

Józef PARCHAŃSKI

POMIARY NAPRĘŻENIA OSIOWEGO W SZYNACH KOLEJOWYCH METODĄ ANALIZY CZĘSTOTLIWOŚCI DRGAŃ SWOBODNYCH

Streszczenie. Przeprowadzone badania szyny typu S49, zamontowanej w modelu odcinka rzeczywistego toru kolejowego, potwierdziły jednoznaczną zależność częstotliwości poprzecznych drgań swobodnych szyny od naprężenia osiowego. Na wartość częstotliwości drgań swobodnych ma też wpływ odległość między osiami sąsiednich podkładów (długość przęsła) oraz jednorodność podłoża (gruntu).

MEASUREMENTS OF AXIAL STRESS IN RAILS BY MEANS OF FREE VIBRATION FREQUENCY ANALYSIS

Summary. Examinations of the rail type S49, which has been a model of actual railway track, have proved that the relation between free, transverse vibration frequency of the rail and the axial stress is an explicit one. A distance between the axes of neighbouring cross-ties (span length) and subsoil (ground) homogeneity influence the value of free vibration frequency as well.

1. WPROWADZENIE

W torach bezстыkowych [1] istnieje potrzeba pomiarów naprężenia osiowego, zwłaszcza w temperaturze niskiej (mroźna zima) lub wysokiej (upalne lato). Dotychczas nie opracowano urządzenia spełniającego wymagania pomiarowych służb PKP.

Z analizy modelu matematycznego oraz wyników pomiarów przeprowadzonych na modelu fizycznym, opisanych w artykule [4] i pracy [3], wynika jednoznaczna zależność częstotliwości poprzecznych drgań swobodnych od osiowego naprężenia mechanicznego (rozciągającego lub ściągającego) smukłych elementów sprężystych. Z tych badań wynika, że czułość częstotliwościowej metody pomiaru naprężenia obiektu sprężystego rośnie ze wzrostem smukłości obiektu, a maleje ze wzrostem naprężenia osiowego.

Smukłość s_x szyny kolejowej, np. typu S49, przymocowanej do podkładów, których osie są oddalone od siebie o $l_g = 0,66$ m, wynosi zaledwie

$$s_x = \frac{l_x}{\sqrt{I_{\min}/S_x}} = \frac{0,66}{\sqrt{3,2 \cdot 10^{-4}/6,3 \cdot 10^{-3}}} = 29,$$

przy czym $I_{\min} = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$ jest minimalnym momentem bezwładności, a $S_x = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ jest polem poprzecznego przekroju szyny S49.

Zastanawiają natomiast przedstawione w artykule [2] wyniki pomiarów częstotliwości drgań poprzecznych odcinka szyny o długości 3,06 m (nie przymocowanej do podkładów), ściskanej siłą $F = 0 \div 300$ kN. Zgodnie z modelem matematycznym wyprowadzonym w pracy [5] i przekształconym w pracy [3] do postaci wygodniejszej do obliczania częstotliwości wynika, że ze wzrostem siły ściskającej maleje częstotliwość drgań poprzecznych smukłego elementu sprężystego. Prawdliwość ta została potwierdzona w pracy [3] podczas pomiarów laboratoryjnych. W artykule [4] podano wyniki obliczeń oraz pomiarów potwierdzające, że częstotliwość drgań poprzecznych smukłego elementu sprężystego rośnie ze wzrostem siły rozciągającej. Budzą zatem wątpliwości wykresy przedstawione w artykule [2] — sugerujące, że ze wzrostem siły ściskającej, częstotliwość drgań poprzecznych rośnie, a okres drgań maleje.

