

Mgr inż. Maciej Jamka  
Politechnika Krakowska

# BADANIA PRZEMIESZCZEŃ PIONOWYCH KONSTRUKCJI POD OBCIĄŻENIEM DYNAMICZNYM

## SPIS TREŚCI

1. Wstęp
2. Opis urządzenia
3. Pomiary ugięć konstrukcji mostowych
4. Pomiary ugięć szyny w torze kolejowym

## STRESZCZENIE

*W artykule przedstawiono opis i wyniki pomiarów przemieszczeń pionowych kilku różnych konstrukcji poddanych obciążeniom dynamicznym. Zastosowano nową technikę pomiarów liniowych, z wykorzystaniem precyzyjnego enkodera. Pomiary przemieszczeń o wielkości od kilku do kilkunastu milimetrów wybranych punktów konstrukcji przeprowadzono przy częstotliwości próbkowania 1000 Hz i rozdzielczości 0,01 mm.*

## 1. WSTĘP

Mosty kolejowe należą do wielu obiektów inżynierskich, dla których są prowadzone pomiary odbiorcze oraz cykliczne pomiary inwentaryzacyjne, związane z określeniem przemieszczeń i odkształceń elementów konstrukcyjnych. Dodatkową cechą tych obiektów o wydłużonym kształcie jest zmienność odkształceń w czasie, wywołana m.in. eksploatacją tych obiektów. W wielu pracach badawczych, związanych z konstrukcją nawierzchni kolejowych, pojawia się również konieczność pomiaru przemieszczeń części składowych nawierzchni poddanych obciążeniom dynamicznym.

Klasyczne techniki geodezyjne nie są w stanie zapewnić odpowiedniej częstotliwości rejestracji danych w celu określenia charakterystyki drgań poszczególnych elementów konstrukcji poddanej obciążeniom dynamicznym. Można co prawda określić charakter drgań elementów konstrukcji, poddając obróbcie sygnał z pomiaru przyspieszeń zare-

jestrowany w czasie występowania zmiennych obciążeń lub wykorzystać do pomiaru naziemny radar interferometryczny, wykorzystujący technikę skokowej modulacji częstotliwości fali oraz interferometrii mikrofalowej, ale obie wspomniane technologie pomiaru nie pozwalają na uzyskanie natychmiastowej odpowiedzi na pytanie, jaka jest maksymalna wartość i pasmo zmian amplitudy przemieszczeń konstrukcji w badanym przekroju.

## 2. OPIS URZĄDZENIA

W 2009 roku autor artykułu opracował i wykonał konstrukcję prostego urządzenia pomiarowego do pomiarów przemieszczeń elementów konstrukcji poddanych obciążeniom statycznym lub dynamicznym. Według pierwotnych założeń, przyrząd służył jedynie do pomiaru przemieszczeń pionowych (ugięć konstrukcji) w odniesieniu do powierzchni terenu, na której był ustawiony. Istnieje również możliwość pomiaru tym przyrządem poziomych przemieszczeń badanej konstrukcji.

Wielkość przemieszczenia (ugięcia), jest wyznaczana z pomiaru kąta obrotu powierzchni kółka pomiarowego, na której nawinięto strunę stalową, zamocowaną z jednej strony do konstrukcji w badanym przekroju i obciążoną na drugim końcu ciężarkiem o odpowiednio dobranej masie, napinającym strunę. Przemieszczenie pionowe punktu zaczepienia struny do konstrukcji powoduje obrót kółka pomiarowego o kąt, którego wartość jest proporcjonalna do wartości przemieszczenia. Tak dobrano średnicę walca kółka pomiarowego, aby odczyt wartości kątowej najmniejszej działki podziału inkrementalnego enkodera optycznego, odpowiadał wartości liniowej obrotu kółka o 0,01 mm.

Zastosowany w przyrządzie enkoder składa się z dwóch podstawowych elementów:

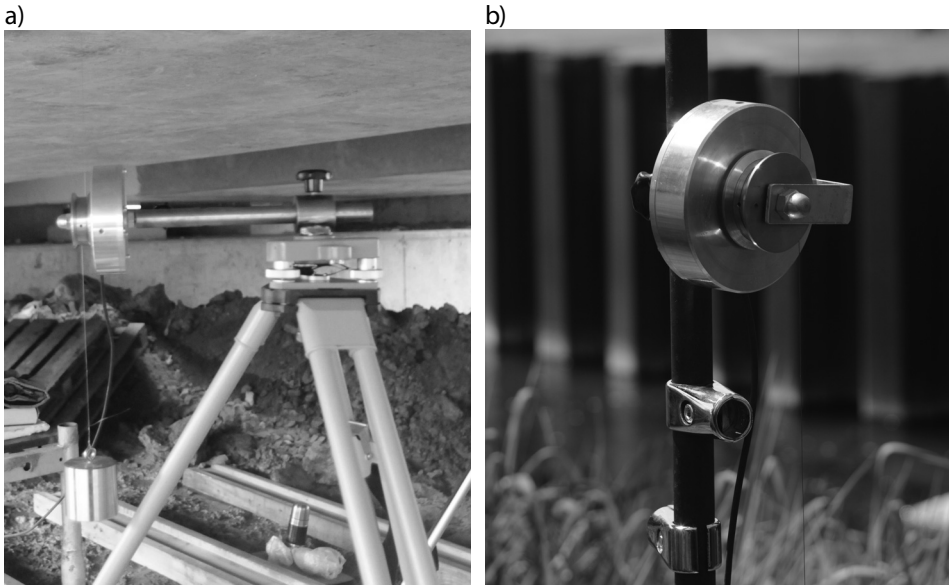
- precyzyjnego pierścienia pomiarowego o średnicy zewnętrznej  $\varnothing = 52$  mm z nanieśioną na zewnętrznej powierzchni pierścienia strukturą prążków o szerokości 20  $\mu\text{m}$ ,
- głowicy odczytowej przeznaczonej do rejestracji położenia prążków z pierścienia pomiarowego identyfikującej prążki w dwóch kanałach cyfrowych A i B przesuniętych fazowo o  $90^\circ$ .

