

# Odpowiedź dynamiczna drogi szynowej w kierunku wzdłużnym

## Dynamic response of rail track in longitudinal direction



**Włodzimierz Czyczula**

Prof. dr hab. inż.

Politechnika Krakowska

czyczula@pk.edu.pl



**Łukasz Chudyba**

Dr inż.

Politechnika Krakowska

lchudyba@poczta.onet.pl

**Streszczenie:** Praca przedstawia analizę liniowych modeli odpowiedzi toru przy obciążeniach wzdłużnych, wynikających z rozpędzania/hamowania pociągu. Siły te przyjęto jako równomiernie rozłożone na całej długości pociągu. Analizę przeprowadzono przy założeniu, że – w krótkich przedziałach czasu – prędkość pociągu nie zmienia się istotnie; dlatego rozważana jest stacjonarna odpowiedź drogi szynowej. Analizując modele drogi szynowej bez tłumienia omówiono problem prędkości krytycznej. Przeprowadzono także analizę wpływu współczynnika tłumienia na maksymalne przemieszczenia wzdłużne. Na zakończenie sformułowano praktyczne wnioski i określono podstawowe kierunki dalszych badań tego problemu.

**Słowa kluczowe:** Droga Szynowa; Hamowanie/Rozpędzanie Pociągu; Modele Analityczne Toru; Przemieszczenia Wzdłużne Szyn

**Abstract:** The paper presents an analysis of linear models track response under longitudinal loads due to braking/accelerating of the train. Longitudinal forces are uniformly distributed on the whole length of the train. Analysis was carried out under assumption that – in the short time – train speed not changes significantly. Therefore stationary response of rail track is considered. The problem of critical speed has been analyzed. Effect of damping properties of track foundation on maximum longitudinal displacements were also considered. In summary certain practical conclusions were formulated as well as the further investigations were pointed out.

**Keywords:** Rail Track; Braking/Accelerating of Train; Analytical Track Models; Rail Longitudinal Displacements

Analiza odpowiedzi dynamicznej drogi szynowej dotyczy głównie płaszczyzny pionowej (por. np. [1,2,4,9]). Analiza w płaszczyźnie poziomej (w kierunku poprzecznym i wzdłużnym) dotyczy relatywnie niewielu prac, zarówno teoretycznych, jak i doświadczalnych (por. np. [5–7,10–11,13–14]). Prace na temat oddziaływań wzdłużnych, a ściślej hamowania i rozpędzania pociągu, dotyczą głównie dynamiki pojazdów i symulowanych przejazdów teoretycznych pociągów (por. np. [12]).

W pracy rozważany jest model drogi szynowej w kierunku wzdłużnym przy obciążeniach, wynikających z hamowania/rozpędzania pociągu. Zakłada się, że w małym przedziale czasowym podczas hamowania/rozpędzania pociągu prędkość nie zmienia się istotnie – dlatego rozważana jest stacjonarna odpowiedź drogi szynowej, zarówno w przypadku rozpędzania, jak i hamowania pociągu. Siły wzdłużne wyzna-

czane są przez pomnożenie sił pionowych przez założony współczynnik, zwany także współczynnikiem intensywności hamowania/rozpędzania.

### Model drogi szynowej i obciążenia

Droga szynowa modelowana jest jako zastępcza belka, spoczywająca na sprężysto-lepkim podłożu. Belka składa się z dwóch szyn, opisanych dwoma parametrami: sztywność wzdłużna  $EA$  (gdzie  $E$  – moduł Younga stali szynowej [ $N/m^2$ ],  $A$  – pole powierzchni przekroju poprzecznego dwóch szyn [ $m^2$ ]) oraz masę jednostkową  $m$  [ $kg/m$ ], która dotyczy zarówno masy jednostkowej dwóch szyn, jak również, ewentualnie, masy podkładów i złączek, przypadających na jednostkę długości toru.

Podłoże szynowe opisane jest dwoma parametrami: jednostkową sztywnością  $k$  [ $N/m^2$ ] oraz jednostkowym współczynnikiem tłumienia  $c$  [ $Ns/m^2$ ].