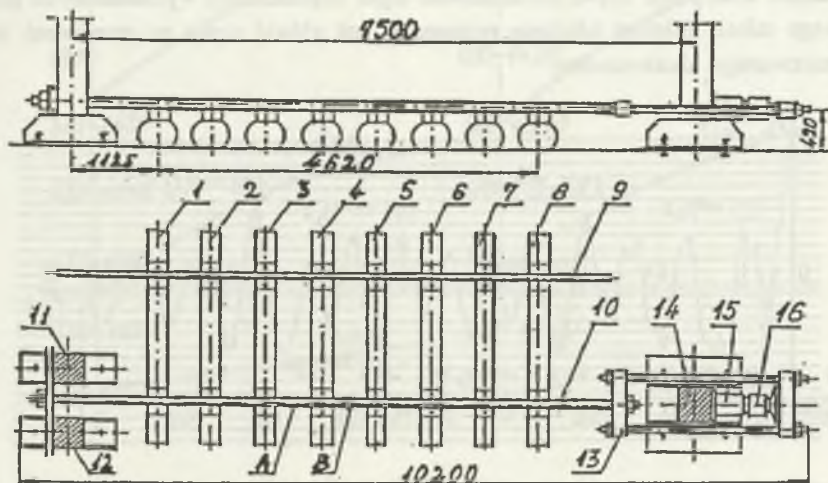
Powstało pytanie, czy metoda częstotliwościowa może być zastosowana do pomiarów naprężenia osiowego w szynach eksploatowanych torów kolejowych. Badania symulacyjne dokładnego matematycznego modelu toru kolejowego, uwzględniającego sprzężenia między sąsiednimi przesłami szyny i między sąsiednimi szynami toru, są bardzo trudne do przeprowadzenia. Dotychczas takiego dokładnego modelu toru nie opracowano i nie przeanalizowano. W tej sytuacji zdecydowano się na zbudowanie modelu odcinka rzeczywistego toru kolejowego.

2. WYKONANIE MODELU RZECZYWISTEGO TORU KOLEJOWEGO

Model odcinka rzeczywistego toru kolejowego zbudowano z dwóch szyn typu S49 o długości ok. 6,5 m każda. Szyny 9,10 (rys.1) przymocowano do podkładów drewnianych typu 4xP.

Podkłady były przytwierdzone do worków wypełnionych żwirem — modelujących podsypkę torowiska. Model toru kolejowego ułożono na betonowej podłodze hali laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Szyna 10 była umieszczona między słupami oporowymi o dużej sztywności. Do obydwu krańców szyny przyspawano śruby M64. Jedną śrubę przymocowano na stałe do słupów 11 i 12, a drugą śrubę przytwierdzono do ramy przesuwnej 13 przeznaczonej do wytwarzania naprężenia rozciągającego w badanej

szynie 10. Rama przesuwna obejmuje słup oporowy 14. Między słupem 14 a ramą 13 umieszczono siłownik hydrauliczny 15 o znamionowym zakresie $F_N = 1$ MN i tensometryczny przetwornik siły 16 również o znamionowym zakresie 1MN. Szynę badaną, siłownik, przetwornik siły i ramę ruchomą umieszczono w jednej osi. Taki układ mechaniczny umożliwi wytwarzanie osiowego naprężenia rozciągającego w szynie badanej. Jest to istotne, ponieważ naprężenia termiczne działają w osiach szyn kolejowych torów bezстыkowych.



