

dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. PG<sup>1)\*</sup>

ORCID: 0000-0002-5050-0068

mgr inż. Mikołaj Binczyk<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0003-0128-0991

mgr inż. Przemysław Kalitowski<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-2083-1616

mgr inż. Michał Marusiak<sup>2)</sup>

DOI: 10.15199/33.2021.09.08

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodę oraz wyniki badań sił w wantach Mostu III Tysiąclecia im. Jana Pawła II w Gdańsku. Do identyfikacji sił wykorzystano trzy metody: wibracyjną; z wykorzystaniem siłownika jednosplotowego (lift-off) oraz pomiaru strzałki ugięcia. Przedstawione wyniki badań dowodzą, że wszystkie metody mogą być z powodzeniem wykorzystywane do identyfikacji rzeczywistej siły w wancie. Każda z metod ma jednak ograniczenia i w związku z tym jest obarczona pewnymi błędami, których wpływ zależy m.in. od układu geometrycznego wanty. W artykule podjęto próbę analizy wiarygodności przedstawionych metod pomiarowych.

**Słowa kluczowe:** pomiar sił; ciągnia; most podwieszony; metoda wibracyjna; strzałka ugięcia.

**Abstract.** The article presents the methodology and the results of testing the forces in the cable stays of the Third Millennium, John Paul II Bridge in Gdańsk. Three methods were used to identify the forces: vibration, with the use of a single-strand central hole jack (lift-off), and measurement of the deflection curve. The presented analyzed results prove that all methods can be successfully used to identify the real force in the stay cable. However, each of the methods has its limitations and, therefore, is burdened with certain errors, the impact of which depends, mainly on the geometric parameters of stay cable. The article attempts to analyze the reliability of the presented measurement methods.

**Keywords:** force measurement; cables; cable-stayed bridge; vibration method; sag method.

Najbardziej wyężonym elementem mostu podwieszono są wanty, podtrzymujące pomost [14]. Wyężenie lin stanowi na ogół maksymalnie 50% siły zrywającej [13], ale stal, z której wykonano sploty, jest bardzo wrażliwa na efekty zmęczeniowe i karby. W kontekście trwałości szczególnie istotna jest ochrona korozyjna splotów. W celu diagnostyki stanu technicznego want określa się siły w linach. Obiektywna ocena ich napięcia pozwala na zdiagnozowanie wielu zjawisk zachodzących w cyklu życia konstrukcji. Zmiana sił w wantach mostu podwieszono może być skutkiem:

- zjawiska reologicznego zachodzącego w konstrukcji przęsła i pylonów;
- nierównomiernego osiadania konstrukcji;
- niekontrolowanej zmiany ciężaru własnego konstrukcji (np. dodatkowa warstwa nawierzchni lub inne niewzględnie pierwotnie obciążenie);
- nieprzewidzianego w projekcie obciążenia eksploatacyjnego lub środowiskowego;
- degradacji stref zakotwienia lin lub liny.

Są one istotnym wskaźnikiem w ocenie stanu technicznego i bezpieczeństwa obiektu mostowego.

Monitorowanie mostów opisano w [12, 15, 16]. Mosty podwieszono wyposaża się w urządzenia do ciągłego pomiaru sił w linach, ale na ogół pomiar jest ograniczony do jednego splotu wanty wielosplotowej i w efekcie obciążony błędem. Ponadto z przyczyn czysto ekonomicznych inwestorzy decydują się na opomiarowanie tylko wybranej liczby want. Pomiar sił w wantach mostu podwieszono lub wieszakach mostu łukowego powinien być prowadzony przynajmniej kilkukrotnie w okresie życia konstrukcji – maksymalnie co 10 lat.

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów sił w linach Mostu III Tysiąclecia im. Jana Pawła II w Gdańsku (fotografia 1), które zostały wyprodu-

kowane i zamontowane przez firmę VSL w 2001 r. Zastosowano trzy metody pomiarowe.

