

Kazimierz KŁOSEK

Józef PARCHAŃSKI

Stanisław FOBER

Politechnika Śląska

## IMPEDANCJA MECHANICZNA JAKO MIERNIK OCENY DYNAMICZNEJ JAKOŚCI TORU

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono metodę oraz wyniki pomiaru impedancji mechanicznej pojedynczych podkładów kolejowych obciążonych cyklicznie w paśmie częstotliwości 0,02-10 kHz. Wskazano na istotne zróżnicowanie tego parametru w zależności od typu podkładu (drewniany - betonowy sprężony) oraz konstrukcji podłoża szynowego, ze szczególnym uwzględnieniem geotekstylnych pojemników podpodkładowych stosowanych w nawierzchni typu 4xP.

### 1. WSTĘP

Ustalenie dopuszczalnych obciążeń drogi kolejowej, w świetle dotychczasowych doświadczeń [1], jest realizowane poprzez formułowanie i egzekwowanie określonych zaleceń wynikających z kryterium dopuszczalnych obciążeń statycznych i dynamicznych nawierzchni oraz podtorza, jak i dopuszczalnych obciążeń eksploatacyjnych toru. Mieścące się w ramach powyższych kryteriów określone techniki diagnostyczne podlegają ciągłej weryfikacji praktycznej oraz wzbogaceniu o nowe propozycje pomiarowe.

Wraz ze wzrostem prędkości eksploatacyjnej szczególnego znaczenia nabierają badania dynamicznych właściwości taboru oraz nawierzchni i podtorza. Nie bez znaczenia pozostają tu zarazem problemy związane z potrzebą bliższego rozeznania wpływów dynamicznych dla relatywnie niskich prędkości ( $30-40 \text{ kmh}^{-1}$ ), dominujących w ruchu pociągów towarowych oraz pociągów osobowych, zwłaszcza w warunkach szczególnych utrudnień eksploatacyjnych, np. na terenach podlegających wpływom eksploatacji górniczej. Przeprowadzone ostatnio przez autorów badania terenowe trzech typów podtorza o zróżnicowanych parametrach konstrukcyjnych i w pełni porównywalnych warunkach obciążeń ruchowych taboru, wykazały charakterystyczne zróżnicowanie parametrów dynamicznych nawierzchni dla tego właśnie zakresu prędkości ( $V_{\text{const}} \approx 35 \text{ kmh}^{-1}$ ). Stwierdzono, że największe wartości przyspieszeń drgań podkładów, w zakresie częstotliwości 2-2,5 kHz, występują w nawierz-

chni konwencjonalnej o podęypce tłuczniowej podćcielonej 20 cm warstwę ochronną pospółki zwirowej. W przypadku podtorza wzmoćnionego dodatkową warstwę geosyntetyku (2xP) wahały się one w granicach 1,4-2,8 kHz, podczas gdy dla podłóża wzmoćnionego geotekstylnymi pojemnikami podpodkładowymi (4xP) największe wartości przyspieszeń drgań podkładów występują w zakresie częstotliwości zdecydowanie niższych, rzędu 0,1-0,4 kHz [6].

W celu bliższego określenia właściwości dynamicznych wymienionych uprzednio trzech typów nawierzchni przeprowadzono ich wstępne - dodatkowe badania laboratoryjne w skali naturalnej. Celem pracy jest prezentacja wybranych rezultatów testów rozpoznawczych związanych z pomiarem impedancji mechanicznej układu "nawierzchnia - podtorze" dla szerokiego zakresu częstotliwości wymuszanych drgań.

## 2. POMIAR IMPEDANCJI MECHANICZNEJ UKŁADU

Impedancja mechaniczna  $Z_m$  jest wielkością zespoloną (1) określaną zależnością [7]:

$$Z_m = R_m + j(\omega m - k_s/\omega) = |Z_m| e^{j\varphi_m} \quad (1)$$

gdzie:

$R_m = B$ , opór mechaniczny tłumienia wiskotycznego (rys. 1c),

$X_m = j\omega m$ , reaktancja mechaniczna bezwładnościowa (rys. 1a),

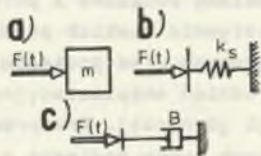
$|Z_m| = \sqrt{R_m^2 + (\omega m - k_s/\omega)^2}$ , moduł impedancji mechanicznej,

$\varphi_m = \arctg \frac{\omega m - k_s/\omega}{R_m}$ , argument impedancji mechanicznej,

$\omega = 2\pi f$ , pulsacja,

$f$  - częstotliwość,

$X_k = k_s/\omega$ , reaktancja mechaniczna odkształceniowa (rys. 1b).



