

Skuteczność obciążenia mostów kolejowych

The effectiveness of the load of railway bridges



Czesław Machelski

Prof. dr hab. inż.

Politechnika Wroclawska,
Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego; Katedra Mostów i Kolei

czeslaw.machelski@pwr.edu.pl



Czesław Wolek

dr inż.

Politechnika Wroclawska,
Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego; Zakład Dróg i Lotnisk

czeslaw.wolek@pwr.edu.pl

Streszczenie: Bezpośrednie porównywanie ze sobą złożonych układów sił występujących w schematach obciążeń mostów kolejowych nie jest możliwe. Każdy z układów sił ruchomych obciążenia mostów charakteryzuje się inną strukturą i odmiennymi parametrami geometrycznymi. Dopiero sprowadzanie takiego układu do jednego rodzaju, np. obciążenia zastępczego, pozwala na porównywanie skuteczności wybranych grup obciążeń. W pracy zastosowano do tego celu mnożnik obciążenia z dwoma kryteriami analizy i przy przyjęciu schematu statycznego elementów mostu w postaci belki swobodnie podpartej. Wyniki analiz porównawczych: obciążeń eksploatacyjnych, wzorcowych i projektowych przyjmowanych do projektowania, wskazują na największą ich skuteczność, w przypadku elementów krótkich (poprzecznic i podłużnic) oraz mostów małych rozpiętości. W tych rodzajach elementów wykazano słabe odwzorowanie obciążeń wzorcowych i projektowych w odniesieniu do lokomotyw eksploatowanych na liniach PKP.

Słowa kluczowe: Obciążenia ruchome mostów; Analiza porównawcza; Mnożnik obciążeń

Abstract: A direct comparison of complex systems of forces occurring in the schemes loads of railway bridges is not possible. Each of the systems of movable forces of load bridge has a different structure and different geometrical parameters. Only bringing such a system into one type, for example dummy load, enables to compare the effectiveness of selected groups of loads. The multiplier load of two criteria analysis and assuming static scheme bridge elements in the form of a simply supported beam were applied in this study. The results of the comparative analysis: operational and standard loads adopted for the design, indicate that most of their effectiveness in the event of short elements (transoms and stringers) and small bridges span. In these types of elements poor representation of load model and design for locomotives operated on lines of the Polish State Railways was demonstrated.

Keywords: Load movable bridges; Comparative analysis; Multiplier loads

Bezpośrednie porównywanie ze sobą złożonych układów sił występujących w schematach obciążeń normowych, projektowych, wzorcowych i eksploatacyjnych jako obciążeń mostów kolejowych i drogowych nie jest łatwe, wymaga zastosowania procedury porównawczej [1]. Każdy z układów sił ruchomego obciążenia mostów charakteryzuje się bowiem inną strukturą i odmiennymi parametrami geometrycznymi [4]. Dopiero sprowadzanie takiego układu do jednego rodzaju, np. obciążenia zastępczego [2], pozwala na porównywanie efektów wybranych grup obciążeń. Istotne przy tym jest wybór kryterium wyznaczania obciążenia zastępczego i schematu statycznego analizowanego elementu mostu.

Do porównywania dwóch schematów sił służy mnożnik obciążenia określony w pracy [1]. Przy jego obliczaniu używa się analogicznych kryteriów jak w przypadku obciążeń zastępczych [2]. Jako kryteria obliczeniowe w pracy przyjęto momenty zginające z ustawieniem środkowym obciążenia oraz siły poprzeczne w skrajnym położeniu obciążenia. W obliczeniach zastosowano najprostszy model statyczny elementu belki Bernoulliego o schemacie swobodnie podpartym – często stosowany w projektowaniu elementów pomostu. Taki schemat występuje również w znacznej liczbie dźwigarów głównych mostów kolejowych [1]. Rzadziej stosuje się jako kryterium obliczeniowe ugięcia [1].

Ważną cechą obydwu miar po-

równanych obciążeń (zastępczego i mnożnika) jest uzyskiwanie identycznego wyniku porównania, gdy do ich wyznaczania stosuje się jednakowe kryterium. Częściej stosowaną w praktyce miarą jest mnożnik obciążenia [3], co wykorzystano w niniejszej pracy. Analizowane są trzy grupy obciążeń ruchomych mostów kolejowych: eksploatacyjne (w postaci schematów rzeczywistych pojazdów), wzorcowe (o geometrii nawiązującej do pojazdów rzeczywistych) oraz projektowe (schemat UIC [3]).