### Opis konstrukcji

Most III Tysiąclecia im. Jana Pawła II przez Martwą Wisłę w Gdańsku (fotografia 1) to jeden z dwóch pierwszych drogowych mostów podwieszonych w Polsce. Został zaprojektowany przez Biuro Projektów Budownictwa Komunalnego w Gdańsku (projektantem konstrukcji jest Krzysztof Wąchalowski), a wykonany przez konsorcjum Demathieu et Bard i Mosty Łódź.

Rozpiętość przęsła wynosi 25 m + 230 m (główne przęsło podwieszono) + 117 m (przęsła zalewowe). Przęsło główne podwieszono za pomocą 60 want do pylonu o konstrukcji żelbetowej i wysokości 100 m, który zaprojektowano w kształcie odwróconej litery Y. Przęsła zalewowe stanowią przeciwwagę dla przęsła nurtowego i są zakotwione do podłoża w trzech podporach pośrednich i przyczółku. Wanty, złożone z 7-drutowych splotów (rysunek 1), w układzie wachlarzowo-harfowym parami, symetrycznie podtrzymują pomost. Przęsło składa się z dwóch podłużnych dwuśrodkowych belek stalowych w rozstawie 18 m i poprzecznic w rozstawie 4 m. Całość jest zespolona z żelbetową płytą jezdni.



Fot. 1. Most III Tysiąclecia im. Jana Pawła II przez Martwą Wisłę w Gdańsku

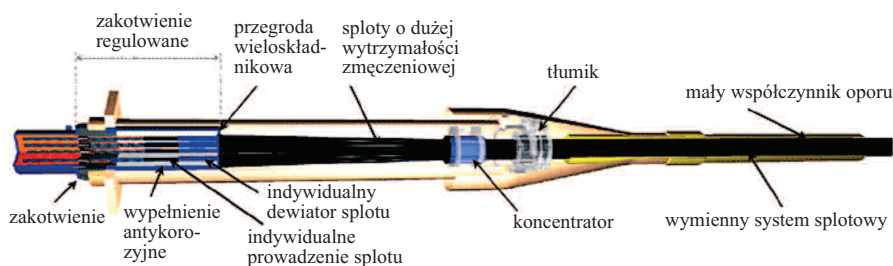
Fot. K. Żółtowski

Photo 1. The Third Millennium, John Paul II Bridge over the Martwa Wisla River in Gdansk

<sup>1)</sup> Politechnika Gdańska; Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

<sup>2)</sup> Freyssinet Polska

\* Adres do korespondencji: zoltowk@pg.edu.pl



Rys. 1. Schemat zakotwienia wanty w systemie VLS  
Fig. 1. A scheme of the cable anchorage – VLS system

Źródło: materiały promocyjne VSL

### Pomiar siły z wykorzystaniem siłownika jednosplotowego

Pomiar napięcia w pojedynczych splotach (ang. *lift-off test*) jest jedną z metod bezpośrednich [5]. Polega na rozkotwieniu splotu za pomocą siłownika przelotowego i odczytaniu wartości ciśnienia lub siły na urządzeniach pomiarowych, gdy cała siła ze splotu zostaje przekazana na siłownik w chwili oderwania szczęki kotwiącej od bloku kotwiącego. Jeżeli siłownik nie jest wyposażony w siłomierz, odczyt pomierzonego ciśnienia zostaje przeliczony na rzeczywistą siłę w splocie. Dobrą praktyką jest odczytywanie przemieszczeń realizowanych w siłowniku w trakcie zwiększania siły. Na podstawie wykresu  $P - \Delta$  możliwe jest wykreślenie dwóch linii prostych: jedna oznacza pomiary przed rozkotwieniem, a druga po rozkotwieniu, które można uzyskać za pomocą regresji liniowej. Teoretyczny punkt przecięcia obu linii wskazuje siłę w wancie.