Inkrementalność enkodera pozwala rejestrować dodatnie i ujemne przyrosty przemieszczenia liniowego. Rozdzielczość układu pomiarowego wynosi 5  $\mu\text{m}$ , przy częstotliwości rejestrowanych sygnałów na poziomie 1000 Hz. Sygnały z głowicy są rejestrowane przez mikroprocesor w trybie przerwaniowym gwarantując niezakłóconą ciągłość pomiaru.

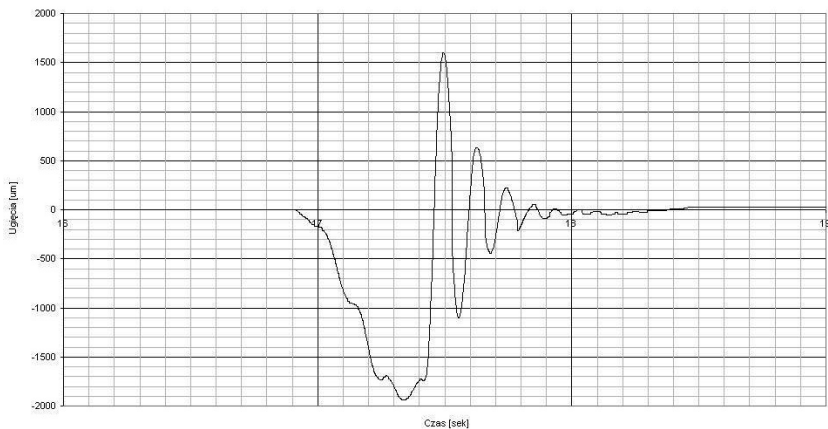
Sygnały cyfrowe z enkodera są przesyłane do pamięci wewnętrznej koncentratora. Oprogramowanie wewnętrzne koncentratora pozwala na wybór czasu pomiaru skokowo co 10 sek. oraz odczyt zarejestrowanej wartości maksymalnej i minimalnej przemieszczenia i wykonanie transmisji radiowej do rejestratora pliku danych z aktualnego pomiaru. Dedykowany program w rejestratorze pozwala na wizualizację przemieszczeń punktu w funkcji czasu oraz podaje wartość maksymalnego i minimalnego prze-

mieszczenia punktu w badanym przekroju w stosunku do położenia punktu przed obciążeniem. Konstrukcja przyrządu pomiarowego pozwala na mocowanie go na statywie ustawionym na gruncie pod badanym punktem (rys. 1a) lub mocowanie do pręta stalowego wbitego w grunt (rys. 1b).

Pomiary laboratoryjne testujące przyrząd w pełni potwierdziły założoną dokładność pomiaru przemieszczeń pionowych, zarówno od obciążeń statycznych, jak i obciążeń dynamicznych. Rysunek 2 przedstawia wykres drgań belki swobodnie podpartej, pobudzonej do drgań impulsem o znanej wartości.



Rys. 1. Przyrząd pomiarowy na stanowisku pomiarowym:  
a) zamocowany na statywie, b) zamocowany na pręcie wbitym w grunt



Rys. 2. Wykres drgań gasnących belki swobodnie podpartej – pomiar laboratoryjny

### 3. POMIARY UGIĘĆ KONSTRUKCJI MOSTOWYCH

Po przeprowadzeniu testów laboratoryjnych, w 2009 r. wykonano pomiary ugięć od obciążeń statycznych oraz dynamicznych podczas pomiarów odbiorczych nowych lub remontowanych konstrukcji nośnych kolejowych obiektów mostowych. Pomiary odbiorcze [2, 3] przeprowadza się, badając wielkości osiadań podpór oraz wielkości ugięć konstrukcji nośnych od obciążenia statycznego (zgodnego z projektem obciążeń próbnych) i ugięć od obciążenia dynamicznego w celu określenia tzw. współczynnika ugięcia dynamicznego.