Rys. 1. Działanie siły,

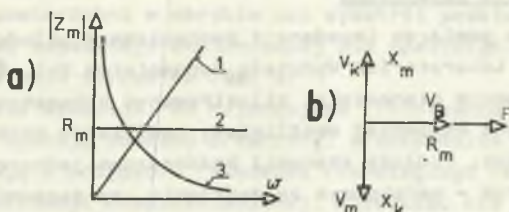
a) na masę ( $F = am$ ), b) na układ o sztywności  $k_s$  ( $F = k_s \Delta l$ ), c) na układ o tłumieniu wiskotycznym  $B$  ( $F = B v$ ), gdzie:  $a$  - przyspieszenie,  $\Delta l$  - przemieszczenie,  $v$  - prędkość

Fig. 1. Force action

a) on the mass ( $F = am$ ), b) on the system of stiffness elements  $k_s$  ( $F = k_s \Delta l$ ), c) on the system with viscoelastic damping  $B$  ( $F = B v$ ), where:

$a$  - acceleration,  $\Delta l$  - displacement,  $v$  - velocity

Moduły poszczególnych składowych impedancji mechanicznej przedstawia rys. 2a, natomiast wykresy składowych prędkości bezwładnościowej  $V_m$ , tłumieniowej  $V_B$  i odkształceniowej  $V_k$  wraz z wykresami reaktancji mechanicznej bezwładnościowej  $X_m$ , odkształceniowej  $X_k$  i oporu mechanicznego  $R_m$  dla przypadku siły sinusoidalnej  $F(t) = F_m \sin \omega t$  przedstawia rys. 2b.



Rys. 2. Wykresy modułów składowych impedancji mechanicznej  
1 - bezwładnościowej, 2 - tłumieniowej, 3 - odkształceniowej

Fig. 2. Diagrams of component moduli of the mechanical impedance  
1 - inertia-type, 2 - dumping, 3 - deformation

Mierząc siłę  $F(t)$  oraz prędkość  $V(t)$  w kierunku działania siły, można obliczyć moduł impedancji mechanicznej  $|Z_m|$  ze wzoru:

$$|Z_m| = \frac{F_{sk}}{V_{sk}}, \quad (2)$$

gdzie:

$F_{sk}$  - skuteczna wartość siły działającej na układ,

$V_{sk}$  - skuteczna wartość prędkości w kierunku działania siły.

Do pomiarów impedancji mechanicznej służą specjalne przetworniki, np. Brüel-Kjaer. W chwili obecnej nie produkuje się jednak przetworników impedancji na tak znaczne siły, porównywalne z naciskiem koła pojazdu szynowego na podkład.

Niezależnie od równania (2) wprowadzono pojęcie impedancji mechanicznej  $Z_m^*$ , zdefiniowanej jako stosunek siły  $F$  do przyspieszenia "a", czyli:

$$|Z_m^*| = \frac{F}{a} \quad (3)$$

Zależność między modułami  $|Z_m|$  a  $|Z_m^*|$  dla przebiegu sinusoidalnego opisuje relacja:

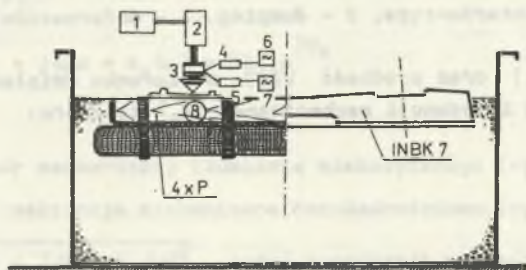
$$|Z_m^*| = \frac{F_{sk}}{V_{sk}(\omega)} = \frac{|Z_m|}{\omega} \quad (4)$$



Ponieważ dynamiczna jakość toru zależy od wartości impedancji mechanicznej zmierzonej w określonym przedziale częstotliwości, jest więc sprawą obojętną, czy zmierzy się  $Z_m$  czy też  $Z_m^*$ , a porównuje odpowiednie wartości. Jak wiadomo, przyspieszenie można zmierzyć łatwiej i dokładniej aniżeli prędkość, zwłaszcza w szerokim zakresie częstotliwości.