Rys.1. Model odcinka rzeczywistego toru kolejowego

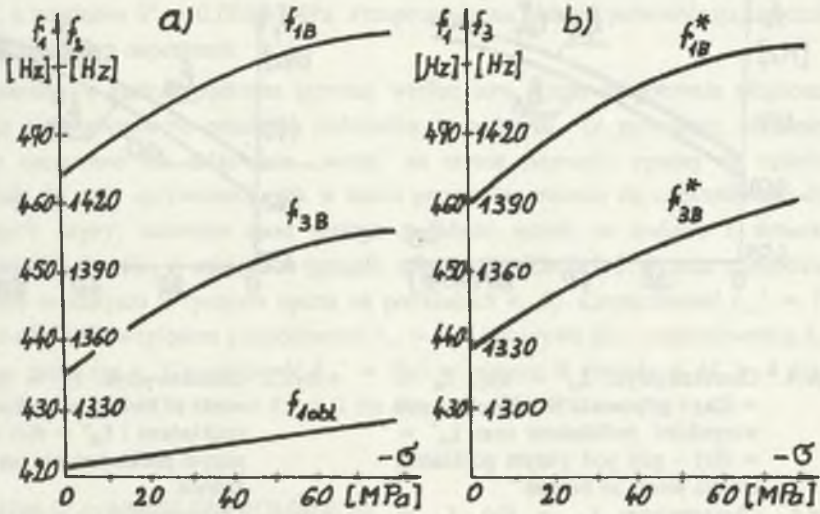
Fig.1. Model of a railway track section

3. WYKONANIE POMIARÓW

Siłę rozciągającą o określonej wartości wytwarzano za pomocą ręcznej pompy hydraulicznej, połączonej przewodami giętkimi z siłownikiem 15. Wartość siły mierzono za pomocą tensometrycznego przetwornika 16 typu CT 100, klasy 0,2 oraz mostka typu T-2.

Częstotliwość poprzecznych drgań swobodnych badanej szyny mierzono za pomocą akcelometru typu 4391 duńskiej firmy Brüel & Kjær. Ten akcelometr ma magnes trwały przeznaczony do mocowania na badanym obiekcie ferromagnetycznym. Masa akcelometru wraz z masą magnesu wynosi 16 g i jest pomijalnie mała w porównaniu z masą szyny typu S49. Zatem po przymocowaniu akcelometru do szyny nie zmienia się jej częstotliwość drgań swobodnych. Częstotliwość rezonansu własnego akcelometru typu 4391 wynosi 40 kHz, a zakres częstotliwości pomiaru przyspieszenia wynosi $0,1 \text{ Hz} \div 12 \text{ kHz}$, więc

Ponieważ smukłość przesła szyny typu S49 przymocowanej do podkładów ($l_s = 0,66$ m) wynosi zaledwie $s_s = 29$, to amplituda poprzecznych drgań szyny jest mniejsza niż próg pobudliwości zastosowanej aparatury pomiarowej. W tej sytuacji można było jedynie mierzyć przebieg przyspieszenia poprzecznych drgań szyny — przedstawiony na rys.2a i wyznaczyć widmo amplitudowo-częstotliwościowe przebiegu tego przyspieszenia.

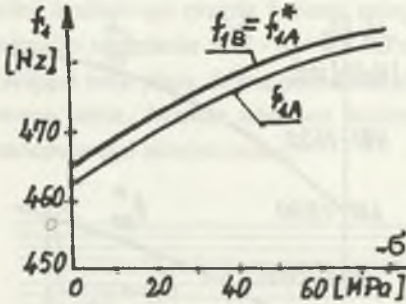


Rys.3. Charakterystyki $f_{1B} = f(\sigma)$, $f_{3B} = f(\sigma)$ oraz $f_{1obl} = f(\sigma)$ w miejscu B szyny S49 przymocowanej do podkładów typu 4xP dla przypadku: a) worki ze żwirem pod wszystkimi podkładami, b) piąty podkład bez worka ze żwirem

Fig.3. Characteristics $f_{1B} = f(\sigma)$, $f_{3B} = f(\sigma)$ and $f_{1obl} = f(\sigma)$ at the point B of the rail S49 fixed to the cross-ties type 4xP for: a) bags with gravel under all the cross-ties, b) the fifth cross-tie without a bag with gravel

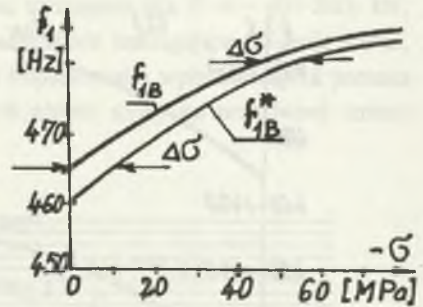
Widmo amplitudowe charakteryzuje się wieloma ekstremami o porównywalnych wartościach przy różnych częstotliwościach. Utrudnia to pomiar częstotliwości pierwszej lub wyższej (np. trzeciej) postaci poprzecznych drgań swobodnych. Z analizy matematycznego modelu szyny, przedstawionej w artykule [4], wynika, że częstotliwość f_1 pierwszej postaci poprzecznych drgań swobodnych szyny typu S49 jest w przedziale 420÷430 Hz. Mierzono zatem jako częstotliwość f_1 drgania o największej amplitudzie w zakresie częstotliwości 400÷500 Hz, a jako częstotliwość f_3 drgania o największej amplitudzie w zakresie 1200÷1500 Hz. Wykresy częstotliwości f_1 oraz f_3 zmierzonej w miejscu B szyny typu S49 oraz częstotliwości f_{1obl} obliczonej na podstawie modelu matematycznego w funkcji naprężenia rozciągającego σ , dla przypadku gdy pod wszystkimi podkładami były worki ze żwirem, przedstawiono na rys.3a. Wykresy częstotliwości $f_{1A} = f(\sigma)$ i $f_{1B} = f(\sigma)$ pierwszej

