

**Praca doktorska mgr inż. Piotra Tokaja nt.  
OCENA JAKOŚCI EKSPLOATACYJNEJ  
DROGI SZYNOWEJ NA PODSTAWIE JEJ DIAGNOSTYKI**

**Streszczenie**

Zagadnienia związane z dynamiką pojazdów szynowych, znane są od początku istnienia kolei, a skutki wzajemnego oddziaływania pojazdów i infrastruktury, są szeroko opisywane w literaturze. Obszar na jakim skupił się autor niniejszej pracy, to analiza oddziaływania pojazdu szynowego na tor, w sposób usystematyzowany. Podstawą do rozważań, było zaprojektowanie modelu drogi szynowej, którego można użyć w systemie MEDYNA. Dzięki pracy w Instytucie Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji, gdzie autor zajmował się na co dzień analizą pracy elementów pojazdów szynowych (np. badaniem ram wózków) i infrastruktury torowej (np. badania podkładów, szyn kolejowych), mógł wykorzystać swoje doświadczenie do stworzenia modeli numerycznych, odpowiadających rzeczywistym rozwiązaniom. Następnie, autor rozpoczął prace nad stworzeniem połączonego w ciąg logiczny procesu badawczego. Zaprojektowany proces obejmował: modelowanie układu pojazd szynowy tor; budowę stanowiska laboratoryjnego torowiska (na którym można wykonać porównanie dynamicznego zachowania toru, z wynikami symulacji komputerowych); badania na Torze Doświadczalnym wybranych pojazdów szynowych (celem doboru odpowiedniej aparatury pomiarowej w wytypowanych miejscach pojazdów); badania rzeczywistych obiektów na wybranych liniach kolejowych (w tym pociągu dużej prędkości Pendolino).

Wszystkie zaplanowane prace zostały zrealizowane. Porównanie wyników badań z kolejnych etapów, w szczególności wykonanych na stanowisku laboratoryjnym, pozwoliło na ich wykorzystanie w budowie modeli numerycznych. Wnioski z badań prowadzonych na torze Y, wykonane na linii kolejowej nr 117 (Kalwaria Zebrzydowska Lanckorona – Wadowice), pozwoliły na zmianę rozporządzenia, które rozszerzyło możliwość stosowania toru bezстыkowego na łuki o minimalnych promieniach 250 m na torach szlakowych. Badania pociągu Pendolino przy prędkościach powyżej 250 km/h, pozwoliły na porównanie uzyskanych wyników mierzonych w torach z wynikami analiz numerycznych. Były to pierwsze badania w Polsce, podczas których przeprowadzono pełną analizę współpracy infrastruktury i pojazdu, przy prędkościach od 20 ÷ 293 km/h.

Szczególnie interesujące rezultaty dały porównania wyników przyspieszeń drgań, mierzonych na obudowach łożysk zestawów kołowych, dla różnych pojazdów i częstotliwości pracy aparatury pomiarowej (do 2000 Hz), z wynikami badań numerycznych (uwzględniającymi np. częstotliwość drgań własnych podkładów w zakresie 200 ÷ 1500 Hz).

W celu doboru odpowiednich metod badawczych, autor przeanalizował dostępną literaturę oraz znane i stosowane techniki. W szczególności interesujące były spostrzeżenia dotyczące pomijania w piśmiennictwie wpływu obszaru styku koła z szyną w badanych modelach. Dlatego omówione zostały rodzaje i budowa zestawów, stosowanych we

współczesnych pojazdach szynowych, w szczególności występujących w pojazdach użytych w badaniach poligonowych. Przedstawione zostały zjawiska (uszkodzenia), jakie spotykane są podczas eksploatacji pojazdów, szczególnie na zestawach kołowych. Pokazano sposoby przeciwdziałania tym zjawiskom, np. sposoby tłumienia drgań w pojazdach (eliminacja hałasu kolejowego). Poruszono zagadnienia spotykane w kontakcie koło szyna, takie jak mikropoślizgi i pełne poślizgi kół, oraz wężykowanie zestawów kołowych, spowodowane nierównomiernym zużyciem profilu kół. Przedstawiono również autorską metodę odwzorowania kontaktu koła i szyny.

Omówiono budowę drogi szynowej, a w szczególności przedstawiono właściwości jej części składowych wraz z wynikami badań, uzyskanymi na stanowiskach laboratoryjnych. Na podstawie przeprowadzonych badań, można stwierdzić, że możliwe jest przeprowadzenie diagnostyki torowiska za pomocą odpowiednio dobranych czujników mocowanych na pojeździe. Wyniki uzyskane podczas badań na różnych typach pojazdów, z wymuszonymi uszkodzeniami, pozwalają stwierdzić, że czujniki przyspieszeń, zamontowane na pojeździe bez uszkodzeń, wykrywają takie defekty drogi szynowej jak np. nierówności szyn (korugacje), nieciągłość podparcia szyn (brak podsypki pod podkładem), czy sinusoidalne nierówności poprzeczne spowodowane wyboczeniem szyn.