Parametry te charakteryzują wzdłużne właściwości przytwierdzeń szyn do podkładów oraz opory wzdłużne przy ruchu podkładów w podsypce. Rozważane są dwie hipotezy wpływu obciążenia na sztywność wzdłużną podłoża szynowego: sztywność nie zależy od obciążenia pionowego, jak również sztywność wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia pionowego. Obie hipotezy znajdują potwierdzenie w badaniach doświadczalnych, choć z większości badań wynika, że wpływ ten jest znikomy i założenie o sztywności nie zależnej od obciążenia pionowego jest uzasadnione[5]. Tym niemniej, w toku dalszych rozważań, będziemy analizować obydwie przypadki. W odniesieniu do pozostałych parametrów drogi szynowej zakładamy, że są stałe wzdłuż toru.

Jak już wspomniano, obciążenie wzdłużne będzie rozważane jako siły rozpędzania i hamowania pociągu w małych przedziale czasu, w którym nie

zmienia się istotnie prędkość pociągu. W pracy będzie rozważany następujący model obciążenia:

1. Siły wzdłużne na styku kół z szynami są równomiernie rozłożone na całej długości pociągu. Założenie to, w rozwiązaniu statycznym, było zweryfikowane w pracy [5]. Wykazano, że równomierne obciążenie w stosunku do – statycznie równoważnego - obciążenia dyskretnego nie wprowadza istotnych błędów. Dotyczy to zwłaszcza strefy maksymalnych wartości przemieszczeń wzdłużnych.
2. Obciążenie wzdłużne  $\theta$  [N/m] zależy od obciążenia pionowego  $q$  [N/m], a zależność tę opisuje formuła:

$$\theta = \mu \cdot q \quad (1)$$

gdzie

$\mu$  – bezwymiarowy współczynnik (mniejszy od współczynnika tarcia ślizgowego).

## Droga szynowa bez tłumienia i przy sztywności toru niezależnej od obciążenia pionowego ( $k(x)=k_o=const.$ )

Równanie ruchu toru bez tłumienia, przy stałej sztywności podłoża szynowego  $k_o$  i obciążeniu  $\theta$ , równomiernie rozłożonym na całej długości pociągu  $2l_t$ , ma postać (por. [5]):

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - k_o u = -\theta(x, t); \quad \text{pod pociągiem (2a)}$$

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - k_o u = 0; \quad \text{poza pociągiem (2b)}$$

gdzie:

$u(x, t)$  – przemieszczenie wzdłużne zastępczej belki (szyn), inne oznaczenia – jak w rozdziale poprzednim.

W ruchomym układzie współrzędnych ( $\eta = u$ ,  $\xi = x - vt$ ), którego środek znajduje się w środkowym punkcie pociągu, gdzie  $v$  – prędkość pociągu, jeśli obciążenie nie zmienia się w czasie, równania (2) można zapisać w postaci równań zwyczajnych:

$$\frac{d^2 u}{d\xi^2} - \beta^2 u = -\frac{\theta}{EA - mv^2}; d|\xi| \leq l_t, \quad (3a)$$

$$\frac{d^2 u}{d\xi^2} - \beta^2 u = 0; d|\xi| > l_t, \quad (3b)$$

gdzie:

$$\beta = \sqrt{\frac{k_o}{EA - mv^2}} \quad (4)$$

Łatwo zauważyć, że równania (3) mają sens, gdy prędkość pociągu  $v$  jest mniejsza od wartości krytycznej  $v_{cr}$ , tzn.:

$$v < v_{cr} = \sqrt{\frac{EA}{m}} \quad (5)$$

Rozwiązanie ogólne równania (3.2a), uwzględniając całkę szczególną, można napisać w postaci:

$$u(\xi) = C_1 \cdot ch(\beta\xi) + C_2 \cdot sh(\beta\xi) + \frac{\theta}{k_o}; d|\xi| \leq l_t, \quad (6a)$$

$$u(\xi) = D_1 \cdot e^{-\beta(\xi-l_t)} + D_2 \cdot e^{\beta(\xi-l_t)}; d|\xi| > l_t, \quad (6b)$$

gdzie:  $C_1, C_2, D_1, D_2$  – stałe.