postaci drgań swobodnych, zmierzonej w sąsiednich przesłach w miejscach A i B szyny, przedstawiono na rys.4. Na rysunku 4 przedstawiono też charakterystykę $f_{1A}^* = f(\sigma)$, w przypadku gdy pod piątym podkładem nie było worka ze żwirem.



Rys.4. Charakterystyki $f_{1A} = f(\sigma)$, $f_{1B} = f(\sigma)$ - gdy worki ze żwirem są pod wszystkimi podkładami oraz $f_{1A}^* = f(\sigma)$ - gdy pod piątym podkładem nie ma worka ze żwirem

Fig.4. Characteristics $f_{1A} = f(\sigma)$, $f_{1B} = f(\sigma)$ when bags with gravel are under all the cross-ties and $f_{1A}^* = f(\sigma)$ when there is no bag with gravel under the fifth cross-tie



Rys.5. Charakterystyki $f_{1B} = f(\sigma)$ - gdy worki ze żwirem są pod wszystkimi podkładami i $f_{1B}^* = f(\sigma)$ - gdy pod piątym podkładem nie ma worka ze żwirem

Fig.5. Characteristics $f_{1B} = f(\sigma)$ when bags with gravel are under all the cross-ties and $f_{1B}^* = f(\sigma)$ when there is no bag with gravel under the fifth cross-tie

Charakterystyki $f_{1A} = f(\sigma)$ i $f_{1B} = f(\sigma)$ są podobne, lecz są przesunięte względem siebie o wartość $\Delta f = f_{1B} - f_{1A} \approx 2$ Hz. Odpowiada to różnicy naprężenia $\Delta \sigma \approx 6$ MPa dla $\sigma > -20$ MPa i $\Delta \sigma > 12$ MPa dla $\sigma < -60$ MPa. Ponieważ w szynie w miejscach A i B wytwarzano taką samą wartość naprężenia, różnica częstotliwości $\Delta f \approx 2$ Hz może być spowodowana niejednakową odległością między osiami podkładów, tzn. l_A (długość przesła A) była nieco dłuższa niż l_B (długość przesła B).

Względny przyrost częstotliwości obliczono ze wzoru

$$\Delta^0 f = \frac{f_\sigma - f_0}{f_0},$$

przy czym f_0 , f_σ oznaczają częstotliwości poprzecznych drgań swobodnych szyny odpowiednio przy naprężeniu zerowym ($\sigma = 0$) i różnym od zera ($\sigma \neq 0$). Dla szyny typu S49 zamocowanej w modelu odcinka rzeczywistego toru kolejowego przy naprężeniu rozciągającym $\sigma = -55$ MPa, względny średni przyrost częstotliwości wynosi $\Delta^0 f \approx 3,6\%$.

Czułość bezwzględna S oraz względną S^0 obliczono ze wzorów

$$S = \frac{df}{d\sigma}; \quad S^0 = \frac{d\Delta^0 f}{d\sigma}.$$

Dla szyny S49 przy naprężeniu np. $-55 < \sigma < 0$ MPa czułość bezwzględna $S \approx 0,3$ Hz/MPa, a względna $S^0 \approx 0,065\%$ /MPa. Przeprowadzone badania potwierdzają, że czułość maleje ze wzrostem naprężenia.