### 2.1. Opis stanowiska badawczego

Badania związane z pomiarem impedancji mechanicznej układu "podkład-podtorze" wykonano w Laboratorium Wydziału Budownictwa Pol. Śląskiej na specjalnie skonstruowanym stanowisku, zilustrowanym schematycznie na rys. 3. Wymiary skrzyni badawczej umożliwiały realizację prób wyłącznie z pojedynczym podkładem. Podłoże stanowił każdorazowo jednorodny materiał zwirowy o kontrolowanym - warstwowym zagęszczeniu, co zapewniało dobre powtarzalność warunków posadowienia dla trzech kolejno testowanych przypadków. Badania w skali 1:1 wykonano dla podkładu drewnianego (II-B), betonowego (INBK-7) oraz podkładu drewnianego zespolonego z geotekstylnym pojemnikiem podpodkładowym (4xP).



Rys. 3. Stanowisko pomiarowe impedancji mechanicznej

Fig. 3. Measuring stand for the mechanical impedance testing

Na górnej krawędzi stalowej skrzyni zamocowano wzbudnik drgań "2" z magnesem stałym zasilany z generatora "1" typu PO21 o nastawianej częstotliwości w paśmie 0,02-20 kHz. Do głowicy wzbudnika przymocowano czujnik impedancji mechanicznej "3" typu 8001 firmy Brüel-Kjaer, który spoczywał na badanym podkładzie "8". Zastosowano czujnik impedancji mechanicznej składający się z dwóch przetworników umieszczonych w jednej obudowie:

- przetwornik siły o czułości 370 pc/N,
- akcelerometr o czułości 3 pc/ms<sup>-2</sup>.

Przetworniki te połączono poprzez wzmacniacze ładunku "4-5" typu 2634 do woltomierzy "6-7" typu 2607 firmy Brüel-Kjaer. Po nastawieniu na generatorze wybranej częstotliwości wzbudnik wytwarzał drgania typu sinoidalnego. Na woltomierzu "6" odczytywano wartość napięcia proporcjonalnego do

siły działającej na podkład, a na voltomierzu "7" wartość napięcia proporcjonalną do przyspieszenia.

## 2.2. Analiza wyników badań

Wartości obliczeniowe impedancji mechanicznej dla częstotliwości z zakresu 0,02-10 kHz dotyczą wybranego punktu podkładu, zlokalizowanego na jego górnej powierzchni w obrębie osi symetrii podkładki szynowej. Charakter zmienności impedancji mechanicznej dla poszczególnych rodzajów podkładów przedstawia wykres na rys. 4.