Symetryczne rozwiązanie względem punktu  $\xi = 0$ , biorąc pod uwagę dodatnie wartości  $\xi$ , można uzyskać przyjmując następujące warunki brzegowe i warunki ciągłości funkcji i jej pochodnych na końcu pociągu:

$$\begin{aligned} & gdy \xi \rightarrow 0^+; \frac{du}{d\xi} \rightarrow 0; \\ & gdy \xi \rightarrow \infty; u \rightarrow 0; \\ & u(\xi = l_t^+) = u(\xi = l_t^-); \\ & \frac{du}{d\xi}(\xi = l_t^+) = \frac{du}{d\xi}(\xi = l_t^-) \end{aligned} \quad (7)$$

Dla tych warunków granicznych stacjonarne rozwiązanie problemu, dla dodatnich wartości  $\xi$ , przyjmie postać:

$$u(\xi) = \frac{\theta}{k_o} \cdot \left( 1 - \frac{ch(\beta\xi)}{ch(\beta l_t) + sh(\beta l_t)} \right); gdy \xi \leq l_t, \quad (8a)$$

$$u(\xi) = \frac{\theta}{k_o} \cdot \left( \frac{sh(\beta l_t)}{ch(\beta l_t) + sh(\beta l_t)} \right) \cdot e^{-\beta(\xi-l_t)}; gdy \xi > l_t, \quad (8b)$$

i rozwiązanie jest symetryczne względem punktu  $\xi = 0$ .

## Rozwiązanie bez tłumienia przy sztywności zależnej od obciążenia pionowego

Zakładamy, że sztywność wzdłużna podłoża szynowego pod pociągiem, na całej jego długości, ma postać:

$$k_p = k_o + \frac{q_p \cdot \varphi}{u_{lim}} [\text{N/m}^2] \quad (9)$$

gdzie:  $k_o$  – sztywność wzdłużna toru nieobciążonego [N/m<sup>2</sup>] (por. równania (2)),  $q_p$  – jednostkowe obciążenie pionowe pociągu, przypadające na podkłady [N/m],  $\varphi$  [-],  $u_{lim}$  [m] – współczynnik tarcia podkładu o podsypkę przy obciążeniach wzdłużnych oraz graniczna wartość przemieszczenia sprężystego podkładu w podsypce w kierunku wzdłużnym.

Wszystkie te wartości muszą być wyznaczone doświadczalnie, w warunkach laboratoryjnych (por. np. [5]). Przy tym założeniu równania (2) przyjmą postać:

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - k_p u = -\theta(x, t); \quad \text{pod pociągiem (10a)}$$

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - k_o u = 0; \quad \text{poza pociągiem (10b)}$$

W ruchomym układzie współrzędnych ( $\eta = u$ ,  $\xi = x - vt$ ), gdzie  $v$  – prędkość pociągu, jeśli obciążenie nie zmienia się w czasie, równania (10) można zapisać w postaci równań zwyczajnych:

$$\frac{d^2 u}{d\xi^2} - \beta_p^2 u = -\frac{\theta}{EA - mv^2}; d|\xi| \leq l_t, \quad (11a)$$

$$\frac{d^2 u}{d\xi^2} - \beta^2 u = 0; d|\xi| > l_t, \quad (11b)$$

$$\beta_p = \sqrt{\frac{k_p}{EA - mv^2}} \quad (12)$$

$\beta$  – jak we wzorze (4).

Jak widać, również w przypadku zmiennej sztywności podłoża szyno-

wego, prędkość krytyczna ma tę samą wartość jak w przypadku stałej sztywności (por. wzór (5) i (12)).