Niejednakowa gęstość podtorza (gruntu) wzdłuż toru i jego długostrwa eksploatacja powodują nierównomierne osiadanie podkładów w podtorzu. To powoduje, że niektóre podkłady częściowo lub całkowicie „wiszą” na szynie (szynach) opartej na sąsiednich podkładach. W celu sprawdzenia, jak w takim przypadku zmienia się częstotliwość drgań swobodnych szyny, usunięto spod piątego podkładu worek ze żwirem i zmierzono częstotliwość $f_{1A}^* = f(\sigma)$ w miejscu A (przeszło oparte na podkładach 3, 4) oraz częstotliwość $f_{1B}^* = f(\sigma)$ w miejscu B (przeszło oparte na podkładach 4, 6). Częstotliwość $f_{1A}^* = f(\sigma)$ wzrosła o ok. 2 Hz względem częstotliwości $f_{1A} = f(\sigma)$ i pokrywa się z częstotliwością $f_{1B} = f(\sigma)$ — patrz rys.4. Częstotliwość $f_{1B}^* = f(\sigma)$ w miejscu B zmalała o $\Delta f > 4$ Hz dla naprężenia $\sigma > -15$ MPa oraz o $\Delta f < 2$ Hz dla $\sigma < -70$ MPa — patrz rys.5.

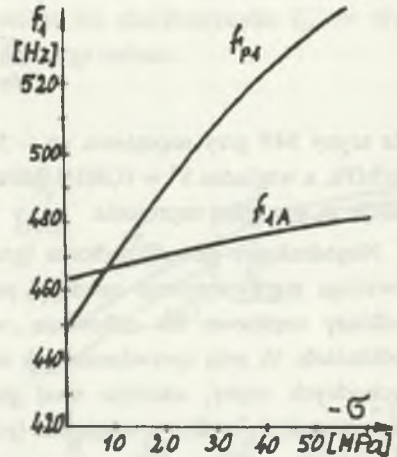
4. ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

Z analizy wyników pomiarów częstotliwości poprzecznych drgań swobodnych szyny typu S49, zamontowanej w modelu odcinka rzeczywistego toru kolejowego, wynika jednoznaczna zależność między mierzoną częstotliwością a naprężeniem osiowym szyny (rys.3, 4, 5). Na podstawie porównania wyników badań uproszczonego modelu matematycznego szyny i modelu fizycznego szyny opisanych w artykule [4] z wynikiem pomiarów przeprowadzonych na modelu odcinka rzeczywistego toru kolejowego, sformulowano następujące wnioski:

- dla szyny nie naprężonej ($\sigma = 0$), zamontowanej w torze kolejowym, częstotliwość f_{10} pierwszej postaci poprzecznych drgań swobodnych obliczona na podstawie modelu matematycznego wynosi dla szyny typu S49 $- f_{10} = 421,46$ Hz i ma wartość zbliżoną do częstotliwości obliczonej f_{10} nie naprężonego płaskownika stalowego o długości przesła $l_p = 0,15$ m (fizycznego modelu szyny kolejowej), wynoszącą $f_{10} = 420,28$ Hz; różnica częstotliwości wynosi zaledwie 0,3%,
- zmierzona częstotliwość f_{10} nie naprężonej ($\sigma = 0$) szyny typu S49, zamontowanej w modelu odcinka rzeczywistego toru kolejowego (rys.1), wynosi $f_{10} = 464$ Hz i jest

ok. 3,5% większa niż zmierzona częstotliwość stalowego płaskownika (fizycznego modelu szyny) wynosząca $f_{1p0} = 448$ Hz,

- względny przyrost obliczonej częstotliwości $\Delta^0 f_{1obl}$ drgań szyny typu S49 przy naprężeniu rozciągającym $\sigma = -55$ MPa wynosi $\Delta^0 f_{1obl} \approx 1,1\%$ i jest ok. 18 razy mniejszy niż względny przyrost częstotliwości obliczonej dla fizycznego modelu szyny (stalowego płaskownika) wynoszący $\Delta^0 f_{1pobl} \approx 20\%$,
- względny przyrost zmierzonej częstotliwości $\Delta^0 f_1$ drgań szyny typu S49 przy naprężeniu rozciągającym $\sigma = -55$ MPa wynosi $\Delta^0 f_1 \approx 3,6\%$ i jest ok. 5,6 razy mniejszy niż względny przyrost zmierzonej częstotliwości drgań fizycznego modelu szyny (stalowego płaskownika) wynoszący $\Delta^0 f_{1p} \approx 20\%$ (rys.6),