Do pomiarów sił w wantach zastosowano: siłownik jednosplotowy; czujnik siły; przenośne urządzenie do odczytu pomiarów czujnika siły; precyzyjny manometr elektroniczny; pompę hydrauliczną Powerteam PE 554 (0,9l) z manometrem. **Prace przeprowadziła firma Freyssinet Polska na zlecenie Zarządu Dróg i Zieleni w Gdańsku.**

Ze względu na założenie, że wartości siły napinającej we wszystkich splotach wanty powinny być zbliżone, pomiary wykonywano w przypadku 15% losowo wybranych splotów (6 – 10 szt.) w wancie. Takie ograniczenie powoduje, że niejednorodność napięcia pojedynczych splotów mogłaby mieć duży wpływ na końcową wartość siły w wancie. W przypadku, gdy siły w splotach jednej wanty znacznie się różniły, wykonywano dodatkowe pomiary. Założono,

że znaczna różnica występuje, kiedy stosunek odchylenia standardowego i średniej wartości mierzonych sił w jednej wancie jest większy niż 5%. Wówczas trzeba było rozszerzyć pomiar na kolejne sploty, aż do momentu, kiedy opisany warunek zostanie spełniony lub do zmierzenia sił we wszystkich splotach. Ostateczną siłę w wancie obliczano jako iloczyn średniej wartości siły w splocie i liczby splotów w wancie. Wyniki pomiarów want metodą lift-off zestawiono w tabeli 1. Przyjęto, że siły pomierzone metodą bezpośrednią są punktem odniesienia do oceny innych metod pomiaru.

Tabela 1. Siły w wancie zidentyfikowane metodą lift-off wraz z odchyleniem standardowym pomierzonych wartości

Table 1. Normal forces in the cable measured by the lift-off method and standard deviation of the measured values

Charakterystyka	Strona								
	wschodnia					zachodnia			
	oznaczenie wanty								
	90D	94	100	104	106	90G	97	102	105
Liczba splotów n [szt]	42	42	31	42	55	42	37	31	55
Średnia siła w splocie $F_{sr}$ [kN]	99,0	84,2	63,4	62,1	80,6	95,4	74,4	60,5	70,0
Liczba zmierzonych splotów $n_p$ [szt]	8	8	6	8	10	8	8	6	10
Odchylenie standardowe $S_{sd}$ [kN]	0,88	1,06	2,06	1,51	1,13	1,00	1,27	0,78	2,29
Nierównomierność napięcia $S_{sd}/F_{sr}$ [%]	0,88	1,26	3,26	2,42	1,40	1,05	1,71	1,29	3,27
Siła w wancie $F_L$ [kN]	4159	3536	1965	2609	4434	4005	2752	1875	3851

### Identyfikacja siły w ciągnięciu metodą wibracyjną

Metoda wibracyjna pozwala na określenie siły w wancie, z zależności pomiędzy siłą napinającą a parametrami modalnymi ciągną. Istnieją różne rozwiązania tego zagadnienia, różniące się stopniem złożoności wynikających z założeń dotyczących sztywności giętej ciągną, warunków brzegowych czy uwzględnienia zwisu. Najprostszą relacją zakładającą przegubowe zamocowanie na końcach, brak istotnej sztywności giętej przekroju, małą strzałkę ugię-

cia i równomiernie rozłożoną masę na długości ciągną przedstawia wzór (1):

$$f_{si} = i/(2 \cdot L) \cdot \sqrt{(T/m)} \quad (1)$$

gdzie:

$f_{si}$  – częstotliwość drgań własnych i-tej postaci drgań własnych;  
 $i$  – numer kolejnej postaci drgań własnych;  
 $L$  – długość ciągną;  
 $T$  – siła w ciągnięciu;  
 $m$  – równomiernie rozłożona masa na jednostkę długości.

Przyjmuje się, że wanty mostu podwieszono najczęściej spełniają te założenia. Formuły uwzględniające inne warunki brzegowe, sztywność giętną, niejednorodny rozkład sił i strzałkę ugięcia przedstawiono w [4, 6].

