

dr inż. Paweł Hawryszków<sup>1)</sup>

# Badania sił naciągu ciągien systemów podwieszeń mostów z wykorzystaniem metod dynamicznych

## *Determination of tension forces in stay cable systems applying dynamical tests*

DOI: 10.15199/33.2015.10.08

(Oryginalny artykuł naukowy)

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono sposób badania podwieszeń mostów z wykorzystaniem metod dynamicznych. Badania terenowe przeprowadzono w trakcie realizacji podwieszenia wiaduktu WN-24 k. Poznania, dzięki czemu możliwe było porównanie wartości siły naciągu wskazywanej bezpośrednio przez urządzenia używane w wykonawstwie do podwieszania obiektów mostowych z wartościami uzyskanymi w sposób pośredni na podstawie badań dynamicznych. Przedstawiono dyskusję wyników i wskazano na zalety metod dynamicznych oraz możliwe zastosowanie w przypadku mostów podwieszonych. Opisana metoda, dotychczas rzadko wykorzystywana w praktyce, może okazać się interesująca w diagnostyce obiektów mostowych.

**Słowa kluczowe:** mosty podwieszone, systemy podwieszeń, siły naciągu, badania dynamiczne.

**Abstract.** In the article author presents method of investigation of tension forces in stay cable systems using dynamical methods. Research was carried out during stay cable system installation on WN-24 viaduct near Poznań, that is way it was possible to compare tension forces indicated directly by devices using for tensioning of cable-stayed bridges with results achieved indirectly by means of dynamical methods. Discussion of results was presented. Advantages of dynamical methods and possible fields of application was described. This method, which has been rarely used before, may occur interesting alternative in diagnostics of bridges in comparison to traditional methods.

**Keywords:** cable-stayed bridges, stay cable systems, tension forces, dynamical investigation.

Głównymi elementami nośnymi mostów podwieszonych są: system podwieszenia, pomost oraz pylon. Z uwagi na bezpieczeństwo mostu system podwieszenia wymaga okresowych przeglądów, z kontrolą sił napinających ciągła włącznie. Kontrole takie są bardzo istotne, ponieważ w trakcie eksploatacji obiektu mogą zajść zmiany w układzie sił, spowodowane m.in. zjawiskami reologicznymi wciągach, osiadaniami podpór (np. pylonów), korozją spłotów lub ich uszkodzeniami mechanicznymi. Typowe kontrole związane są z koniecznością działania inwazyjnego, uwarunkowanego dostępem do spłotów znajdujących się w zabezpieczonym antykorozyjnie zakotwieniu i sprawdzeniu sił napinających za pomocą siłownika hydraulicznego. W artykule przedstawiono alternatywny sposób badania sił naciągu ciągien systemów podwieszeń mostów z wykorzystaniem metod dynamicznych. Zaprezentowano wyniki badań przeprowadzonych na obiekcie WN-24 nad drogą ekspresową S5 Gniezno – Poznań (w pobliżu węzła Kleszczewo) w Miejscu Obsłu-

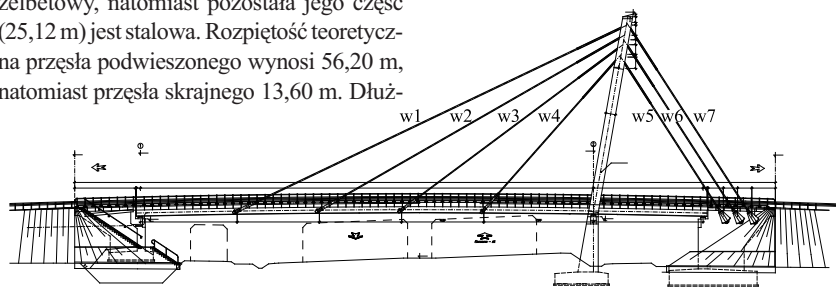
gi Podróżnych. Badania zostały wykonane dzięki uprzejmości firm Warbud (główny wykonawca) i Freyssinet (podwykonawca odpowiedzialny za realizację systemu podwieszenia).