Rozwój techniki pomiarowej, a w szczególności miniaturyzacja układów, oraz zdolność bezprzewodowego przesyłania zarejestrowanego sygnału, dają przesłanki do dalszych prac prowadzonych w kierunku diagnostyki zarówno samego pojazdu jak i drogi szynowej.

Do najważniejszych wyników uzyskanych w pracy można zaliczyć: zbudowanie modelu, pozwalającego na dokładne odzwierciedlenie zjawisk dynamicznych występujących w kontakcie koła i szyny; uzyskanie rozwiązania dla tego modelu i porównanie wyników z rzeczywistymi wartościami uzyskanymi w badaniach laboratoryjnych i poligonowych, potwierdzające jego poprawność w zakresie badanych zjawisk; wykazanie, że parametry oddziaływania układu pojazd szynowy - droga szynowa, mierzone na pojeździe (w postaci przyspieszeń drgań) pozwalają na ocenę stanu technicznego, zarówno drogi szynowej jak i pojazdu; identyfikacja sygnałów pomiarowych, w odniesieniu do uszkodzeń spotykanych w pojazdach szynowych i w drodze szynowej; wykorzystanie uzyskanych wyników do uzasadnienia zmiany rozporządzenia, rozszerzającego zastosowanie toru bezстыkowego w łukach o minimalnym promieniu 250 m w torach głównych i 190 m w torach dodatkowych; opracowanie bezinwazyjnego sposobu pomiaru ugięć szyn za pomocą kamery, wykorzystanego w początkowej fazie badań związanych z doktoratem i użytego później do badania szybkich pociągów na CMK w zmodyfikowanej formie; wprowadzenie nowego sposobu identyfikacji styku koła z szyną, pozwalającego rozbudować w prosty sposób bazę modeli kontaktu w systemie MEDYNA, zgodnych ze stanem rzeczywistym.

Wkładem własnym autora w uzyskanie tych wyników są: przygotowanie numerycznego modelu układu, pojazd szynowy – tor, uwzględniającego własności poszczególnych elementów

toru, potwierdzone badaniami stanowiskowymi; wybór systemu MEDYNA do analizy układu; wykonanie pomiarów przyspieszeń drgań oraz kształtu powierzchni kontaktu koła i szyny, odpowiadających danemu typowi pojazdu szynowego (lokomotywy, wagony osobowe, wagony towarowe, zespoły trakcyjne itd.); studia porównawcze oraz usystematyzowanie pozyskanych wyników, w zależności od typu zestawu kołowego, rodzaju napędu, odmiany układu hamulcowego; zbudowanie bazy danych dotyczących typowych uszkodzeń na pojazdach, która może być zapisana w pamięci pojazdu i wykorzystana do wykrywania powiązanych z nimi usterek; opracowanie metody pomiarów i ich realizacja z wykorzystaniem wyspecjalizowanych czujników o dużej rozdzielczości (czułości), umieszczonych na obudowach łożysk rzeczywistych pojazdów, w celu oszacowania wielkości drgań generowanych przez powierzchnię toczną koła, w zależności od chropowatości powierzchni.

Rozwiązania dla przemieszczeń otrzymane z użyciem zbudowanego modelu numerycznego porównano z rzeczywistymi wartościami zmierzonymi w badaniach laboratoryjnych i poligonowych, uzyskując zgodność ilościową i jakościową w zakresie badanych parametrów. Dzięki przeprowadzonym badaniom poligonowym, dokonano identyfikacji otrzymanych sygnałów z uszkodzeniami spotykanymi w pojazdach szynowych, oraz w drodze szynowej. Omówiono nowy, autorski sposób identyfikacji styku koła z szyną, pozwalający na rozbudowę bazy modeli kontaktu koło – szyna w systemie MEDYNA.

Przedstawiono potwierdzenie głównych tez pracy. Pokazano, że parametry oddziaływania układu pojazd szynowy - droga szynowa (w postaci przyspieszeń drgań), mierzone na pojeździe, pozwalają na ocenę stanu technicznego zarówno drogi szynowej jak i pojazdu.

## **Abstract**

Issues related to the dynamics of rail vehicles have been known since the beginning of the railways, and the effects of interaction between vehicles and infrastructure are widely described in the literature. The author of the work focused on the area related to the analysis of the impact of the rail vehicle on the track. The design of a railroad model that can be used in the MEDYNA system was the basis for the study. Thanks to the work at the Railway Research Institute, Laboratory of Materials and Structural Elements Testing, where the author dealt with the analysis of the operation of rail vehicle elements (e.g. testing bogie frames) and track infrastructure (e.g. testing sleepers, railway rails) on a daily basis, it was possible to use his experience to creating numerical models corresponding to real solutions. Then, the author began work on creating a logically organized research process. The designed process included: modelling the rail vehicle track system; construction of a track laboratory station (enabling to compare the dynamic behavior of the track with the results of computer simulations); tests of selected rail vehicles on the Experimental Track (in order to select the appropriate measuring equipment in chosen locations on vehicles); testing the real objects on selected railway lines (including the Pendolino high-speed train).