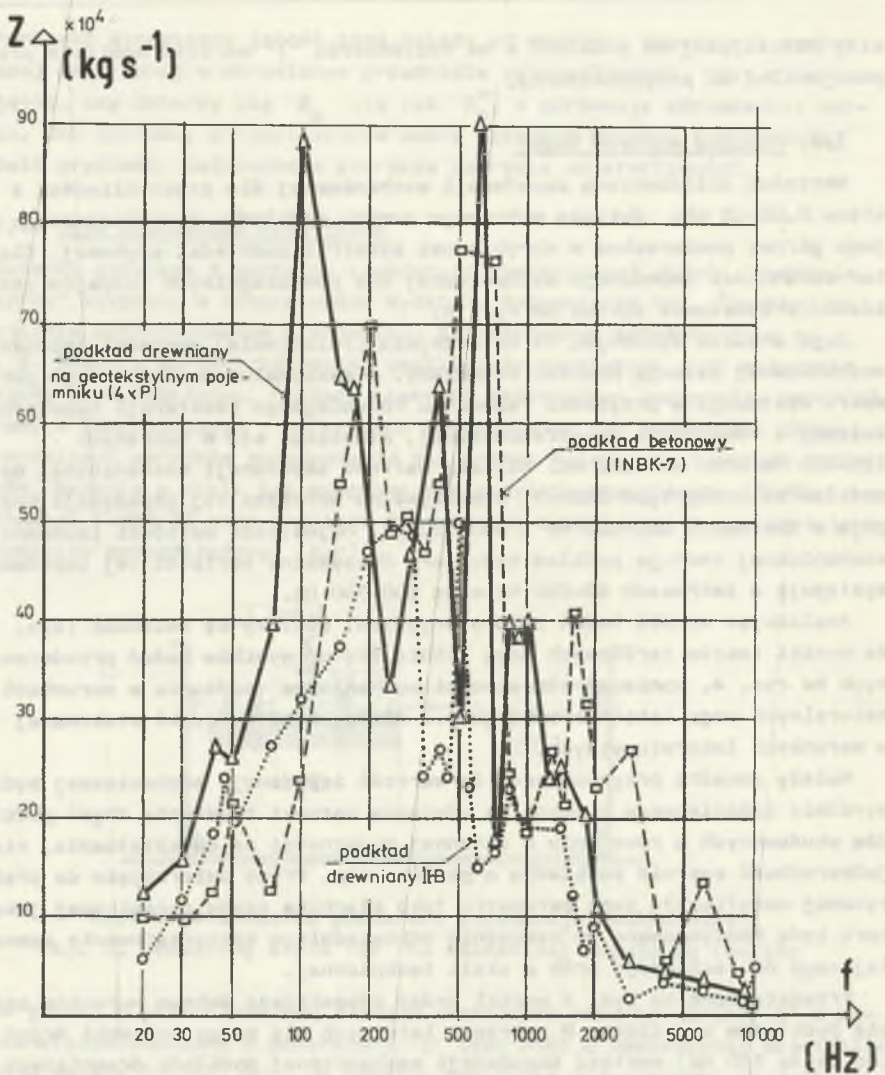
Jego analiza wykazuje, że najmniejsze (relatywnie) wartości impedancji mechanicznej cechują podkład drewniany, a maksymalne wartości tego parametru występują w przypadku rezonansu równoległego reaktancji bezwładnościowej i reaktancji odkształceniowej, mieszcząc się w zakresach 150-300 Hz oraz 450-520 Hz. Większą wartość impedancji mechanicznej ma podkład betonowy typu INBK-7, a maksymalne wartości tej impedancji występują w zakresach 150-220 Hz i 400-720 Hz. Największe wartości impedancji mechanicznej cechuje podkład typu 4xP. Maksymalne wartości tej impedancji występują w zakresach 80-150 Hz oraz 500-700 Hz.

Analizując wyniki badań laboratoryjnych, autorzy są świadomi tego, że wyniki testów terenowych mogą różnić się od wyników badań przedstawionych na rys. 4, ponieważ właściwości mechaniczne podtorza w warunkach naturalnych mogą istotnie odbiegać od właściwości podсыpki stosowanej w warunkach laboratoryjnych.

Należy ponadto przypuszczać, że wartość impedancji mechanicznej będzie wyraźnie zróżnicowana z uwagi na odmienne warunki tłumienia drgań podkładów wbudowanych w ramę toru o zmiennej podatności na odkształcenia, niejednorodność oparcia podkładów o podłoże itp. Prace zmierzające do praktycznej weryfikacji tego parametru jako miernika oceny dynamicznej jakości toru będą kontynuowane po wykonaniu odpowiedniego oprzyrządowania zezwalającego na realizację prób w skali technicznej.

Przedstawione na rys. 4 wyniki badań odpowiadają dobrym warunkom oparcia podkładów o podłoże. W zakresie istotnych dla pracy podсыpki drgań (do około 150 Hz) wartość impedancji mechanicznej podkładu drewnianego zespolonego opaskami z geotekstylnymi pojemnikiem (4xP) jest zdecydowanie wyższa, od około 15-20% dla  $f = 50$  Hz do 270-360% dla  $f = 100$  Hz, aniżeli w przypadku podkładu drewnianego i betonowego. Porównywalnym wartościom siły wymuszającej  $F(t)$  odpowiadają zatem (w analogicznej jw. proporcji) podwyższone wartości przyspieszeń drgań "a" układu. Najkorzystniejsze z tego punktu widzenia warunki przejmowania oddziaływań dynamicznych charakteryzują zatem podkład typu 4xP, czego dobrym potwierdzeniem są między innymi wyniki wcześniejszych pomiarów odkształceń trwałych tych nawierzchni [3, 5].