Analiza porównawcza układu sił

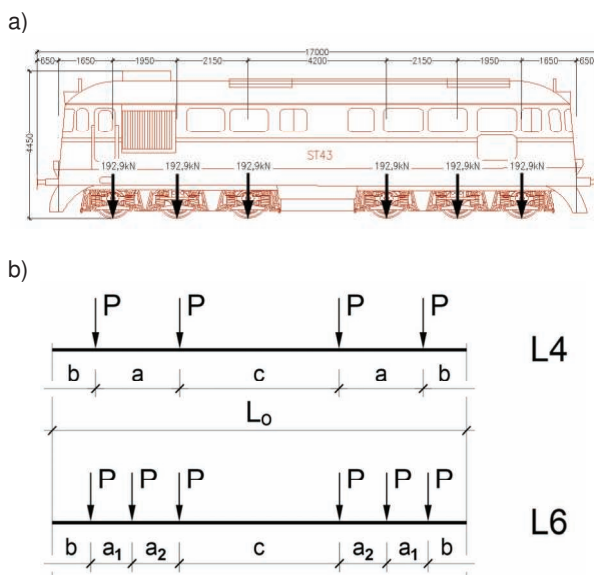
W pracy rozpatruje się wybrane, najcięższe przypadki lokomotyw eksploatowanych na liniach PKP - zesta-

Tab. 1. Charakterystyki lokomotyw czteroosiowych L4

Lp	Obciążenia			Geometria lokomotywy [m]				Nazwa
	G [ton]	P [ton]	q [ton/m]	a	b	c	L _o	
1	87	21,75	4,443	2,90	3,39	7,00	19,58	BR 189
2	84	21,00	5,018	2,85	2,945	5,15	16,74	EP 09
3	80	20,00	5,027	3,05	2,157	5,50	15,915	EU 07
4	86	21,50	4,550	2,60	2,955	7,79	18,90	E 186
5	89	22,25	4,472	2,75	3,325	7,75	19,90	E4MSU
6	88	22,00	4,444	2,80	3,15	7,90	19,80	Gamma
7	90	22,50	4,742	3,00	3,24	6,50	18,98	Loco-A

Tab. 2. Charakterystyki lokomotyw sześćoosiowych L6

Lp	Obciążenia			Geometria lokomotywy [m]					Nazwa
	G [ton]	P [ton]	q [ton/m]	a ₁	a ₂	b	c	L _o	
1	121,3	20,22	5,968	1,95		2,965	6,60	20,33	Dragon
2	124,2	20,70	6,606	2,40		1,925	6,15	18,80	E31
3	120,0	20,00	6,237	1,75		2,72	6,80	19,24	ET 22
4	120,0	20,00	7,059	1,80	2,10	2,325	4,55	17,00	SM 31
5	118,0	19,67	6,942	1,95	2,15	2,30	4,20	17,00	ST 34
6	118,5	19,75	6,874	2,00		2,29	4,66	17,24	S200
7	100,9	18+15	7,914	1,55		1,86	2,59	12,51	EDK



1. Parametry techniczne taboru kolejowego
a) lokomotywa typu ST43; b) schematy obciążeń

wiono je w tabelach **1** i **2**. Schematy kolejowych obciążeń to układy sił skupionych, które można zgrupować w dwóch typach: czteroosiowe (oznaczane dalej jako L4) i sześćoosiowe (oznaczane jako L6). Geometrię tych pojazdów przedstawiono na rysunku 1, gdzie: *a* – rozstaw osi w wózku jezdnym, *2b* – odległość pomiędzy skrajnymi osiami w połączeniu pojazdów (zderzaków), *c* – odległość pomiędzy osiami wewnętrznymi pojazdu. Wy-

miary te tworzą długość pojazdu *L_o*. Na rysunku **1** przedstawiono przykład geometrii lokomotywy ST43 i rozstawy sił skupionych jako oddziaływań osi pojazdów. Z danych zawartych w tabelach **1** i **2** wynika ich różnorodność geometryczna oraz obciążeń osi ujętych w wartościach *P*.

Ciężar pojazdu *G*, składa się *n* nacisków na osie o wartości *P* (w praktyce podawanych w tonach, jak również w pracy). Parametry zamieszczone w

tabelach **1** i **2** służą do określenia stosowanej w praktyce kolejowej charakterystyki technicznej pojazdu ujętej w zależności

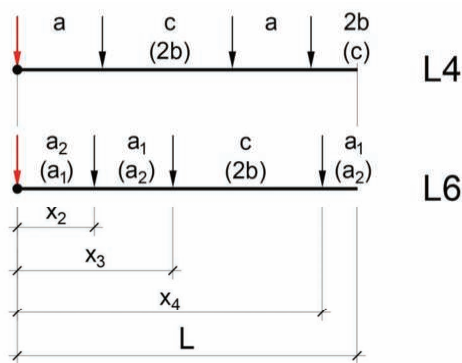
$$q = \frac{G}{L_o} = n \frac{P}{L_o} \quad [\text{ton/m}]. \quad (1)$$