Rys.6. Charakterystyki $f_{1A} = f(\sigma)$ dla szyny S49 i $f_{1p} = f(\sigma)$ dla fizycznego modelu szyny S49 (stalowego płaskownika)
 Fig.6. Characteristic: $f_{1A} = f(\sigma)$ for the rail S49 and $f_{1p} = f(\sigma)$ for the physical model of the rail S49 (steel-flat)

- względna czułość obliczona S_{obl}^0 szyny typu S49 w zakresie naprężenia $-55 < \sigma < 0$ MPa wynosi $S_{obl}^0 \approx 0,02\%/MPa$ i jest około 18 razy mniejsza niż względna czułość obliczona S_{pobl}^0 fizycznego modelu szyny (stalowego płaskownika) wynosząca $S_{pobl}^0 \approx 0,37\%/MPa$,
- względna czułość zmierzona S^0 szyny typu S49 w zakresie naprężenia rozciągającego $-55 < \sigma < 0$ MPa wynosi $S^0 \approx 0,066\%/MPa$ i jest ok. 5,6 raza mniejsza niż względna czułość zmierzona stalowego płaskownika wynosząca $S_p^0 \approx 0,37\%/MPa$,
- zmierzona częstotliwość drgań szyny w sąsiednich przesłach (miejsca A i B na rys.1) różni się o stałą wartość ok. 2 Hz, natomiast czułość zmierzona w miejscu A jest taka sama jak w miejscu B (patrz rys.4),
- usunięcie worka spod piątego podkładu (czyli piąty podkład jest podwieszony) powoduje zmniejszenie częstotliwości poprzecznych drgań szyny w przyległym prześle (miejsce B), w porównaniu z częstotliwością drgań szyny z workami pod wszystkimi podkładami (patrz rys.5). To zmniejszenie częstotliwości przy naprężeniu $\sigma \approx -5$ MPa wynosi $\Delta^0 f_5 \approx 1\%$ (odpowiada to $\Delta\sigma \approx 10$ MPa), a przy naprężeniu $\sigma \approx -55$ MPa wynosi $\Delta^0 f_{55} \approx 0,3\%$ (również odpowiada to $\Delta\sigma \approx 10$ MPa).

5. WNIOSKI

W artykule [4] wykazano, że wyniki badań uproszczonego matematycznego modelu szyny są zgodne z wynikami pomiarów częstotliwości drgań fizycznego modelu szyny (stalowego płaskownika odpowiednio zamocowanego). Czulość metody jest duża (ok. 0,37%/MPa), a widmo amplitudowe częstotliwościowe ma wyraźne ekstremum umożliwiające jednoznaczne określenie wartości częstotliwości poprzecznych drgań swobodnych modelu w funkcji naprężenia osiowego. Wydawało się, że opracowany i wykonany model szyny jest wystarczająco dokładny. Okazuje się, że widmo amplitudowe poprzecznych drgań swobodnych szyny typu S49 zamontowanej w modelu odcinka rzeczywistego toru kolejowego ma wiele ekstremów o dużych wartościach (patrz rys.2b), co utrudnia pomiar częstotliwości pierwszej postaci drgań swobodnych szyny. Przy zerowym naprężeniu ($\sigma = 0$) częstotliwości obliczona i zmierzona drgań szyny S49 zamocowanej w modelu toru kolejowego i stalowego płaskownika odpowiednio zamocowanego (stanowiącego fizyczny model szyny) mają zbliżone wartości. Natomiast czulość przypadająca na zmianę naprężenia $\Delta\sigma = 1$ MPa, zmierzona w funkcji naprężenia σ w szynie S49, jest kilka razy mniejsza niż czulość stalowego płaskownika (fizycznego modelu szyny). Czulość zmierzona podczas badania szyny S49 przy naprężeniu $\sigma = -50$ MPa wynosi $S^0 \approx 0,05\%/MPa$ i jest ok. 7,8 raza mniejsza niż czulość $S_p^0 \approx 0,39\%/MPa$ zmierzona przy badaniu stalowego płaskownika (fizycznego modelu szyny, przy tym samym naprężeniu osiowym, czyli $\sigma = -50$ MPa). Oznacza to, że przyjęte założenia przy projektowaniu fizycznego modelu szyny kolejowej, podane w artykule [4], nie są wystarczające.