Stosując ten sam sposób rozumowania oraz te same warunki graniczne, co w przypadku stałej sztywności wzdłużnej, rozwiązanie problemu, tzn. stacjonarna odpowiedź toru przy obciążeniu wzdłużnym równomiernie rozłożonym wzdłuż pociągu, dla dodatnich wartości argumentu  $\xi$ , otrzymała postać:

$$u(\xi) = \frac{\theta}{k_p} \cdot \left( 1 - \frac{ch(\beta_p \xi)}{ch(\beta_p l_i) + \omega \cdot sh(\beta_p l_i)} \right); gdy \xi \leq l_i \quad (13a)$$

$$u(\xi) = \frac{\theta}{k_p} \cdot \left( \frac{\omega \cdot sh(\beta_p l_i)}{ch(\beta_p l_i) + \omega \cdot sh(\beta_p l_i)} \right) \cdot e^{-\beta(\xi-l_i)}; gdy \xi > l_i \quad (13b)$$

gdzie  $\omega = \beta_p / \beta$ .

i rozwiązanie jest symetryczne względem punktu  $\xi=0$ .

Jak widać struktura wzorów (13), z uwagi na występujące funkcje, jest identyczna jak wzorów (8).

Podsumowując rozważania na temat odpowiedzi toru pod jednorodnym obciążeniem jednostkowym przy braku tłumienia można sformułować następujące spostrzeżenia:

1. Krytyczna prędkość dla toru obciążanego w kierunku wzdłużnym nie zależy od sztywności podłoża szyny. Dotyczy to zarówno hipotezy stałej sztywności, niezależnej od obciążenia pionowego, jak i przypadku, w którym obciążenie pionowe zwiększa sztywność wzdłużną podłoża szynowego. Dla typowych parametrów konstrukcji nawierzchni prędkość krytyczna jest na poziomie 4000 – 7000 km/h (wzór (5)). Oznacza to, że prędkość krytyczna nawierzchni w kierunku wzdłużnym jest znacząco wyższa niż w przypadku obciążeń pionowych i poprzecznych do osi toru. (prędkość krytyczna na poziomie 1000-1500 km/h, por. np. [1,4,8]). Obliczenia pokazują, że dla typowych parametrów toru, przy prędkości do około 500 km/h, współczynnik dynamiczny, związany ze wzrostem przemieszczeń wzdłużnych można zaniedbać i traktować odpowiedź toru jak

przy obciążeniu statycznym. Dotyczy to obciążenia równomiernie rozłożonego wzdłuż pociągu i niezmiennego podczas ruchu pociągu.

2. Stacjonarna odpowiedź toru, opisana równaniami (8) oraz (13) należy traktować jako ściśle rozwiązanie problemu. Rozwiązanie to, w przypadku obciążenia statycznego, zostało zweryfikowane numerycznie [5]. Biorąc pod uwagę spostrzeżenia, sformułowane powyżej, można stwierdzić, że rozwiązanie to dobrze opisuje przypadki występujące obecnie w kolejnictwie (prędkości poniżej 300-350 km/h). Na podstawie analiz numerycznych wykazano również dobrą zgodność rozwiązania ze statycznie równoważnym obciążeniem od układu sił skupionych [5], zwłaszcza w strefie maksymalnych przemieszczeń wzdłużnych toru.

## Nawierzchnia z tłumieniem przy obciążeniu stałym

Równanie ruchu w przypadku ogólnym, gdy rozważamy tłumienie podłoża szynowego  $c$  [Ns/m<sup>2</sup>], a obciążenie jednostkowe jest opisane dowolną funkcją  $\theta(x,t)$ , ma postać:

$$-EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\partial u}{\partial t} + k_o u = \theta(x,t) \quad (14)$$

Przyjęto, że sztywność wzdłużna podłoża szynowego nie zależy od obciążenia, dlatego na całej długości analizowanego odcinka toru jest stała i wynosi  $k_o$ . W ruchomym układzie współrzędnych ( $\eta = u$ ,  $\xi = x - vt$ ), w przypadku stałego, niezmiennego w czasie obciążenia, równanie (14) można zapisać w postaci następującego równania zwyczajnego:

$$(mv^2 - EA) \frac{d^2 u}{d\xi^2} - cv \frac{du}{d\xi} + k_o u = \theta(\xi) \quad (15)$$