Na podstawie odpowiedzi swobodnej wzbudzonej wanty identyfikuje się jej częstotliwości drgań własnych. Następnie, wykorzystując równania wiążące siłę napinającą z parametrami modalnymi (np. wzór (1)), wyznacza się siłę odpowiadającą zmierzonej częstotliwości drgań. **Procedura pomiarowa każdej z want obejmowała:**

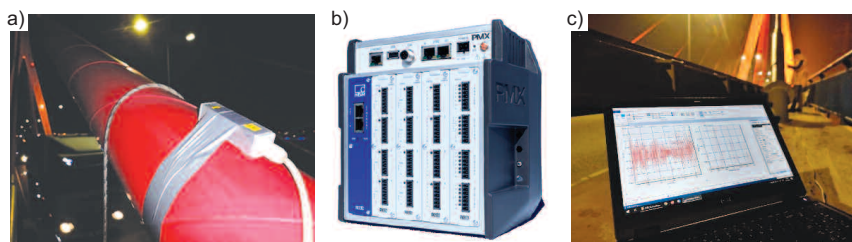
- instalację jednoosiowego czujnika przyspieszeń na osłonie wanty;

- wzbudzenie wanty do drgań (za pomocą liny);

- rejestrację sygnału odpowiedzi swobodnej wanty w postaci przyspieszeń; długość pomiaru ma wpływ na dokładności wyników;

- archiwizację danych pomiarowych;
- demontaż czujników oraz liny i przedstawienie stanowiska pomiarowego.

Do pomiarów wykorzystano czujniki akcelerometryczne typu MEMS o zakresie pomiarowym  $\pm 2$  g i szumie pomiarowym nieprzekraczającym 150  $\mu$ g RMS (fotografia 2). Zarejestrowane sygnały od-



Fot. 2. Sprzęt pomiarowy wykorzystany podczas badań metodą wibracyjną: a) czujnik akcelerometryczny przymocowany do wanty; b) wzmacniacz pomiarowy; c) komputer z oprogramowaniem rejestrującym

Photo 2. The measurement device used to determine cable normal forces by vibration method: a) the accelerometer fixed to the cable; b) the amplifier; c) notebook with the recording software

powiedzi swobodnej wanty poddano analizie częstotliwościowej z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera (FFT). Proces identyfikacji wykonano za pomocą autorskiego oprogramowania. Głównymi czynnikami wpływającymi na dokładność identyfikacji siły w wancie metodą wibracyjną są: dokładność określenia teoretycznej długości wanty; dokładność określenia masy ciężna na długości; rozdzielczość widma częstotliwości pomierzonego sygnału; niewłaściwe wzbudzenie.

Teoretycznie pomiar długości wanty nie jest problematyczny. Metody geodezyjne pozwalają na bardzo precyzyjne określenie odległości pomiędzy elementami zakotwień. Wymagane jest określenie nie tyle odległości między zakotwieniami, ile odległości pomiędzy teoretycznymi miejscami utwierdzenia lub podparcia poprzecznego na obu końcach. W skład systemów wchodzi dewiatory, kołnierze dewiatorów, niwelatory zginania i niekiedy tłumiki. W przypadku tak rozbudowanych układów trudno przewidzieć, w którym miejscu zablokowany jest ruch poprzeczny ciężna. Teoretyczny punkt podparcia znajduje się pomiędzy wymienionymi elementami, ale precyzyjne jego określenie jest niemożliwe. Przybliżone określenie teoretycznej długości stanowi główny składnik błędu pomiarowego wanty wielosplotowej.

Producenci want posiadają systemy kontroli, które gwarantują powtarzalność specyfikacji splotów/lin. Przyjęto, że całkowity błąd oszacowania masy wanty może wynieść 0,5 kg/m. Wartość ta jest bezpieczna i stanowi ok. 1% masy jednostkowej typowej wanty Mostu im. Jana Pawła II. Na błąd składają się głównie różnice gęstości i wymiarów

rury HDP, grubości powłoki cynkowej na splotach oraz elementów obcych, np. kabli monitoringu.