All planned works have been completed. Comparison of test results from individual stages, in particular those performed on a laboratory stand, allowed their use in the construction of numerical models. The results of tests carried out on track Y, done on railway line No. 117 (Kalwaria Zebrzydowska Lanckorona - Wadowice), allowed for a change in the ordinance, extending the possibility of using a continuously welded track in route tracks curves with a minimum radius of 250 m. Tests of the Pendolino train at speeds above 250 km/h also contributed to the comparison of the results measured in the tracks with the results of numerical analyses. These were the first studies in Poland, during which a full analysis of the cooperation between the infrastructure and the vehicle at speeds from 20 ÷ 293 km/h was carried out.

Particularly interesting results were obtained by comparing the values of vibration accelerations, measured on wheel set bearing housings, for various vehicles and operating frequencies of measuring equipment (up to 2000 Hz), with the results of numerical tests (taking into account, for example, the natural frequency of sleepers in the range of 200 ÷ 1500 Hz).

In order to select the appropriate research methods, the author analyzed the available literature as well as known and used techniques. The observations concerning the omission of the impact of the wheel-rail contact area in the tested models in the literature were particularly interesting. Therefore, the types and construction of wheel sets used in modern rail vehicles, in particular in vehicles used in field tests, were discussed. The phenomena (damages) that are encountered during the operation of vehicles, especially on wheel sets, are presented. Ways of counteracting these phenomena are shown, e.g. ways of vibrations damping in vehicles (in terms of railway noise elimination). Issues encountered in wheel-rail contact, such as micro-slips and full-slips of wheels, as well as narrowing of wheel sets caused by irregular wear of

the wheel profile, are discussed. The author's innovative method of mapping the wheel-rail contact is also presented.

The structure of the railway is discussed, in particular, the properties of its components are presented along with the test results obtained on laboratory stands. On the basis of the conducted research, it can be concluded that it is possible to carry out track diagnostics by using appropriately selected sensors mounted on the vehicle. The results obtained during tests on various types of vehicles with forced damages allow to conclude that acceleration sensors, mounted on a vehicle without damage, can detect such railway defects as e.g. corrugations, discontinuity of rail support (no ballast under the sleeper) or sinusoidal lateral irregularities caused by rail buckling.

The development of the measurement technique, and, in particular, the miniaturization of systems, and the ability to wirelessly transmit the recorded signal, give grounds for further work towards diagnostics of both the vehicle itself and the rail track. The most important results obtained in the work include: building a model that allows for accurate reflection of dynamic phenomena occurring in the contact between the wheel and the rail; obtaining a solution for this model and comparing the results with the actual values obtained in laboratory and field tests, confirming its correctness in terms of the studied phenomena; demonstrating that the parameters of the rail vehicle - rail road system, measured on the vehicle (in the form of vibration accelerations), allow the assessment of the technical conditions of both the railway and the vehicle; identification of the measured signals in relation to damages encountered in rail vehicles and on the railway; using the obtained results to justify the amendment of the regulation extending the application of the continuously welded track in curves with a minimum radius of 250 m in the main tracks and 190 m in the additional tracks; development of a non-invasive method of measuring rail deflections with a camera, used in the initial phase of research related to the doctoral dissertation and later used to high-speed train tests at Central Railway Line in a modified form; introduction of a new approach to identify the wheel-rail contact, allowing for expansion of the base of consistent with the real state contact models in the MEDYNA system.

The author's own contribution to obtaining these results are: preparation of a numerical model of the system, rail vehicle - track, taking into account the properties of individual track elements, confirmed by laboratory tests; selection of the MEDYNA system for system analysis; taking measurements of vibration accelerations and the shape of the contact surface of the wheel and rail, corresponding to a given type of rail vehicle (locomotives, passenger cars, freight cars, multiple units, etc.); comparative studies and systematization of the obtained results, depending on the type of wheelset, type of drive, type of braking system; building a database of common damages on vehicles that can be stored in the vehicle's memory and used to detect related faults; development of a measurement method and their implementation using specialized high-resolution (sensitivity) sensors placed on bearing housings of real vehicles, in order to estimate

the amount of vibration generated by the wheel tread surface, depending on the surface roughness.

The solutions for displacements obtained by using the built numerical model are compared with the actual values measured in laboratory and field tests, showing the quantitative and qualitative compliance in terms of the tested parameters. Thanks to the conducted field tests, the received signals have been identified with damages encountered in rail vehicles and in the railway. A new, proprietary method of identifying the wheel-rail contact is discussed, allowing for the expansion of the base of wheel-rail contact models in the MEDYNA system.

Confirmation of the main theses of the work is presented. It has been shown that the parameters of the rail vehicle - rail road system interaction (in the form of vibration accelerations), measured on the vehicle, allow the assessment of the technical conditions of both the railway and the vehicle.