Nacisk osi *P* i ciężar całkowity pojazdu *G* oraz obliczona ze wzoru (1) wartość zastępczego obciążenia rozłożonego *q* są podstawą klasyfikacji technicznej lokomotyw [3]. Gdy przyjmie się jako podstawę kwalifikacji naciski na osie *P* otrzyma się następującą kolejność lokomotyw z tabeli **1**: (7, 5, 6, 1, 4, 2, 3) a na podstawie obciążenia *q* klasyfikacja jest zupełnie inna (3, 2, 7, 4, 5, 6, 1). W przypadku lokomotyw zamieszczonych w tabl. **2** otrzymuje się odpowiednio: (2, 1, 3, 4, 6, 5, 7) oraz odpowiednio (7, 4, 5, 6, 2, 3, 1). Zatem kolejność lokomotyw w takich zestawieniach jest zróżnicowana. Z uwagi na ciężary lokomotyw *G* rozpatrzono oddzielnie lokomotywy o geometriach L4 i L6.

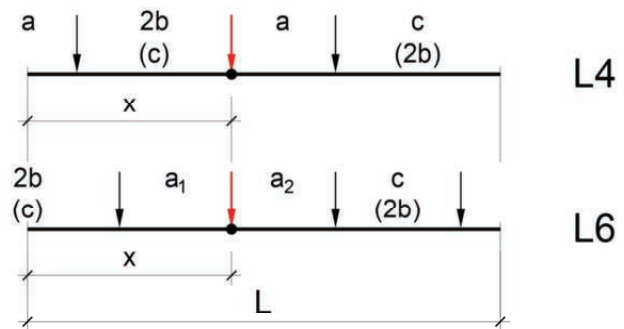
Użyteczność parametrów technicznych klasyfikacji lokomotyw: *G*, *P*, *q* jest niewielka, co wykazano w przykładach zamieszczonych w dalszej części pracy. Z uwagi na rozpatrywane w pracy długości odcinków obciążenia *L* < 11 m nie jest istotna długość pojazdu *L_o*. Ma ona znaczenie w mostach średnich i dużych rozpiętości [1].

Kryteria obliczania mnożnika obciążenia

W normie [3] do kwalifikacji pojazdów kolejowych stosuje się mnożniki obciążenia. Mnożnik obciążenia jest wielkością bezwymiarową, ujmującą proporcję dwóch jednakowych (w sensie fizycznym) wielkości, np. sił wewnętrznych, naprężeń, przemieszczeń – pochodzących od dwóch wybranych schematów sił. Skutek obciążenia, oznaczony symbolem *Q*, wywołany jest grupą sił skupionych zależnych od geometrycznych parametrów lokomotywy: *a*, *b*, *c*, jak na rys. **1**. W ujęciu ogólnym mnożnik obciążenia określony jest wzorem



2. Schematy sił skrajnego ustawienia obciążenia



3. Schematy sił centralnego ustawienia obciążenia

$$M_u(W, A) = \frac{Q_u(A)}{Q_u(W)} \quad u = s, c. \quad (2)$$

We wzorze (2) jako Q oznaczono skutki obciążenia związane np. z siłą wewnętrzną, naprężeniem, przemieszczeniem. Jako u oznaczono schematy ustawień sił, stosowane w pracy, zgodnie z rysunkami **2** i **3**. Położenie sił (nazywane ustawieniem) na belce jest takie, aby wywołać największą wartość analizowanej wielkości statycznej. Zatem gdy zachodzi zależność $M_u > 1$, oznacza to, że analizowane obciążenie A jest skuteczniejsze niż obciążenie odnoszące (we wzorze (2) lokomotywy wzorcowej W). Parametry obciążeniów wzorcowych, stosowanych w normie [3] podano w tabeli **3**.

Mnożniki obciążenia w schemacie ustawienia centralnego C są wyznaczone z wykorzystaniem kryterium momentu zginającego, jak na rys. **2**, lub siły poprzecznej (bądź reakcji podporowej) w schemacie ustawienia skrajnego S , jak na rys. **3**. W przypadku elementów krótkich, istotne znaczenie ma lokalne ekstremum momentu zginającego powstałe w punkcie obciążenia siłą skupioną, w znacznej odległości od środka rozpiętości. Wówczas porównywanie maksymalnych wielkości statycznych pochodzących od dwóch różnych obciążeń nie dotyczy tego samego punktu belki, jak np. w przypadku ustawienia symetrycznego, gdy $x = L/2$ w układzie trzech sił skupionych. Z uwagi na zróżnicowane geometrie osi lokomotyw możliwe są układy obciążenia podane na rysunkach **2** i **3** z mniejszymi odległościami pomiędzy wózkami $2b < c$ lub $c < 2b$.