### Badania systemu podwieszenia obiektu WN-24

Wiadukt został zaprojektowany jako konstrukcja podwieszona, dwuprzęsłowa, z pojedynczym pylonem typu „A” (rysunek 1). Pomost zespolony składa się z dwóch dźwigarów blachownicowych o wysokości 80 cm oraz płyty żelbetowej grubości 25 cm. Poprzecznice blachownicowe są zmiennej wysokości, zespolone z płytą pomostową. Pylon w części od fundamentu do poziomu pomostu zaprojektowano jako żelbetowy, natomiast pozostała jego część (25,12 m) jest stalowa. Rozpiętość teoretyczna przęsła podwieszono wynosi 56,20 m, natomiast przęsła skrajnego 13,60 m. Dłuż-

sze z przęsła podwieszono do konstrukcji pylonu za pomocą czterech par want, zaś pylon ustabilizowano trzema parami odciągów (fotografia 1).

Badania przeprowadzono na etapie montażu systemu podwieszenia, w związku z czym było możliwe odniesienie rezultatów uzyskanych za pomocą metod dynamicznych do wskazań urządzeń używanych w procesie podwieszania obiektów mostowych [1]. W badaniach wykorzystano czujniki przyspieszeń drgań montowane na ciągach podwieszających (fotografia 2a) oraz czujniki sił instalowane na splocie referencyjnym wanty (fotografia 2b) na etapie montażu podwieszenia [1]. Wykonano badania siedmiu ciągien podwieszających od strony południowej, oznaczonych na rysunku 1.



Rys. 1. Widok z boku konstrukcji z numeracją ciągien

Fig. 1. Side view of the structure with numeration of stay cables

<sup>1)</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego; e-mail: pawel.hawryszkow@pwr.edu.pl



**Fot. 1. Wiadukt nad drogą S5 Gniezno – Poznań: a) etap budowy i testów dynamicznych; b) ukończona konstrukcja** [Fot. Warbud]  
 Photo 1. Overall images of the viaduct: a. construction phase and stage of dynamical tests; b. finished structure [Photo of Warbud]

Pomiary prowadzono jednocześnie dwoma rodzajami czujników z wykorzystaniem dwóch komputerów przenośnych (fotografia 3). Na jednym z nich rejestrowano pomiar drgań cięgna, natomiast drugi służył do odczytu aktualnej siły w splocie referencyjnym. Zastosowana podczas realizacji podwieszenia obiektu metoda Iso-tension firmy Freyssinet [1] pozwala na uzyskanie jednakowych sił naciągu poszczególnych splotów w cięgnie. W związku z tym siła w splocie referencyjnym po-

mnożona przez liczbę splotów określa siłę naciągu całego cięgna.

Zasada badania dynamicznego bazuje na zależności pomiędzy siłą w cięgnie, długością wanty, masą cięgna rozłożoną na jego długości oraz częstotliwością drgań, zgodnie ze wzorem [2]:

$$f_i = (i/2L)\sqrt{S/m} \quad (1)$$

gdzie:

$f_i$  –  $i$ -ta częstotliwość drgań [Hz];  
 $S$  – siła naciągu cięgna [N];  
 $m$  – masa jednostkowa cięgna [kg/m];  
 $L$  – długość cięgna [m].

Po prostym przekształceniu siła naciągu cięgna wynosi:

$$S = m[(2Lf_i)/i]^2 \quad (2)$$

Znajomość podstawowych danych dotyczących analizowanego cięgna, takich jak długość i masa, oraz umiejętność wyznaczenia częstotliwości drgań wanty pozwala na określenie siły naciągu cięgna. Przykładowy sygnał drgań cięgna W2S (wanta W2 po stronie południowej) wraz z transformacją Fouriera przedstawiono na rysunku 2. Do wymuszenia drgań stosowano wymuszenie impulsowe w postaci jednokrotnego dynamicznego naciągu liny zamocowanej na osłonie cięgna (szarpnięcia), jak również rejestrowano drgania środowiskowe wzbudzone przez wiatr.

W tabeli zestawiono dane do analizy: długość ( $L$  – przyjęte wg pomiarów geodezyjnych jako punkty węzłowe zakotwień wany), masę wiązki splotów ( $m_{\text{sploty}}$ ) oraz zewnętrznych osłon HDPE ( $m_{\text{HDPE}}$ ), sumaryczną masę rozłożoną cięgna ( $m$ ) oraz wyznaczone doświadczalnie podstawowe częstotliwości drgań ( $f_{\text{bad}}$ ). Dane te posłużyły do wyznaczenia siły naciągu poszczególnych cięgien ( $S_{\text{dyn}}$ ) wg wzoru (2). W tabeli podano również siły w splotach referencyjnych ( $S_{\text{splot}}$ ), odczytane z urządzeń do kontroli sił naciągu oraz wynikające z nich ogólne siły naciągu ( $S_{\text{cięgno}}$ ). Z przedstawionych danych wynika, że w typowym przypadku możliwe jest określenie siły naciągu z minimum 95% wiarygodnością (różnica wyników nie przekracza 5%). Przypadek wany W1S i W3S należy uznać za błąd grubo, który mógł być wynikiem:

- rozkalibrowanych siłomierzy zainstalowanych na splotach referencyjnych, służących do kontroli siły;

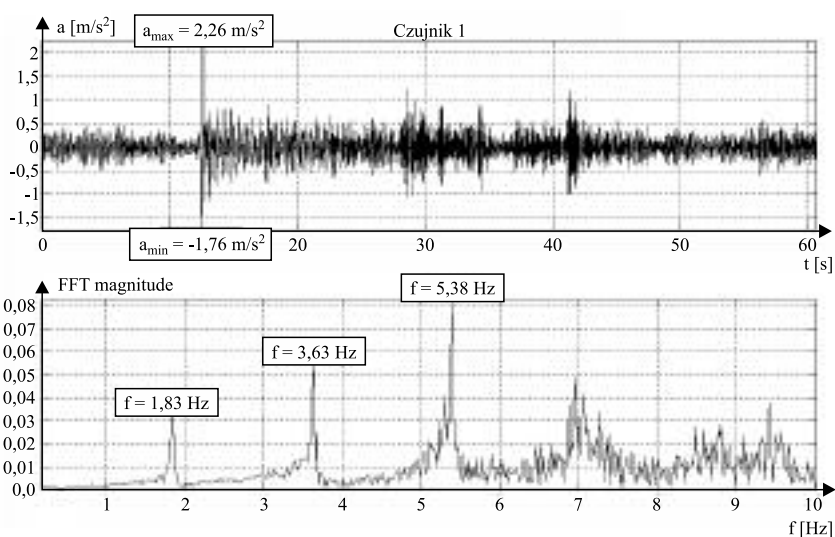


**Fot. 2. Urządzenie pomiarowe: a) czujnik przyspieszeń zainstalowany na osłonie cięgna (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, B12/200); b) czujnik siły zainstalowany na splocie referencyjnym (Freyssinet)**  
 Photo 2. Measurement devices: a) accelerometer installed on external protecting HDPE tube (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, B12/200); b) load cell installed on the reference strand (Freyssinet)



**Fot. 3. Urządzenia rejestrujące: a) komputery do kontroli siły naciągu oraz rejestracji sygnałów drgań; b) kontrola siły naciągu cięgna W2S (urządzenie i oprogramowanie Freyssinet)**

Photo 3. Recording devices: a) computers for controlling of tension forces and registration of vibrations; b) control of tension force in W2S stay cable (device and software of Freyssinet)



Rys. 2. Sygnał przyspieszeń drgań cięgna W2S wraz z transformacją Fouriera  
 Fig. 2. Signal of vibrations acceleration of W2S stay cable with Fourier transform

#### Zestawienie danych i wyników analiz sił w cięgnach

Input data and results of analyses of tension forces in stay cables

Charakterystyka	Rodzaj cięgna						
	W1S	W2S	W3S	W4S	W5S	W6S	W7S
Liczba splotów	39	32	25	25	32	32	32
L [m]	54,32	44,51	35,17	26,79	25,23	27,75	30,27
$m_{\text{sploty}}$ [kg/m]	50,7	41,6	32,5	32,5	41,6	41,6	41,6
$m_{\text{HDPE}}$ [kg/m]	3,71	3,13	2,77	2,77	3,13	3,13	3,13
$m$ [kg/m]	54,4	44,7	35,3	35,3	44,7	44,7	44,7
$S_{\text{splot}}$ [kN]	34,8	36,8	22,6	19,7	44,1	44,3	39,5
$S_{\text{cięgno}}$ [kN]	1357	1178	565	493	1411	1418	1264
$f_{\text{bad}}$ [Hz]	1,52	1,83	1,98	2,26	3,48	3,28	2,85
$S_{\text{dyn}}$ [Hz]	1484	1187	684	517	1379	1482	1332
Różnica [kN]	126	9	119	25	-32	65	68
Różnica [%]	9,3	0,8	21,1	5,0	-2,3	4,6	5,3

- wykonywania pomiarów dynamicznych czujnikami zainstalowanymi na osłonie HDPE cięgien, a nie bezpośrednio na wiązce napiętych splotów (w przypadku osłon niewypełnionych ściśle splotami może mieć to wpływ na uzyskiwane wyniki);
- obu wymienionych powodów.