Pomiary na torze rzeczywistym są praktycznie niemożliwe, ponieważ nie są znane wartości naprężenia osiowego. Wydaje się celowe opracowanie, wykonanie i przebadanie dokładniejszego modelu fizycznego niż opisany w artykule [4].

LITERATURA

1. Albrecht W.G.: Tor bezстыkowy. WKiŁ, Warszawa 1986.
2. Krużyński M., Mazurkiewicz R.: Wpływ sił osiowych na drgania szyn kolejowych. Drogi Kolejowe '93. VII Konferencja Naukowa. Wrocław-Szklarska Poręba 1993.
3. Łażniowski T.: Elektroniczny przetwornik bezwzględnej wartości naprężenia mechanicznego w elementach stalowych. Praca dyplomowa. Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej. Pol. Śl., Gliwice 1992.
4. Parchański J.: Pomiary naprężenia metodą analizy częstotliwości drgań swobodnych. ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z. 136, Gliwice 1994.

5. Wojnarowski J.: Metodyczne ćwiczenia laboratoryjne z mechanicznej teorii maszyn. Skrypt Pol. Śl., Gliwice 1984.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zygmunt Kuśmierk

Wpłynęło do Redakcji dnia 21 kwietnia 1995 r.

Abstract

It was shown in the paper [4] that the results of rail mathematical model investigations correspond with the vibration frequency measurement results of the rail physical model (described in the above mentioned paper). The method sensitivity is high and equal to 0,37%/MPa. The higher slenderness of the tested flat the higher sensitivity of the method.

The slenderness of the rail type S49 fixed to the cross-ties is small and equal to 29. It is about four times less than the slenderness of the flat (the model of the rail S49). It is inconvenient to make measurements for the actual railway track because the values of rail axial stress are unknown. Therefore a model of railway track section 6,5 m long (Fig. 1) has been constructed and investigations have been made on it. The tested rail S49 has been lengthened with the force changing from 0 kN to 500 kN, which has caused the stress of values between 0 MPa and 80 MPa. The rail has been excited. Instantaneous values of vibrations (Fig. 2a) and amplitude spectrum (Fig. 2b) have been measured.

Frequency characteristics of free vibration first-form f_{1B} and third-form f_{3B} have been determined as a function of the axial stress. It has been made for all the cross-ties supported (Fig. 3a) and the fifth cross-tie not supported (Fig. 3b). The explicit relation between free, transverse vibration frequency of the rail S49 and the axial stress has been confirmed basing on analysis of the measurement results of vibration frequency (Figs. 3, 4 and 5). If the rail S49 is not stressed ($\sigma = 0$) the frequency $f_{1\text{obl}}$ calculated for the rail mathematical model is approximately equal to the frequency $f_{1p\text{ obl}}$ calculated for the not stressed steel flat. The measured frequency f_{10} of the not stressed rail S49, which has been the model of railway track (Fig. 1) is about 3,5% higher than the measured frequency f_{1p0} of the steel flat described in the paper [4]. The sensitivity calculated for the rail S49 in stress range - 55 < σ < 0 MPa is about 18 times lower than the sensitivity calculated for the steel flat (the rail S49 model). The rail S49 sensitivity measured in stress range - 55 < σ < 0 MPa is about 5,6 times lower than the sensitivity measured for the steel flat. The amplitude spectrum of the rail S49 vibrations has some extremes whose values are approximately equal, which makes rail axial stress measurements difficult.