Kryterium siły poprzecznej

Na rys. **2** przedstawiono położenie układu sił P wykorzystywane do wyznaczania Q_s jako maksymalnej wartości siły poprzecznej. Siły w tym ustawieniu występują jedynie po prawej stronie od punktu skrajnego, a siły, które mogą znajdować się z lewej strony, są pomijane w rozważaniach. Oczywiście w wyróżnionym punkcie skrajnym występuje zawsze siła skupiona a wynik obliczeń wyraża się zależnością

$$Q_s = \frac{P}{L} \sum_{i=1}^n (L - x_i). \quad (3)$$

W obliczeniach uwzględnia się liczbę sił n mieszczących się na odcinku o długości L . W położeniu tych sił uwzględnia się geometrię lokomotywy tak, aby uzyskać maksymalną wartość Q_s . Z wartości parametrów podanych w tablicach **1** i **2** wynika, że gdy $2b < c$ korzystniejsze jest ustawienie dwóch lokomotyw na odcinku o długości L .

Na rys. **4** podano wyniki obliczeń w postaci wykresów mnożników obciążenia z wykorzystaniem wzorów (1) i (3). Wspólnym, zmiennym parametrem jest długość L . Grupa wykresów podana na rysunkach **4a** i **4b** dotyczy

lokomotywy o geometrii L4, natomiast na rysunkach **4c** i **4d** przedstawiono wyniki dla pojazdów L6. Parametry analizowanych lokomotyw, oznaczone jako A zestawiono w tablicach **1** i **2**. W każdej grupie wykresów zastosowano inną lokomotywę wzorcową, traktowaną jako obciążenie referencyjne (odnoszące).

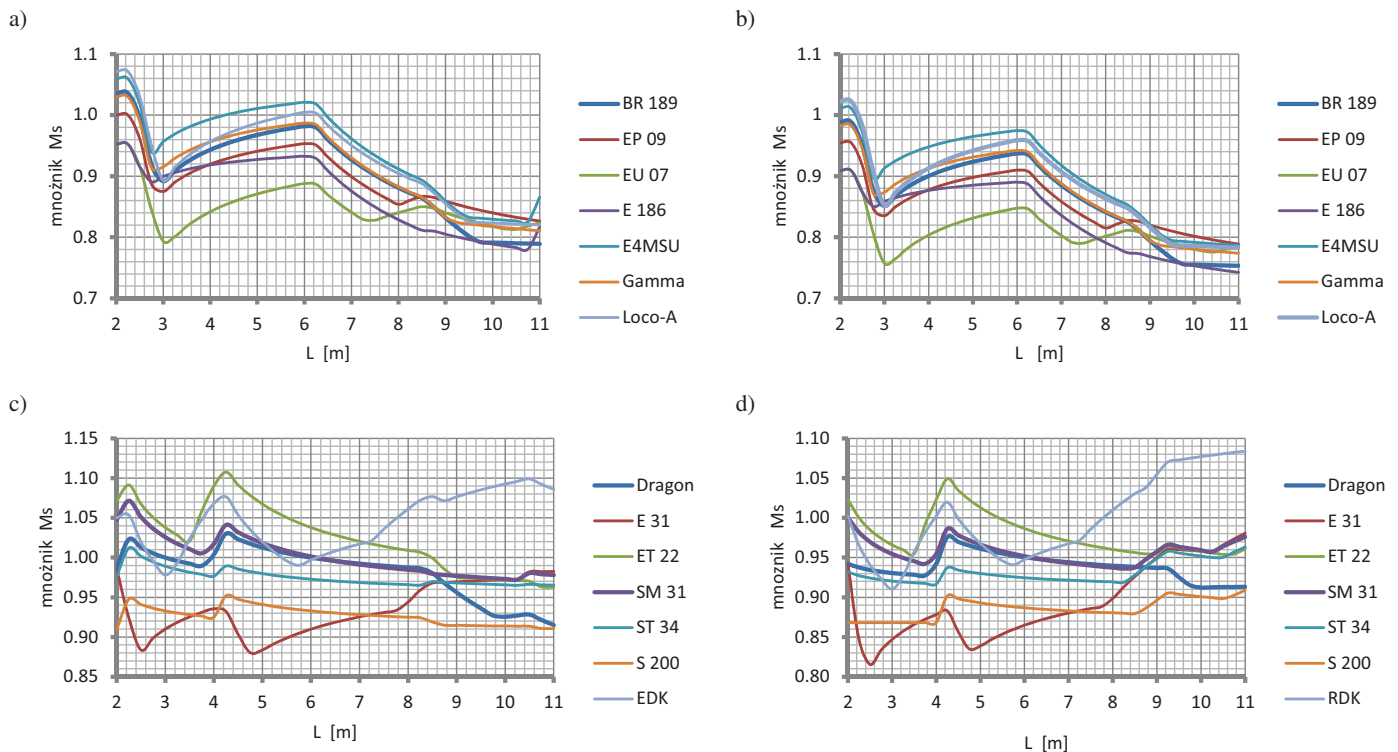
Ze wszystkich wykresów wynika, że największe wartości uzyskuje się w przypadku elementów krótkich – co praktycznie dotyczy pomostów (podłużnice i poprzecznice) oraz mostów małych rozpiętości. Wraz ze wzrostem odcinka L wyniki się stabilizują. Uzasadnia to zajęcie się w pracy zakresem $L < 11$ m znacznie krótszym niż długości lokomotyw L_o , podane w tabelach **1** ÷ **3**. Z wykresów podanych na rysunku **4** wynika, że klasyfikacje lokomotyw z uwagi na wartość P , q , lub G przestają być miarodajne wobec nadzędnej wartości L i wzajemnej odległości pomiędzy osiami lokomotywy. Przekroczenia wartości mnożników są niewielkie (np. do 10%).