Częstotliwość drgań własnych wanty określana jest najczęściej za pomocą przekształcenia sygnału odpowiedzi swobodnej do dziedziny częstotliwości metodą dyskretnej transformaty Fouriera (DFT). Wynikiem jest dyskretne widmo, z charakterystycznymi prążkami wskazującymi częstotliwość drgań własnych. Na jego jakość ma wpływ stosunek szumu do sygnału oraz długość analizowanej odpowiedzi. Pierwszy czynnik zależy od poziomu wzbudzenia i zastosowanego systemu pomiarowego, a drugi wpływa bezpośrednio na rozdzielczość widma.

W tabeli 2 przedstawiono trzy ciężna o charakterystykach zbliżonych do występujących w Moście im. Jana Pawła II w Gdańsku. Zakłada się, że dane ciężen teoretycznych pozbawione są jakichkolwiek błędów, a więc wyznaczona siła  $F$  jest rzeczywista. Przyjęto, że w przypadku każdego ciężna możliwe jest popełnienie błędu oszacowania częstotliwości, długości teoretycznej i masy, które określono odpowiednio jako  $\Delta f = 0,005$  Hz,  $\Delta L = 2,0$  m,  $\Delta m = 0,5$  kg/m. Zbadano wpływ każdego błędu na siłę wynikową i porównano z siłą rzeczywistą. Wartość  $\delta F$  oznacza błąd względny.

Tabela 2. Wpływ niedokładności oszacowania częstotliwości, długości i masy na siłę zidentyfikowaną metodą wibracyjną w trzech przykładowych ciężnach

Table 2. An influence of inaccurate estimation of the frequency, length, and mass for determination of normal cable forces by the vibration method – the representative examples

Nr	Ciężno teoretyczne				Różnica częstotliwości			Różnica długości			Różnica masy			Błąd skumulowany	
	f [Hz]	L [m]	m [kg/m]	F [kN]	$\Delta f$ [Hz]	F [kN]	$\delta F$ [%]	$\Delta L$ [m]	F [kN]	$\delta F$ [%]	$\Delta m$ [kg/m]	F [kN]	$\delta F$ [%]	F [kN]	$\delta F$ [%]
1	0,650	200	59	3988	0,005	3927	-1,5	2,0	3909	-19,9	0,5	3955	-0,85	3817	-4,3
2	1,000	100	50	2000	0,005	1980	-1,0	2,0	1921	-39,6	0,5	1980	-1,00	1883	-5,9
3	1,600	50	44	1126	0,005	1119	-0,6	2,0	1038	-78,4	0,5	1114	-1,14	1020	-9,5

Określono również błąd wywołany najbardziej niekorzystnym, jednoczesnym pojawieniem się wszystkich błędów i oznaczono go jako skumulowany.

### Identyfikacja siły przez pomiar strzałki ugięcia liny

Ze względu na błędy uzyskiwanych wartości sił w granicach 10 – 15% oraz ograniczenia w stosowaniu (niemiarodajna przy krótkich ciężnach i małej strzałce ugięcia), metoda szacowania sił w ciężnach na podstawie strzałki ugięcia [1] nie jest popularna, ale warto ją przeanalizować z powodu najnowszych technik pomiarowych.

Wykonano pomiar współrzędnych punktów umiejscowionych na górnej tworzącej rury osłonowej, a następnie uzyskane zestawy punktów poddano aproksymacji krzywą – parabolą drugiego stopnia. Do pomiaru geometrii kabla wykorzystano tachimetry elektrooptyczne. W przypadku każdego ciężna zmierzono po 7 punktów pomiarowych rozłożonych niemal równomiernie na długości kabla. Współrzędne punktów przetransformowano na płaszczyznę i poddano aproksymacji metodą najmniejszych kwadratów z zastosowaniem wielomianu drugiego stopnia. Wyznaczono strzałkę ugięcia i siłę w linie za pomocą wzorów (2) i (3):

$$H = (1/8) \cdot (q_1 \cdot L^2) / (f \cdot \cos(\alpha)) \quad (2)$$

gdzie:

H – siła pozioma H;

$q_1$  – ciężar ciężna na jednostkę długości;

L – rozpiętość ciężna;

$\alpha$  – kąt pomiędzy poziomem a ciężnią;

f – strzałka ugięcia w połowie rozpiętości ciężna.