Obliczenia pokazały, że rozwiązanie (13), dla typowych konstrukcji nawierzchni i obciążenia, jest praktycznie zerowe dla punktów odległych od końców pociągu o więcej niż 200-250 m. Dlatego przyjmujemy, że zarówno

rozwiązanie równania (15), tzn. funkcja przemieszczeń wzdłużnych, jak i obciążenie można zapisać w postaci nieskończonego szeregu Fouriera, ale w skończonym przedziale  $[0, \lambda]$ :

$$\theta(\xi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} (a_i \cdot \cos \Omega_i \xi + b_i \cdot \sin \Omega_i \xi);$$

$$u(\xi) = \frac{u_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} (A_i \cdot \cos \Omega_i \xi + B_i \cdot \sin \Omega_i \xi);$$

$$\xi \in [0, \lambda]; \Omega_i = \frac{2\pi \cdot i}{\lambda} \quad (16)$$

Po zróżniczkowaniu funkcji (16), podstawieniu otrzymanych wyrażeń do równania (15) oraz po uporządkowaniu, uzyskamy następujący układ równań algebraicznych na nieznanne wartości  $A_i, B_i$  oraz  $u_0$ :

$$[-(mv^2 - EA) \cdot \Omega_i^2 + k] A_i + [-cv \Omega_i] B_i = a_i$$

$$[cv \Omega_i] A_i + [-(mv^2 - EA) \cdot \Omega_i^2 + k] B_i = b_i$$

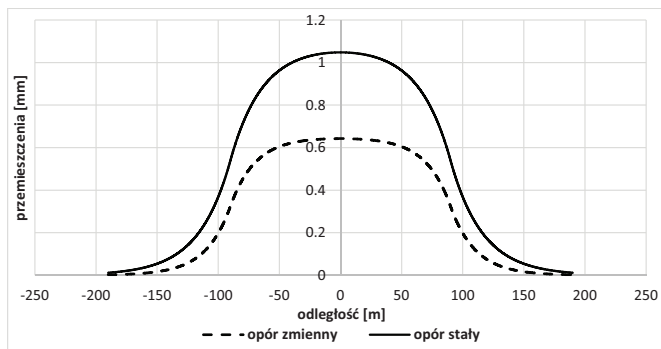
$$u_0 = \frac{a_0}{k} \quad (17)$$

Liczbę  $a_0$ , jak również współczynniki  $a_i$  oraz  $b_i$  dla prostokątnego rozkładu obciążenia wzdłużnego na długości całego pociągu – można wyznaczyć ze wzorów analitycznych z dowolnie wysoką dokładnością i dla skończonej liczby współczynników Fouriera. Wstępne obliczenia pokazały, że przy założeniu 1000 współczynników Fouriera ( $i = 1, \dots, n$ ,  $n = 1000$ ), przy przyjęciu  $\lambda =$  długość pociągu  $+ 2 \cdot 250$  m, rozwiązanie (13) jest praktycznie identyczne z rozwiązaniem (15), przy wykorzystaniu wzorów (16) i układu równań (17), dla współczynnika tłumienia podłoża  $c=0$ .

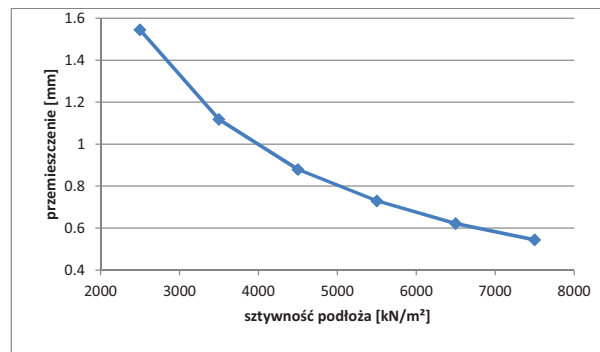
## Przykłady obliczeń

Obliczenia przeprowadzono dla następujących parametrów drogi szynowej i obciążenia (na podstawie [3,5] oraz innych prac własnych Politechniki Krakowskiej):

1. Droga szynowa: szyny 60E1,  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>,  $A = 2 \cdot 7687 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>,  $m = 2 \cdot 60$  kg/m (szyny)  $+ 320$  kg/0,6m (podkłady typu PS-94)  $= 653,3$  kg/m (także same szyny,  $m = 120$  kg/m), sztywność wzdłużna podłoża szynowego  $k = 2500 - 7520$  kN/m<sup>2</sup>, jednostkowy współczynnik tłumienia podłoża