Kryterium momentu zginającego

Na rysunku **3** przedstawiono położenie układu sił wykorzystywane przy wyznaczaniu momentu zginającego w pobliżu środka rozpiętości belki.

Tab. 3. Charakterystyki obciążeń wzorcowych

Oznaczenie	Obciążenia		Geometria lokomotywy [m]				
	P [ton]	q [ton/m]	a_1	a_2	b	c	L_o
L4 ₂₁	21	5,793	2,4		1,9	5,9	14,5
L4 ₂₂	22	6,069					
L6 ₂₁	21	6,396	2,1		2,1	7,1	19,7
L6 ₂₂	22	6,377	2,25	2,0	2,5	7,2	20,7



4. Mnożniki obciążeń obliczone z wykorzystaniem skrajnego ustawienia lokomotyw, oznaczone jako: a) $M_s(A, L421)$; b) $M_s(A, L422)$; c) $M_s(A, L621)$; d) $M_s(A, L622)$

Punkt centralny w tych schematach jest odległością siły odnoszącej P od początku odcinka. Dzieli ten układ sił w taki sposób, aby po każdej stronie mieściły się one na odcinku o długości L . Oczywiście w wyróżnionym, centralnym punkcie występuje zawsze siła skupiona i powstaje tam maksymalna wartość Q_c .

Gdy na odcinku o długości L mieści się jedna siła skupiona P otrzymuje się wartość

$$Q_c = \frac{PL}{4}. \quad (4)$$

W przypadku gdy występują dwie siły P , odległe od siebie o wartość a i spełniony jest warunek [1]

$$L < \frac{2+\sqrt{2}}{2} a, \quad (5)$$

uzyskuje się

$$Q_c = \frac{P}{8L} (2L-a)^2. \quad (6)$$

W przypadku lokomotywy L6 we wzorach (5) i (6) jako a jest minimalną wartością a_1 lub a_2 .

Gdy na długości odcinka L mieszczą się trzy siły P pojazdu L4 i spełniona jest relacja

$$L > \frac{a+4b}{\sqrt{6}} + 2b, \quad (7)$$

otrzymuje się wartość

$$Q_c = \frac{P}{12L} [(3L+a-2b)^2 - 12aL]. \quad (8)$$

Jeżeli taka sytuacja dotyczy pojazdu L6 wówczas (gdy $a_1 > a_2$) we wzorach (7) i (8) należy podstawić jako $a = a_1$ oraz $2b = a_2$. Gdy $a_1 = a_2$ wzory (7) i (8) uproszczą się odpowiednio do postaci

$$L > \frac{2+\sqrt{6}}{2} a \quad (7a)$$

oraz

$$Q_c = \frac{P}{4} (3L-4a). \quad (8a)$$

Gdy na długości odcinka L mieszczą się cztery siły pojazdu L4 i spełniona jest relacja