Przybliżoną wartość siły napinającej ciężna określono z wzoru (3):

$$S \approx H / \cos(\alpha) \quad (3)$$

W przypadku mostów podwieszonych założenia o wiotkim ciężnie, ma-

łej strzałce i równomiernym rozkładzie masy są na ogół niemal idealnie spełnione. Atrakcyjność metody polega na tym, że wystarczy pomierzyć krzywą ugięcia na dowolnym odcinku wanny, aby określić w niej siłę.

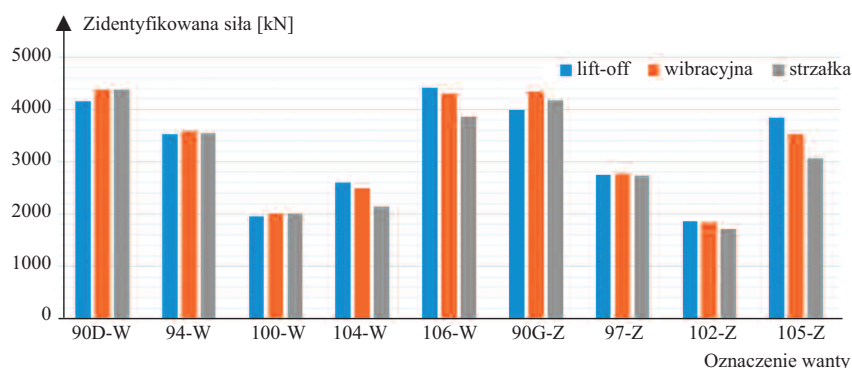
Metoda identyfikacji siły w cięgnię za pomocą punktowego pomiaru strzałki ugięcia obarczona jest błędami. Wynikają one w głównej mierze z wymaganej dużej dokładności pomiaru współrzędnych liny, dynamicznego zachowania konstrukcji w trakcie pomiarów i przybliżonego opisu teoretycznego trasy cięgnię za pomocą paraboli. Oceny jakości pomiarów dokonano, wyznaczając współczynnik związany z dokładnością estymacji i następnie wykonując próbę korelacji z siłami uzyskanymi metodą lift-off. Jako miarę dokładności dopasowania wyznaczono odchylenie standardowe różnic pomiędzy krzywą teoretyczną i empirycznymi punktami pomiarowymi. Podzielono je przez zidentyfikowaną strzałkę ugięcia wanny, tworząc w ten sposób względny wskaźnik dokładności. Wyniki badań sił metodą lift-off i strzałki ugięcia przedstawiono w tabeli 3.

Zauważono, że siły zidentyfikowane za pomocą pomiaru strzałki są porównywalne z siłami z identyfikacji dynamicznej, gdy wyznaczona miara dokładności jest mniejsza niż ok. 2%. Wartości te uzyskano w przypadku długich wany, których strzałki ugięcia dochodzą do kilkudziesięciu centymetrów. W przypadku krótkich wany, o strzałkach ugięcia wynoszących zaledwie kilka centymetrów, dokładność

pomiaru jest niewystarczająca i uznano wyniki za niemiarodajne. Odchylenie standardowe było znacznie większe w przypadku uwzględnienia przy aproksymacji skrajnych, bliskich zakotwień punktów. Po usunięciu ze zbioru tych punktów, odchylenie w większości przypadków znacznie zmalało, co może wynikać z zaburze-