1. Rozkład przemieszczeń wzdłużnych przy hamowaniu pociągu EMU-250 (Pendolino) przy przyjęciu dwóch hipotez wpływu obciążenia pionowego na sztywność wzdłużną podłoża szynowego



2. Wpływ sztywności wzdłużnej podłoża szynowego na maksymalne przemieszczenie pod pociągiem EMU-250 (Pendolino) przy prędkości 250 km/h

$c = 3511 \text{ Ns/m}^2$  (wartość podstawowa), także aż do  $1755500 \text{ Ns/m}^2$  (wartość 500 razy większa od podstawowej);

2. Obciążenie: pociąg EMU-250 (Pendolino), o rozstawie skrajnych osi  $2l_t = 185 \text{ m}$ , 28 osi  $\cdot 160 \text{ kN/os}$ , jednostkowe obciążenie pionowe  $q = 24,22 \text{ kN/m}$ , jednostkowe stałe obciążenie wzdłużne  $\theta = \mu q$ ,  $\mu = 0,2$ ;  $\theta = 4,84 \text{ kN/m}$ ;
3. Inne parametry: prędkość pociągu  $v$  – do  $850 \text{ km/h}$ ; liczba współczynników Fouriera  $n$  – do  $1000$ .

Na rysunku 1. pokazano funkcje przemieszczeń wzdłużnych toru przy hamowaniu pociągu Pendolino w przypadku hipotezy stałej sztywności podłoża ( $k_o = 4500 \text{ kN/m}^2$ ) oraz zmiennej sztywności – poza pociągiem  $4500 \text{ kN/m}^2$ , a pod pociągiem  $k_p = 7520 \text{ kN/m}^2$  (wartość tę przyjęto na podstawie nielicznych badań doświadczalnych, które potwierdzają tę hipotezę – na podstawie [5]).

W przypadku zmiennej sztywności podłoża przemieszczenia wzdłużne są znacząco mniejsze – w analizowanym przykładzie o około 40%. Z inżynier-

skiego punktu widzenia hipoteza o stałej sztywności, jako dająca wyższe wartości przemieszczeń, jest bardziej przydatna – dlatego dalsze obliczenia będą prowadzone przy założeniu  $k = k_o = \text{const}$ .

Na rysunku 2 pokazano wpływ sztywności podłoża na maksymalne przemieszczenie wzdłużne. Wartości  $k = 4500 \text{ kN/m}^2$  odpowiada dobrze utrzymany tor, wartości  $7500 \text{ kN/m}^2$  – bardzo dobrze utrzymany tor, natomiast wartości  $3500 \text{ kN/m}^2$  i poniżej, średnio i źle utrzymany tor. Jak widać wpływ sztywności wzdłużnej na maksymalne przemieszczenia jest znaczący. Ze wzorów (8) i (13) widać, że intensywność obciążenia  $\theta$  jest wprost proporcjonalna do przemieszczeń – zatem pokazywanie tej zależności graficznie nie ma sensu.

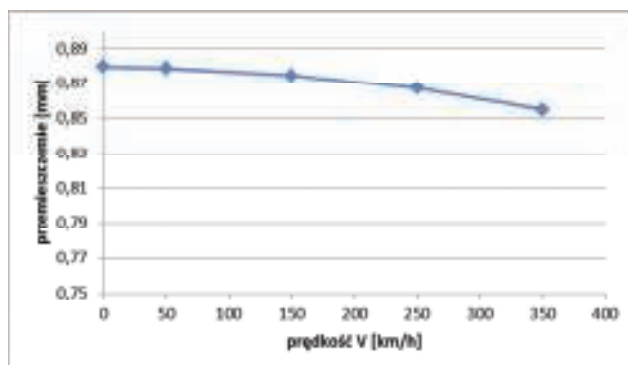
Jak już zaznaczono prędkość krytyczna w przypadku obciążeń wzdłużnych, określona przy braku tłumienia podłoża szynowego jest bardzo wysoka i znacząco przekracza obecne prędkości eksploatacyjne. Wprowadzając podstawową wartość tłumienia na podstawie badań, tzn.  $c = 3511 \text{ Ns/m}^2$ , uzyskuje się stałą wartość maksymal-