$$L > \frac{3+2\sqrt{3}}{3} (a+b) + b, \quad (9)$$

otrzymuje się

$$Q_c = \frac{P}{L} [(L-b)^2 - aL], \quad (10)$$

gdy $2b < c$ i odpowiednio dla pojazdu

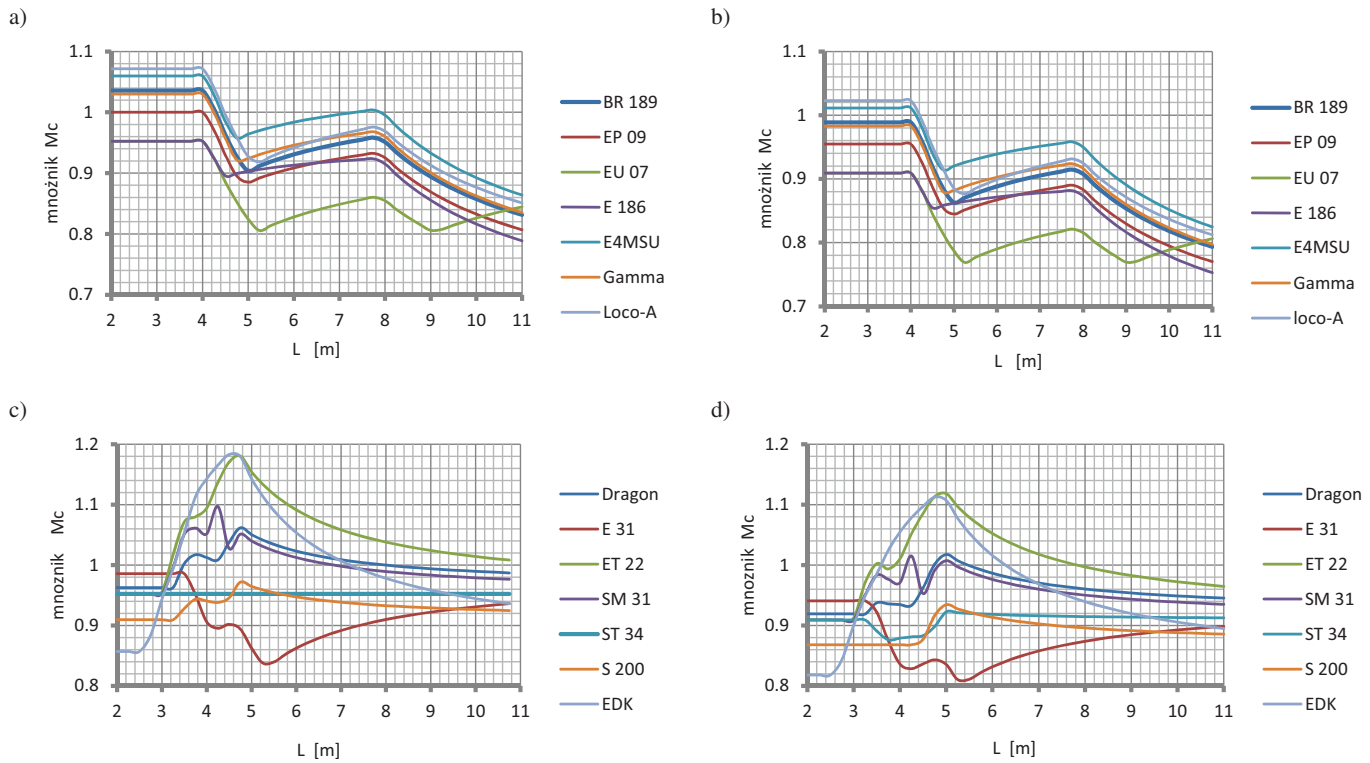
L6 (gdy $2b < c$ oraz $a = a_1 = a_2$)

$$Q_c = \frac{P}{16L} [(4L-a-2b)^2 - 16aL]. \quad (11)$$

Na rysunku 5 podano wyniki obliczeń w postaci mnożników obciążenia z wykorzystaniem wzorów (1) oraz (4) ÷ (11). Zmiennym parametrem jest długość odcinka L . Grupa wykresów podana na rysunkach 5a i 5b dotyczy lokomotyw o geometrii L4, natomiast na rysunkach 5c i 5d przedstawiono wyniki dla pojazdów L6. Z wykresów tych wynikają wnioski podane w poprzednim punkcie przy analizie ustawienia skrajnego.

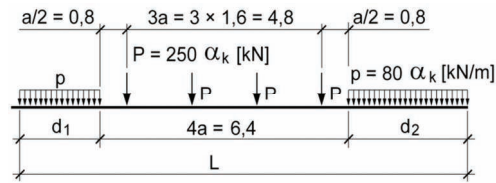
Modele taboru kolejowego

W normie PN-EN 15528:2008 [3] przyjęto dwie grupy modeli taboru kolejowego, w postaci wagonów oraz lokomotyw wzorcowych L4 i L6 o parametrach technicznych zestawionych w tabeli 3 oraz schematu UIC, jak na rysunku 6. Schemat UIC jest od dawna stosowany do projektowania elementów konstrukcji obiektów mostowych. Wobec tego istotna jest relacja pomiędzy analizowanymi wcześniej modelami lokomotyw L4 i L6 a schematem UIC.