Uzyskana dokładność wskazuje, że metoda może być przydatna w diagnostyce obiektów mostowych. Należy podkreślić, że pomiary dynamiczne są metodą pośrednią w odniesieniu do kontroli sił naciągu i należą do grupy metod nieniszczących podobnie jak np. metody sklerometryczne w badaniach wytrzymałości betonu, od których nie można oczekiwać najwyższej dokładności. W przypadku cięgien występuje wiele czynników, które mogą mieć wpływ na ostateczny wynik, np. wspomniany efekt luźnej osłony HDPE, bądź wpływ zakotwienia cięgna, które nie odpowiada teoretycznemu modelowi kabla zakończonemu w sposób przegubowy, co stanowi podstawę wzoru (2). Jego budowa

wiąże się z problemem określenia właściwej długości cięgna, jaką należy przyjąć do obliczeń. Ponadto badania wykonane w warunkach polowych, korzystając częściowo z urządzeń wykonawcy. W warunkach laboratoryjnych, przy pełnej kontroli procesu naciągu, zgodność wyników z pewnością byłaby większa. Niemniej niekwestionowaną zaletą opisaną metody jest jej nieinwazyjność w system podwieszenia. Metoda nie wymaga rozbicia zakotwienia cięgna, tj. zdjęcia pokrywy osłaniającej zakotwienie i odsłonięcia splotów przez usunięcie zabezpieczenia w postaci wosku (obie czynności powodują przedostanie się wilgoci do wnętrza zakotwień, co może skutkować rozpoczęciem lub przyspieszeniem procesu korozji) oraz nie wymaga użycia sprzętu hydraulicznego do kontroli siły naciągu – wykonywanej zwykle siłownikiem jednosplotowym i polegającej na selektywnym naciągu pojedynczych splotów, prowadzonym każdorazowo do chwili wyrwania szczęki ko-

twiącej splot z gniazda (operacja inwazyjna). W przeciwieństwie do opisaną procedury kontroli naciągu metoda dynamiczna wymaga jedynie lekkiego sprzętu, montowanego na cięgnię podwieszającym z poziomu pomostu (nie jest potrzebny podnośnik koszowy w celu pracy w strefie zakotwienia cięgna pod pomostem lub na pylonie). Ta niewątpliwa zaleta przekłada się na aspekt finansowy kontroli naciągu.

**Metoda dynamiczna może być stosowana do:**

- cyklicznego monitorowania sił w cięgnach w przypadku mostów podwieszonych, na których nie zainstalowano systemów monitorujących;
- diagnostyki sił naciągu w kontroli wykonawczej.

Metodę w powyższym zakresie zastosowałem w przypadku kładki dla pieszych z drewna klejonego w Sromowcach Niżnych, o rekordowej długości przęsła podwieszonoego [3, 4].

#### Podsumowanie

W artykule opisano znaną z literatury metodę badań dynamicznych cięgien podwieszających [5]. Badania terenowe przeprowadzono w trakcie realizacji podwieszenia wiaduktu WN-24, dzięki czemu możliwe było porównanie wartości sił naciągu wskazywanej bezpośrednio przez urządzenia używane w wykonawstwie do podwieszania obiektów mostowych z wartościami uzyskanymi w sposób pośredni na podstawie badań dynamicznych. Opisana metoda może okazać się interesującą alternatywą w diagnostyce obiektów mostowych w stosunku do metod tradycyjnych.

#### Literatura

- [1] Hawryszków P., Hildebrand M.: „Technologia montażu cięgien i badania wybranych elementów systemu podwieszenia mostu Rędzińskiego we Wrocławiu”. Inżynieria i Budownictwo, nr 2/2012.
- [2] Biliszczuk J., „Mosty podwieszane. Projektowanie i realizacja”, Arkady, Warszawa 2005.
- [3] Hawryszków P.: „Badania dynamiczne kładki dla pieszych w Sromowcach Niżnych”. Inżynieria i Budownictwo, nr 1-2/2008.
- [4] Biliszczuk J., Hawryszków P., Węgrzyniak M., Maury A., Sułkowski M.: „Podwieszona kładka dla pieszych z drewna klejonego w Sromowcach Niżnych”. Inżynieria i Budownictwo, nr 1-2/2008.
- [5] Caetano E.: Cable vibrations in cable-stayed bridges. International Association for Bridge and Structural Engineering, Structural Engineering Documents, vol. 9/2007.

Przyjęto do druku: 19.08.2015 r.