nych przemieszczeń aż do ponad  $500 \text{ km/h}$  – zmiany mniejsze od ułamków promila. Dopiero 500-krotne zwiększenie współczynnika tłumienia powoduje zmniejszanie się maksymalnego ugięcia; przy prędkości  $350 \text{ km/h}$  spadek jest na poziomie zaledwie 3%. Efekt ten obrazuje rysunek 3.

## Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono zagadnienie odpowiedzi drogi szynowej przy obciążeniach wzdłużnych. Analizie poddano trzy liniowe modele analityczne: dwa, dotyczące toru bez tłumienia podłoża, przy dwóch hipotezach wpływu obciążenia pionowego na sztywność wzdłużną oraz jeden dla drogi szynowej z tłumieniem. Obciążenie wzdłużne przyjęto jako stałe, niezmiennie w czasie i równomiernie rozłożone na całej długości pociągu. Z przeprowadzonej analizy wynikają następujące wnioski:

1. Prędkość krytyczna przy obciążeniach wzdłużnych, niezależnie od hipotezy wpływu obciążenia pionowego na sztywność wzdłużną podłoża szynowego, jest wielokrotnie wyższa od prędkości krytycznej w przypadku obciążeń pionowych i poprzecznych. Prędkość krytyczna zależy jedynie od sztywności wzdłużnej szyn i masy, uczestniczącej w drganiach wzdłużnych toru.
2. Konsekwencją tego jest fakt, że – wraz ze wzrostem prędkości – w bardzo niewielkim stopniu zmienia się kształt funkcji przemieszczeń, a ich maksymalna wartość



3. Wpływ prędkości pociągu na maksymalne przemieszczenie wzdłużne (współczynnik tłumienia 500 razy wyższy od podstawowego)

jest stała do prędkości powyżej 500 km/h z dokładnością do ułamków promili.

3. Wprowadzenie tłumienia o wartości współczynnika, wynikającego z badań doświadczalnych, nie zmienia wpływu prędkości na maksymalne ugięcia. Dopiero przy bardzo dużym tłumieniu (współczynnik tłumienia aż 500-krotnie wyższy od podstawowego, wynikającego z badań doświadczalnych) występują nieznaczne zmiany – przy prędkości 350 km/h zmiana w stosunku do prędkości bliskiej zeru to zaledwie 3%.
4. W zastosowaniach inżynierskich, przy analizie odpowiedzi toru na stałe (niezmiennie w czasie) obciążenia, wynikające z hamowania i rozpędzania pociągu, można stosować model statyczny, w którym istotne są trzy parametry: intensywność obciążenia wzdłużnego, wzdłużna sztywność podłoża i sztywność wzdłużna szyn.
5. Dalsze prace autorów w tym zakresie będą ukierunkowane na badania efektu obciążeń zmiennych w czasie, analizie zmiennego rozkładu obciążenia wzdłuż pociągu oraz zmianie prędkości w trakcie rozpędzania i hamowania pociągu, czyli analiza stanów niestacjonarnych. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Bogacz R., Czyczuła W. Response of beam on visco-elastic foundation to moving distributed load. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2008, 46, 4, pp. 63-775
- [2] Bryja D., Popiołek A. – Analiza drgań pojazdów kolejowych w trakcie ich przejazdu przez nierówność progową toru. *Przegląd Komunikacyjny*, 2015, nr 9, s. 68-72
- [3] Czyczuła W., Bogacz R. i wsp. Nawierzchnia kolejowa o podwyższonym standardzie i zmniejszonym oddziaływaniu na środowisko. Raport Politechniki Krakowskiej, 2013

