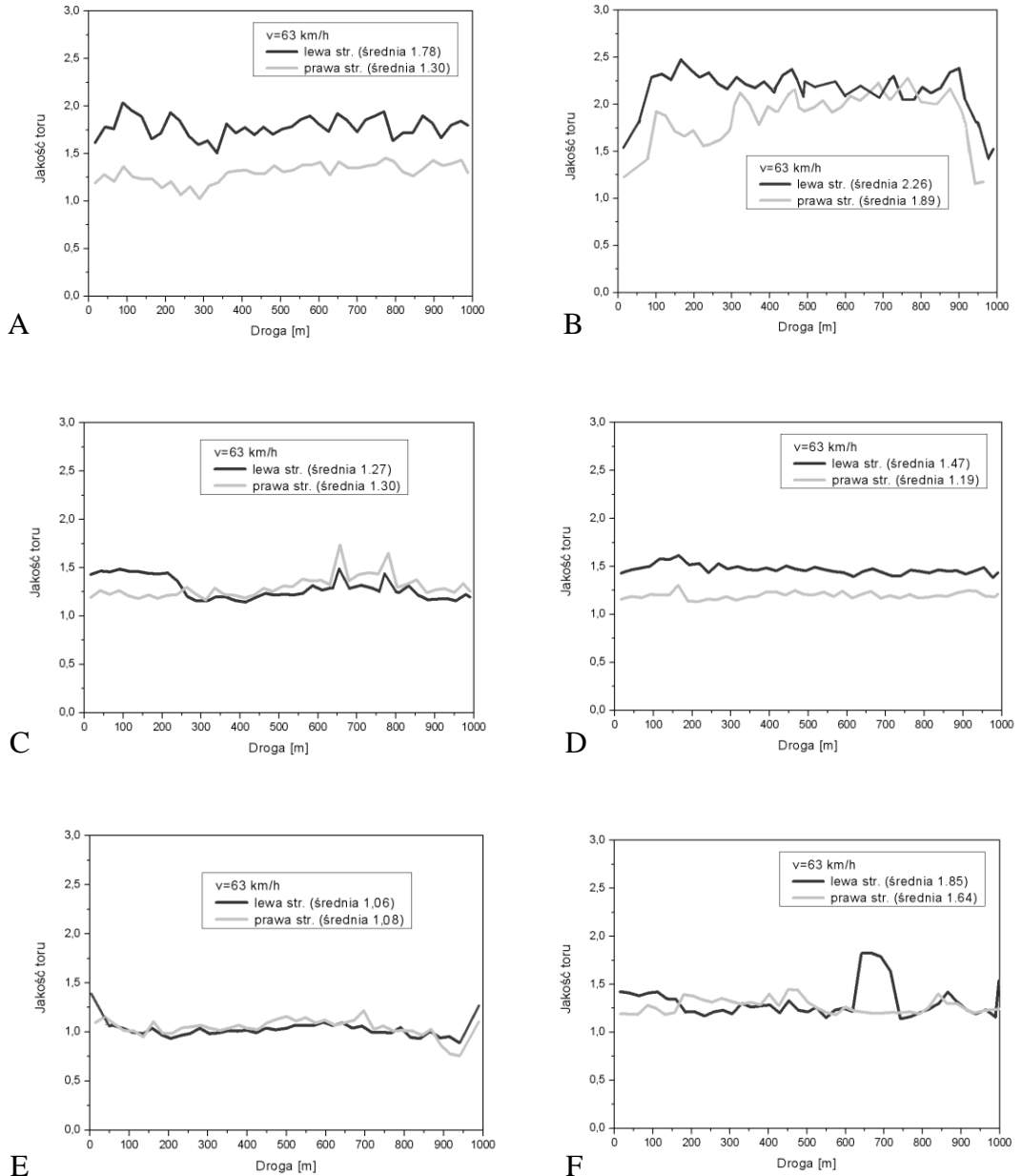
Rys. 9 – Lokalizacja kolejnych punktów rozpoczęcia pomiaru przy prędkości $v=60$ km/h
Źródło: <http://www.ikolej.pl/typo3temp/pics/4930673a0b.jpg> (dostęp on-line 4 marca 2014 r.)