5. Mnożniki obciążeń obliczone z wykorzystaniem centralnego ustawienia lokomotyw, oznaczone jako: a) $Mc(A,L421)$; b) $Mc(A,L422)$; c) $Mc(A,L621)$; d) $Mc(A,L622)$

Na rys. 7 przedstawiono wykresy w postaci mnożników obciążeń uzyskane z porównania tych modeli - tak jak wcześniej przy przyjęciu ustawienia skrajnego i centralnego. Wynik obliczeń z wykorzystaniem wzoru (2) przyjmuje w tym przypadku postać



6. Schemat układu sił UIC 71

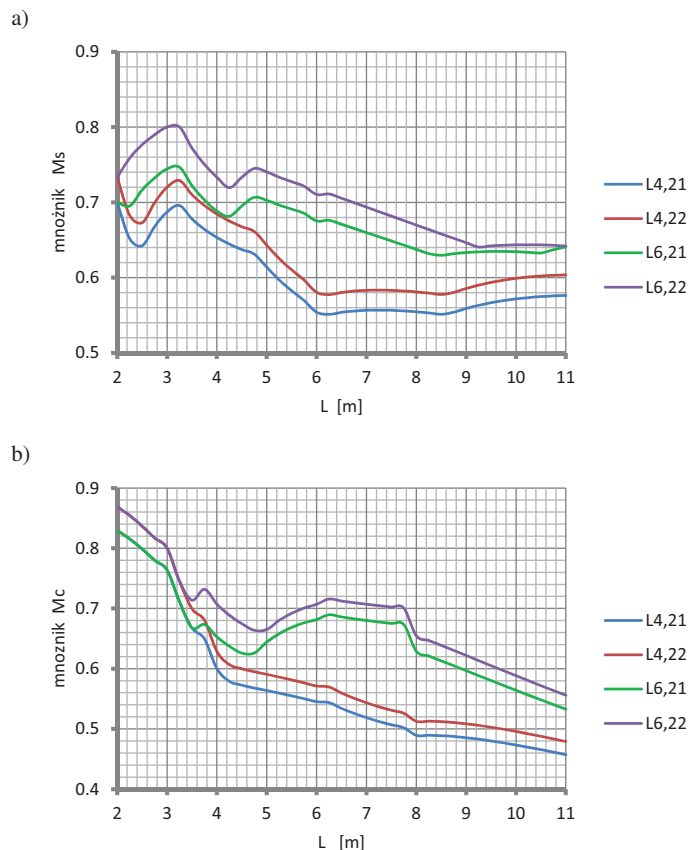
$$M_u(W, UIC) = \frac{Q_u(UIC)}{Q_u(W)} = \alpha_k \frac{Q_u(UIC, \alpha_k = 1)}{Q_u(W)} \quad u = s, c \quad (12)$$

W wyniku obliczeń przy przyjęciu schematu obciążenia UIC z $\alpha_k = 1$, jak na rys. 6, uzyskuje się wartość normowego mnożnika obciążenia α_k , jak we wzorze

$$\alpha_k = \frac{Q_u(W)}{Q_u(UIC, \alpha_k = 1)} \quad u = s, c \quad (13)$$

gdy założy się w (12), że $Q_u(UIC) = Q_u(W)$. Wobec tego wykresy podane na rysunku 7 zawierają informacje o normowej klasie obciążenia obiektów kolejowych k , związanej z normowym mnożnikiem obciążenia zależnością

$$\alpha_{-k} = 0,9^{-k} \quad k = 0, -1, -2, -3, -4 \quad (14)$$



7. Mnożniki obciążeń obliczone z wykorzystaniem centralnego ustawienia lokomotyw, oznaczone jako: a) $Mc(L422, UIC)$; b) $Mc(L622, UIC)$

Z wykresów podanych na tych rysunkach widoczna jest tendencja do dużego spadku wartości klasy obciążenia wraz z długością odcinka L . W przypadku analizowanych lokomotyw wzorcowych o największych naciśkach na osie L6₂₂ wahania te wynoszą od $\alpha_k = 0,9$ ($k = -1$) do $\alpha_k = 0,4$ ($k = -5$) co praktycznie oznacza rozrzut wyników o cztery klasy obciążeń. Zatem nie występuje zgodność modeli pojazdów kolejowych – w tym przypadku lokomotyw L4 i L6 w przypadku małych wartości L .