- [4] Czyczuła W., Koziol P., Kudła D., Lisowski S. Analytical evaluation of track response in vertical direction due to moving load. *Journal of Vibration and Control*, 2017, 23, 18, pp. 2989-3006
- [5] Czyczuła W. – Tor bezстыkowy. Książka akademicka, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2002
- [6] Grassie S.L. The dynamic response of railway track to high frequency lateral excitation. *Journal of Mechanical Engineering Sciences*, 1982, 24,2, pp. 91-96
- [7] Hunt G.A. Dynamic analysis of railway vehicle/track interaction forces. Doctoral thesis, Loughborough University, 1986
- [8] Kerr A.D. The continuously supported rail subjected to axial force and moving load. *Int. Journal of Mechanical Science*, 1972, 14, pp. 71-78
- [9] Koziol P. Wavelet approach for vibration analysis of beam-soil structures. *Vibration of dynamically loaded systems*. VDM Verlag, Dr Muller, Saarbrücken, 2010
- [10] Kostovasilis D., Thompson D. The effect of vertical-lateral coupling vibration of rails including initial curvature. *Proc. of 22th Int. Congress of Sound and Vibrations*, 2015, pp. 1-8
- [11] Markine V., Esveld C. Analysis of longitudinal and lateral behavior of CWR track using a computer system Longin. Delft University of Technology report, 1998
- [12] Piechowiak T. Analiza symulacyjna wpływu wybranych parametrów hamulca pneumatycznego na skuteczność jego działania. *Pojazdy Szynowe*, 2008, nr 1, s. 14-25
- [13] Van M.A. Stability of CWR track. PhD Thesis, Delft University of Technology, 1997
- [14] Wei X., Wang P. Calculation and study of longitudinal forces of CWR track on deck arch bridge. *Third International Conference of Transportation Engineering*, Changdu, China, 2011

## Poznańska Kolej Metropolitalna: We wrześniu pojedziemy do Swarzędza. A już w grudniu do Wrześni?

Norbert Kowalski, Głos Wielkopolski, 13.08.2018

Od dwóch miesięcy funkcjonuje Poznańska Kolej Metropolitalna. Do tej pory projekt funkcjonuje bez poważnych zastrzeżeń, a już we wrześniu pociągi kolei metropolitalnej zaczną dojeżdżać do Swarzędza. Niewykluczone, że jeszcze w grudniu do projektu dołączy Września. W kolejce są też inne miasta. Ogólny odbiór kolei metropolitalnej jest pozytywny wśród mieszkańców, ale prawdziwy sprawdzian będzie dopiero od września i wtedy będziemy mogli się przekonać, jak ona funkcjonuje (...).

## Politechnika Śląska przygotuje koncepcję kolei metropolitalnej

tos/mat.prasowe, Dziennik Zachodni, 1.08.2018

Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolia w poniedziałek 30. lipca rozstrzygnęła przetarg na opracowanie koncepcji Kolei Metropolitalnej. Do postępowania zgłosiły się dwie firmy, a najkorzystniejszą ofertę przedstawiła Politechnika Śląska. Dokument zostanie opracowany za ponad 233 tys. zł. Koncepcja odpowie nam na najważniejsze pytania dotyczące organizacji transportu szynowego na terenie Metropolii, by mógł on realnie konkurować z samochodami – przypomina Grzegorz Kwitek, członek zarządu Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii, który zajmuje się sprawami związanymi z transportem publicznym (...).

## Szynobus kursuje od środy po wyremontowanych torach na odcinku Opole – Szydłów

Sławomir Draguła, nto.pl, 1.08.2018

PKP Polskie Linie Kolejowe zakończyły kolejny etap remontu linii kolejowej Opole – Nysa. Efektem jest przywrócenie od środy (1.08) połączeń kolejowych na odcinku między Opolem i Szydłowem (...). Dzięki zakończonym pracom pomiędzy Opolem i Szydłowem pasażerowie korzystają już z wygodniejszych peronów na stacji w Komprachcicach i przystanku Opole Chmielowice. Są tam wiaty i tablice informacyjne. Całość dostosowana jest do obsługi osób o ograniczonych możliwościach poruszania się. Przebudowa toru na odcinku Opole – Szydłów to w m.in. montaż 7 nowych rozjazdów, ułożenie 13 tysięcy podkładów, 18 kilometrów szyn oraz wysypanie ponad 12 tys. ton tłuczni (...).