Prezentowane na schemacie (rys. 9) lokalizacje punktów rozpoczęcia pomiaru na torze doświadczalny odpowiadają prezentowanym na wykresach (rys. 10) przebiegom wartości wskaźników jakości toru wyznaczonych z lewego i prawego toku szynowego toru. Otrzymane przebiegi wartości wskaźnika jakości toru potwierdzają stan toru, po którym poruszał się pojazd testowy. Wskaźnik przyjmuje największe wartości (2.26 i 1.89) na odcinku stykowym między pkt. B-C na schemacie (rys. 9). Ten odcinek toru, oprócz zastosowania techniki stykowej, charakteryzował się drewnianymi podkładami użytymi do jego budowy (rys. 4a). Przebiegi zmian wartości wskaźnika w przypadku przejazdu po tym fragmencie toru ilustruje wykres B na rys. 10. Różnica wartości jakości toru między stroną lewą a prawą wynika z faktu jazdy na łuku, podczas której koła pojazdu wywierają większy nacisk na zewnętrzną szynę. Wywołuje to siła odśrodkowa, działająca na cały pojazd. Idealnie zjawisko to widać na przebiegu wskaźnika podczas jazdy na odcinku stykowym, gdzie występuje łuk o promieniu $R = 700$ m i odcinek prosty toru (rys. 10, wykres B). Ze względu na ten fakt, podczas testów wyznaczano pośrednio krzywiznę toru poprzez pomiar prędkości kątowej przy użyciu żyroskopowego czujnika zamontowanego na pudle wagonu pomiarowego. Na odcinku 1 000 m toru między pkt. F i A (rys. 9) wyszlifowano powierzchniowe toczne szyn przed testem. Ten odcinek potraktowano jako wzorcowy. Na tym fragmencie toru zarejestrowano najniższą średnią wartość wskaźnika jakości, odpowiednio 1.06 i 1.08 - tok lewy i tok prawy toru. Na podstawie wyników z przeprowadzonych doświadczalnych badań w Żmigrodzie stwierdzono, że system jest czuły nie tylko na jakość powierzchni tocznej szyn toru, ale także na obecność przepustów na trasie (rys. 10, wykres C) oraz rozjazdów (rys.10, wykres F).



Instytut Pojazdów Szynowych

POJAZDY SZYNOWE 2/2014



Rys. 10 – Przebiegi wartości wskaźnika jakości toru przy $v = 63$ km/h, rejestrację poszczególnych przebiegów rozpoczęto od punktów wskazanych na schemacie (rys 9)



Instytut Pojazdów
Szynowych

POJAZDY SZYNOWE 2/2014

5 OCENA DOBORU WARTOŚĆ WSKAŹNIAK JAKOŚCI TORU

Dokonując podsumowania, po analizie wyników przeprowadzonych badań na torze doświadczalnym zaobserwowano, że wzrost prędkości pojazdu powoduje zwiększanie wartości zaproponowanego współczynnika jakości toru. Czulość systemu na krzywiznę toru wymaga uwzględnienia tego faktu podczas doboru wartości wskaźnika jakości toru. Można przyjąć, że wartości wskaźnika jakości toru na podstawie przeprowadzonych badań można sklasyfikować w postaci zamieszczonej w tabeli 4. Prace będą kontynuowane.

Klasa	Opis toru	Wskaźnik jakości
1	Tor bardzo dobrej jakości – wzorcowy	0.0 -1.0
2	Tor o dobrej jakości	1.0-1.5
3	Tor o jakości dopuszczalnej	1.6-2.5
4	Tor do inspekcji - remont	>2.5