Geneza związanych z tym zjawisk wynika zarówno z odmiennych kryteriów zniszczenia gruntu (podсыpki) w warunkach obciążeń cyklicznych - w sto-



Rys. 4. Wpływ częstotliwości drgań wzbudnika na impedancję mechaniczną podkładów

Fig. 4. Influence of generator's frequency of the mechanical impedance of the ties



unku do klasycznych warunków ścinania [4], korzystniejszych warunków dystrybucji naprężeń z rusztu torowego w podtorze [2], jak i dodatkowych cech wibroizolacyjnych uwzględnionych w konstrukcji typu 4xP (podeszwa ochronna między podkładem a pojemnikiem).

### 3. PODSUMOWANIE

Impedancja mechaniczna może, w przekonaniu autorów, charakteryzować dynamiczne właściwości toru w dowolnie szerokim zakresie częstotliwości, ze szczególnym uwzględnieniem identyfikacji lokalnych rezonansów układu nawierzchnia-podtorze. W tym aspekcie może ona stanowić wielkość łączącą prędkość przejeżdżającego taboru oraz generowaną przez niego siłę dynamiczną ze skutkami tych oddziaływań w nawierzchni i podtorzu.

Wstępna weryfikacja porównawcza trzech wybranych typów podkładów (drewniany-betonowy-drewniany z geotekstylnym pojemnikiem podpodkładowym) wykazała praktyczną przydatność zastosowania impedancji mechanicznej jako miernika oceny dynamicznej jakości toru. Rezultaty badań potwierdziły korzystne cechy - zmodyfikowanej geosyntetykami nawierzchni typu 4xP, która w chwili obecnej poddawana jest intensywnym próbom eksploatacyjnym na odcinku doświadczalnym Śląskiej DOKP.

### LITERATURA

- [1] Bałuch H.: Trwałość i niezawodność eksploatacyjna nawierzchni kolejowej. Inżynieria Komunikacyjna. WKiŁ, Warszawa 1979.
- [2] Basiewicz T., Kłosek K.: Konstrukcja podłoża szynowego typu 4xP o podwyższonej zdolności eksploatacyjnej. Mat. V Kraj. Konf. Nauk. "Drogi Kolejowe", Gdańsk-Stogi 1989.
- [3] Czyczuła W., Kłosek K., Kudła D.: Badania wybranych konstrukcji nawierzchni kolejowej minimalizujących oddziaływania wibracyjne. Mat. Konf. Nauk. nt. "Utrzymanie nawierzchni na liniach kolejowych z dużymi szybkościami pociągów", Kraków-Zembrzyce 1990.
- [4] Kłosek K.: W sprawie kryteriów oceny nośności podtorza kolejowego. Mat. III Kraj. Konf. Nauk. "Drogi Kolejowe", Kraków-Muszyna 1985.
- [5] Kłosek K., Sękowski J.: Eksperymentalna ocena skuteczności doboru wybranych systemów wzmocnień podtorza kolejowego obciążonego cyklicznie. Mat. Konf. Komit. Geotechn. nt. "Wpływ obciążeń dynamicznych na zachowanie się podłoża gruntowego", Warszawa 1988.
- [6] Kłosek K., Madej J.: Rejestracja i analiza wybranych charakterystyk dynamicznych drogi kolejowej z zastosowaniem mikrokomputerowego analizatora sygnałów. Mat. VI Kraj. Konf. Nauk. "Drogi Kolejowe". Gliwice-Wisła 1991.
- [7] Parchański J.: Pomiar siły zmiennej w czasie. Zesz. Nauk. Pol. Śl. seria: Elektryka, z. 2, Gliwice 1984.

Doc. dr inż. Mięczyśław Leśko

## MEASUREMENT OF THE MECHANICAL IMPEDANCE OF TIES FOR SELECTED TYPES OF TRACK STRUCTURE

### Summary

The method and results of measuring the mechanical impedance of following ties: timber, timber on rubber footing, timber with a sub-container, and reinforced concrete are presented.

The support conditions for those ties on the subsoil as well as the load conditions were diverse. A prognosis for the change of impedance was given in relation to the usage period of the track structure and to the character of load.

## ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛНОГО МЕХАНИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ШПАЛ ДЛЯ ИЗБРАННЫХ ТИПОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

### Резюме

В работе представлены метод и результаты измерения полного механического сопротивления железнодорожных шпал (деревянных, деревянных с резиновой подошвой, деревянных с полостью под шпалой, железобетонных) при различных условиях опора шпалы о покрытие, а также условиях переменной внешней нагрузки системы.

Определен прогноз изменчивости полного сопротивления в зависимости от продолжительности эксплуатации нового покрытия и характера его нагрузки.