Podsumowanie

Do porównywania schematów sił wykorzystano w pracy mnożnik obciążenia [1]. Przyjęto w obliczeniach dwa, ustawienia obciążenia: środkowe oraz skrajne. W obliczeniach zastosowano najprostszy model statyczny elementu - schemat belki swobodnie podpartej – często stosowany w projektowaniu elementów pomostu. Taki schemat występuje w znacznej liczbie

dźwigarów głównych mostów kolejowych [1].

W pracy wyniki obliczeń podano w postaci wykresów mnożników obciążenia ze zmiennym parametrem długość elementu L . Wykresy podano w grupach dotyczących lokomotyw o geometrii L4 oraz L6. Z wykresów tych wynika, że największe wartości uzyskuje się w przypadku elementów krótkich pomostów (podłużnice i poprzecznice) oraz mostów małych rozpiętości. Wraz ze wzrostem odcinka L wyniki się stabilizują.

Z wykresów porównawczych obciążenia projektowego UIC i lokomotyw wzorcowych L4 oraz L6 widoczna jest tendencja do dużego spadku wartości klasy obciążenia wraz z długością odcinka L . Również z porównania obciążeń wzorcowych i eksploatacyjnych wynika podobna zależność. Zatem modele pojazdów kolejowych, w tym przypadku lokomotyw, nie odwzorowują dobrze ich zgodności z obciążeniem UIC, stosowanym do projektowania mostów, w analizo-

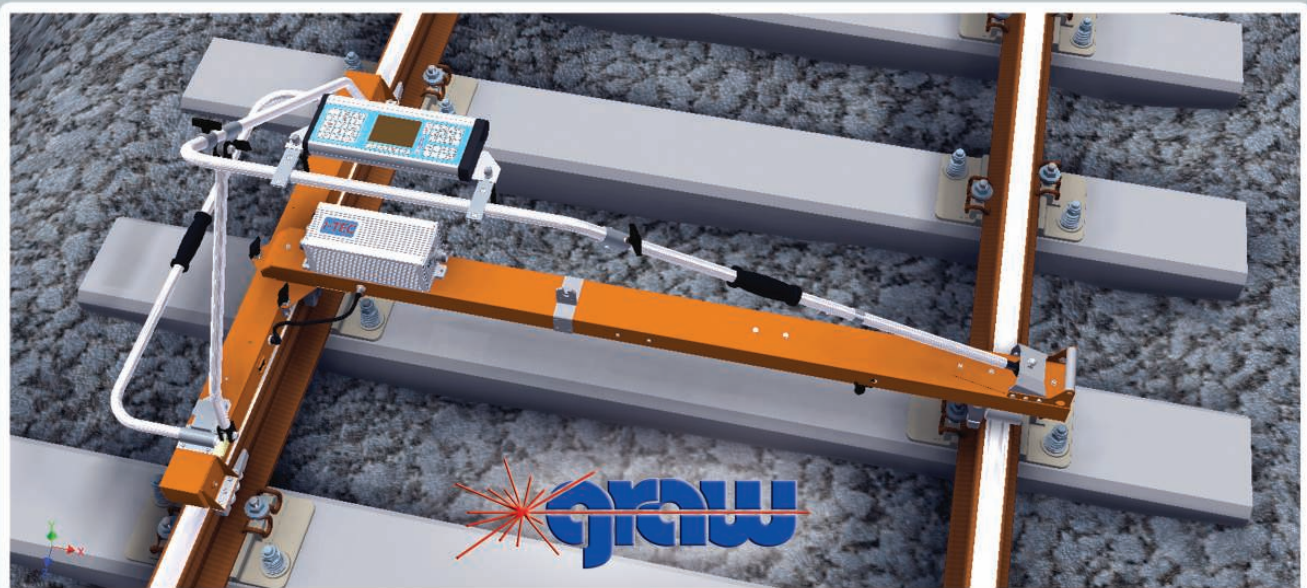
wanym przypadku elementów o małych wartościach L – czyli pomostów i dźwigarów głównych małych mostów o schemacie belkowym. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Machelski C.: Ruchome obciążenia obiektów mostowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2015.
- [2] Machelski C.: Zastępcze obciążenie ruchome mostów kolejowych. Inżynieria i Budownictwo. 9/2015 s. 389-299.
- [3] Norma PN-EN 15528:2008. Kolejnictwo – klasyfikacja linii w odniesieniu do oddziaływań pomiędzy obciążeniami granicznymi pojazdów szynowych a infrastrukturą.
- [4] Aktualne zagadnienia budownictwa komunikacyjnego. Praca zbiorowa. Seria Monografie Zakładu Mechaniki Teoretycznej i Mechaniki Nawierzchni Komunikacyjnych. Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2015.

REKLAMA

TOROMIERZ INERCYJNY iTEC Dokładny pomiar strzałek



www.graw.com