Tabela 4 – Klasyfikacja wskaźnika jakości toru

6 PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Pomiary nierówności toru oraz oględziny wybranych fragmentów toru potwierdziły wyniki pomiarów otrzymanych z czujników *Systemu monitorowania stanu elementów układu pojazd szynowy – tor* zamontowanych na obudowach łożyska wagonu pomiarowego. Podczas przejazdu przez odcinek stykowy toru (1200 m) widać wzrost współczynnika jakości toru wywołany szczelinami między szynami występującymi okresowo. Badania wykazały, że zastosowany algorytm w układzie centralnej jednostki akwizycji danych jest czuły na nierówności i zmianę parametrów podparcia torowiska. Badany *System monitorowania stanu elementów układu pojazd szynowy – tor* pozwolił także na identyfikację rozjazdu oraz przepustów, co przy próbach na rzeczywistym torze pozwoli rozróżnić np. przyczółki mostów na trasach kolejowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bogacz, R., Chudzikiewicz, A., Meinke, P., 2009a, *Ocena jakości toru kolejowego na podstawie pomiarów wielkości fizycznych mierzonych na korpusie łożysk zestawów kołowych*, Monitorowanie Stanu Technicznego Konstrukcji i Ocena Jej żywotności MONIT, Materiały seminarium WT PW 2009, pp. 117-122.
- [2] Bogacz, R., Chudzikiewicz, A., Meinke, P., 2009b, *Ocena jakości toru kolejowego i układów biegowych na podstawie wielkości fizycznych mierzonych na korpusach łożysk zestawów kołowych*, Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne, Nr 91, z. 149, pp. 549-565.
- [3] Bogacz R., Czyczula W., Grzyb A., Meinke P., Konowrocki R., Konop J., 2010a, *Monitorowanie Stanu Technicznego Konstrukcji i Ocena jej Żywotności, Zadanie 3. Sformułowanie wymagań dla systemu monitorowania, w wybranych punktach, pojazdu i toru, Temat 3/3. Opracowanie wymagań dla systemu monitorowania stanu toru z pozycji obudowy łożyska zestawu kołowego, raport, Warszawa.*



Instytut Pojazdów
Szynowych

POJAZDY SZYNOWE 2/2014

- [4] Bogacz R., Czyczuła W., Grzyb A., Meinke P., Konowrocki R., Konop J., Stawowiak J., Tomaszewski T., Wcisło M., 2010b, Monitorowanie Stanu Technicznego Konstrukcji i Ocena jej Żywotności, Zadanie 4. Wykonanie prototypu systemu monitorowania realizującego opracowaną metodę, w wybranych punktach, pojazdu i toru, Temat 4/4. Opracowanie algorytmów i procedur dla oprogramowania jednostki akwizycji danych systemu monitorowania stanu toru z pozycji obudowy łożyska zestawu kołowego, raport, Warszawa.
- [5] Bogacz R., Czyczuła W., Konop J., 2012d, *Monitorowanie stanu toru pojazdami szynowymi wyposażonymi w czujniki przyspieszeń na korpusach łożysk zestawów kołowych*, [w:] Nowoczesne Technologie i Systemy Zarządzania w Transporcie Szynowym, Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej, seria: Materiały Konferencyjne, nr 3(99), str. 19-33.
- [6] Bogacz R., Grzyb A., Tokaj P., 2011a, *Monitorowanie stanu pojazdu i toru na podstawie pomiaru przyspieszeń na korpusach łożysk zestawu kołowego*, Czasopismo Techniczne z. 4. Mechanika z. 2-M, pp. 11-23.
- [7] Bogacz R., Konowrocki R., 2012, *On new effects of wheel-rail interaction*, Archive of Applied Mechanics, 82, pp. 1313-1323.
- [8] Bogacz R., Konowrocki R., Tokaj P., 2011b, Monitorowanie Stanu Technicznego Konstrukcji i Ocena jej Żywotności, Zadanie 5. Badanie prototypu systemu w warunkach laboratoryjnych, Temat 5/3. Opracowanie planu testów i przeprowadzenie badań prototypu systemu monitorowania stanu toru z pozycji obudowy łożyska zestawu kołowego. Badania laboratoryjne typu off-line, raport, Warszawa.
- [9] Bogacz R., Konowrocki R., Tokaj P., 2012a, Monitorowanie Stanu Technicznego Konstrukcji i Ocena jej Żywotności, Zadanie 6. Badanie prototypu systemu w warunkach eksploatacyjnych, Temat 6/3. Opracowanie planu testów i przeprowadzenie badań eksploatacyjnych prototypu systemu monitorowania stanu toru z pozycji obudowy łożyska zestawu kołowego, raport, Warszawa.
- [10] Bogacz R., Konowrocki R., Tokaj P., 2012b, Monitorowanie Stanu Technicznego Konstrukcji i Ocena jej Żywotności, Zadanie 7. Eksploatacja nadzorowana systemu na wybranych obiektach infrastruktury, Temat 7/3. Opracowanie planu testów i przeprowadzenie nadzoru w czasie eksploatacji nadzorowanej prototypu systemu monitorowania stanu toru z pozycji obudowy łożyska zestawu kołowego, raport, Warszawa.
- [11] Chudzikiewicz A. (red.), 2012, *Monitorowanie stanu układu dynamicznego pojazd szynowy-tor*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- [12] Chudzikiewicz A., Drożdżel J., Sowiński B., 2012, *Practical Solution of Rail Vehicle and Track Dynamics Monitoring System*. Structural Health Monitoring II Book Series: Key Engineering Materials, vol. 518, pp. 271-280.
- [13] Chudzikiewicz A., Kostrzewski M., 2013, *Analiza sygnałów wibroakustycznych w procesie monitorowania stanu zawieszenia pojazdów szynowych oraz toru*, Pojazdy Szynowe 1/2013, ISSN 0138-0370, Poznań, Poland, pp. 10-17.
- [14] Chudzikiewicz A., Sowiński B., 2011, *Simulation Method of Selection of Diagnostic Parameters in the Process of Monitoring the Rail Vehicle's Conditions*. Structural Health Monitoring 2011: Condition-Based Maintenance and Intelligent Structures, Book Series: Structural Health Monitoring Vol. 1, pp. 1103-1110.
- [15] Chudzikiewicz A., Sowiński B., 2010, *Problems of choosing statistical parameters in the process of monitoring the system of railway vehicle*. BOGIE '10 - The 8th International Conference on Railway Bogies and Running Gears, Budapest, 13-16 September, Materiały Konferencyjne CD, pp. 1-14.
- [16] Glösmann P., Kreuzer E., 2006, *Track-Monitoring of Wheel-Rail-Systems*, PAMM Proc. Appl. Math. Mech. 6, 303-304 (2006) WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- [17] Konop J., Konowrocki R., 2014, *On evaluation of the wheelsets-track interaction quality in railway engineering*, Machine Dynamics Research, Vol. 36, No. 2.
- [18] Konowrocki R., Bajer Cz., 2010, *Vibrations of railroad due to the passage of the underground train*, Archives of Transport, 22, 1, str. 61-82.