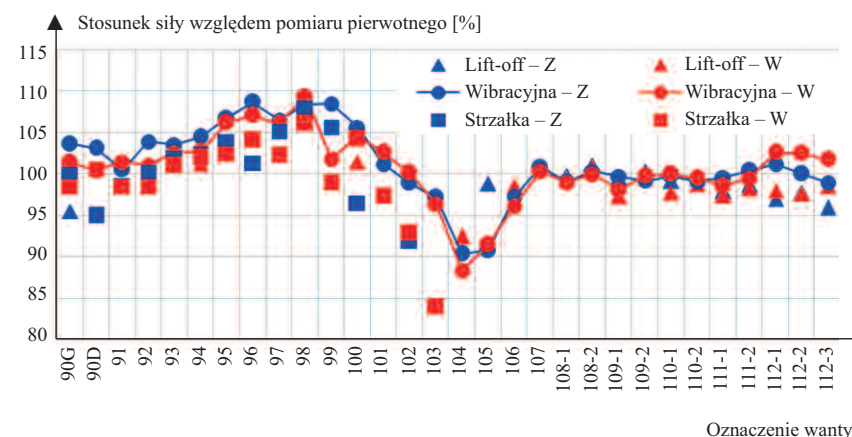
nia idealnej krzywizny cięgnię tuż przy zakotwieciu.

Wykonano również aproksymację trasy cięgnię za pomocą krzywej łańcuchowej. Siły zidentyfikowane na podstawie aproksymacji parabolą i krzywą łańcuchową nie różniły się o więcej niż 3%, a w przypadku pomiarów uznanych za miarodajne o więcej niż 1%.



Rys. 2. Porównanie sił naciągu wany identyfikowanych trzema metodami

Fig. 2. A comparison of cable normal forces determined by three methods



Rys. 3. Względna różnica wartości siły w wancie między pomiarami w 2020 r. i pomiarem pierwotnym

Fig. 3. Relative differences between the cable normal forces identified in 2020 and directly after construction

Tabela 3. Porównanie sił zidentyfikowanych metodami lift-off i strzałki ugięcia wraz z obliczonym wskaźnikiem dokładności

Table 3. A comparison between forces identified by the lift-off method and the sag method, with analyzed inaccuracy ratio

Charakterystyka	Strona								
	wschodnia					zachodnia			
	90D 2	94 6	100 12	104 16	106 18	90G 1	97 9	102 14	105 17
Siła ze strzałki $F_f$ [kN]	4396	3562	2019	2151	3870	4183	2749	1725	3070
Siła z lift-off $F_L$ [kN]	4159	3536	1965	2609	4434	4005	2752	1875	3851
Stosunek sił $F_L/F_f - 1$ [%]	5,79	0,74	2,79	-17,53	-12,72	4,45	-0,10	-7,98	-20,29
Różnica sił $F_L - F_f$ [kN]	240	26	55	-457	-564	178	-3	-150	-782
Strzałka ugięcia $f$ [mm]	32,90	29,37	11,32	4,54	5,43	41,62	18,03	6,30	4,67
Odchylenie standardowe $S_{std}$ [mm]	0,46	0,24	0,04	0,03	0,24	0,51	0,27	0,11	0,36
Wskaźnik dokładności $S_{std}/f$ [%]	1,39	0,83	0,36	0,75	4,38	1,22	1,48	1,80	7,60

### Porównanie wyników

Zaprezentowane metody pomiaru siły wskazują, iż niezależnie od metody w przypadku części wany uzyskano bardzo zbliżone wyniki (rysunek 2), a w pozostałych przypadkach różnica, w zależności od metody pomiaru, mieści się w zakresie  $\pm 5\%$ . Jedynie w przypadku wany 103-W wynik uzyskany metodą obliczania za pomocą strzałki ugięcia odbiega o ponad 10% od siły uzyskanej metodą wibracyjną (rysunek 3). Metoda wibracyjna jest najekonomiczniejsza i daje bardzo dobre rezultaty. W metodzie lift-off konieczny jest dostęp do zakotwień i wykorzystanie dużej liczby specjalistycznego sprzętu. Kontrowersyj-