Instytut Pojazdów
Szynowych

POJAZDY SZYNOWE 2/2014

- [19] Kostrzewski M., Chudzikiewicz A., 2013, *Analiza sygnałów wibroakustycznych w procesie monitorowania stanu zawieszenia pojazdów szynowych oraz toru*, [w:] Pojazdy Szynowe, Instytut Pojazdów Szynowych TABOR, nr 1, , str. 10 – 17.
- [20] Kukulski J., 2012, *Selected numerical calculations for reinforced track substructure at various static and dynamic loads*, Proceedings of the First International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK doi:10.4203/ccp.98.146. 2012, Paper 146.
- [21] Kukulski J., 2014, Wybrane obliczenia symulacyjne obciążeń konstrukcji nawierzchni kolejowej-wstępne określenie trwałości i rezerwu eksploatacyjnego, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, z 101, 2014, strony 43-53, ISSN 1230-9265.
- [22] Melnik R., Kostrzewski M., 2012, *Rail Vehicle's Suspension Monitoring System - Analysis of Results Obtained in Tests of the Prototype*, Key Engineering Materials, nr 518, str. 281-288. Melnik R., Chudzikiewicz A., 2013, *Assesment of The EMU and Track Condition Monitoring Results from Chosen Track Sections During Normal Operation*, Vol. 20, No 4, pp. 99-106.
- [23] Melnik R., Sowiński B., 2013, *Application of the Rail Vehicle's Monitoring System in the Process of Suspension Condition Assessment*, Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, vol. 15, No. 4, 2013, pp. 3-8. ISSN 1335-4205.
- [24] PN-EN 14363:2007P, 2007, Kolejnictwo - Badania właściwości dynamicznych pojazdów szynowych przed dopuszczeniem do ruchu - Badanie właściwości biegowych i próby stacjonarne.
- [25] Slope Indicator Track Monitoring System, 2013a, <http://www.slopeindicator.com/pdf/mems-track-monitor-datasheet.pdf> (dostęp on-line 12 lutego 2014 r.).
- [26] Slope Indicator Track Monitoring System, 2013b, <http://www.slopeindicator.com/instruments/tilt-trackmonitor.html> (dostęp on-line 12 lutego 2014 r.).
- [27] T&T Sistemi Railway Track Quality System, 2009, http://tetsistemi.com/joomla1520/index.php?option=com_content&view=article&id=30:railway-track-quality-system&catid=43:trasportation&Itemid=64&lang=en (dostęp on-line: 12 lutego 2014 r.)
- [28] UIC 518, 2009, Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour - Safety - Track fatigue - Ride quality.