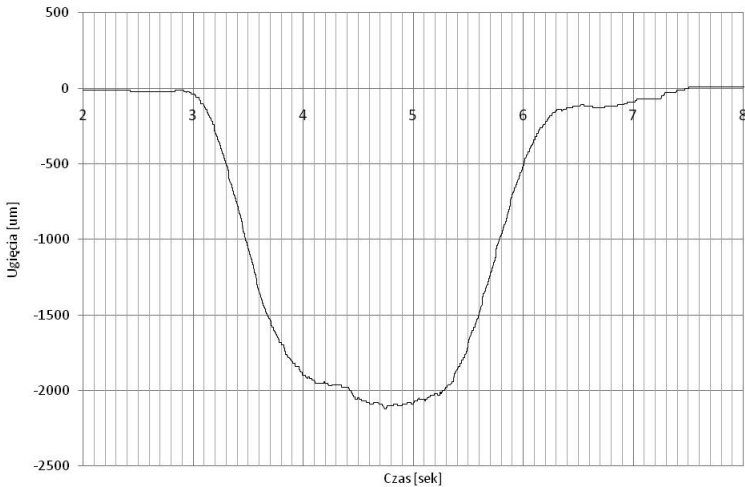
W chwili obecnej do przeprowadzenia pomiarów ugięć konstrukcji nośnych od obciążeń statycznych, stosuje się kilka metod pomiaru. Jedną z powszechnie stosowanych metod, są geodezyjne pomiary wysokościowe, przeprowadzane w wybranych punktach konstrukcji sposobem niwelacji precyzyjnej. Osiadanie podpór obiektu przeprowadza się metodami geodezyjnymi wykonując niwelację precyzyjną punktów usytuowanych na podporach. Pomiar ugięć konstrukcji można wykonać, stosując np. przyrząd zegarowy Maksymowa lub przyrządy mierzące wartości liniowych zmian na drodze pomiaru elektronicznego zmian pojemnościowych lub z wykorzystaniem liniałów elektronicznych. Do grupy wymienionych metod pomiaru ugięć konstrukcji od obciążeń statycznych, należy również zaliczyć opisaną metodę wykorzystującą precyzyjny enkoder.

Po raz pierwszy przyrząd zastosowano podczas badań odbiorczych nowego wiaduktu kolejowego w Pszczynie (w torze nr 1 we wrześniu 2009 r. i w torze nr 2 w październiku 2009 r.). Budowa tego wiaduktu z przęsłami kablobetonowymi o rozpiętości teoretycznej 16,75 m, umożliwiła likwidację jednopoziomowego skrzyżowania ulicy Bielskiej z linią kolejową nr 139 Katowice – Zwardoń. Pomiary przeprowadzono w bardzo ciężkich warunkach terenowych (rys. 3), obciążenie statyczne i przejazdy (obciążenie dynamiczne) wykonano lokomotywą ET22 (masa służbowa 83 400 kg).

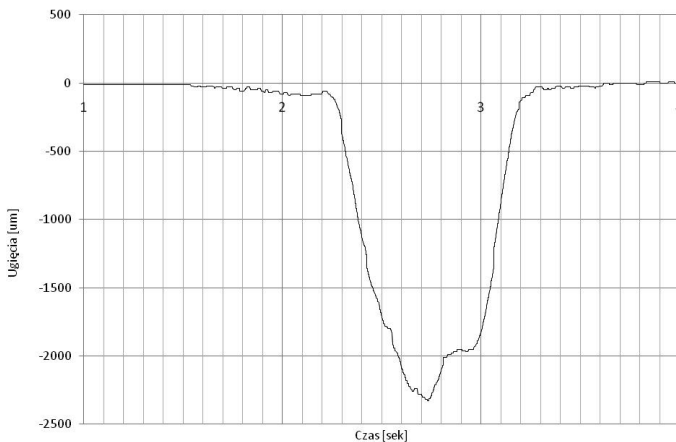


Rys. 3. Pomiary ugięć pod obciążeniem statycznym podczas obciążeń próbnych przęsła w torze nr 2 wiaduktu w Pszczynie

Ugięcia konstrukcji obciążonej statycznie i po odciążeniu mierzono w odstępach 15 minutowych. Ugięcia konstrukcji poddanej obciążeniom dynamicznym, mierzono podczas przejazdu przez wiadukt (w obu kierunkach) lokomotywy ET22 z prędkościami: 10, 30, 50, 70, 90 i około 100 km/h. Podczas tych badań wykonano łącznie po 12 pomiarów ugięć konstrukcji dla każdego przęsła poddanego obciążeniom dynamicznym. Wykresy ugięć konstrukcji z dwóch pomiarów dla przejazdów lokomotywy z różnymi prędkościami przedstawiono na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Wykres przebiegu ugięć w przęśle toru nr 1 – przejazd lokomotywy z prędkością  $V = 30$  km/h



Rys. 5. Wykres przebiegu ugięć w przęśle toru nr 1 – przejazd lokomotywy z prędkością  $V = 100$  km/h

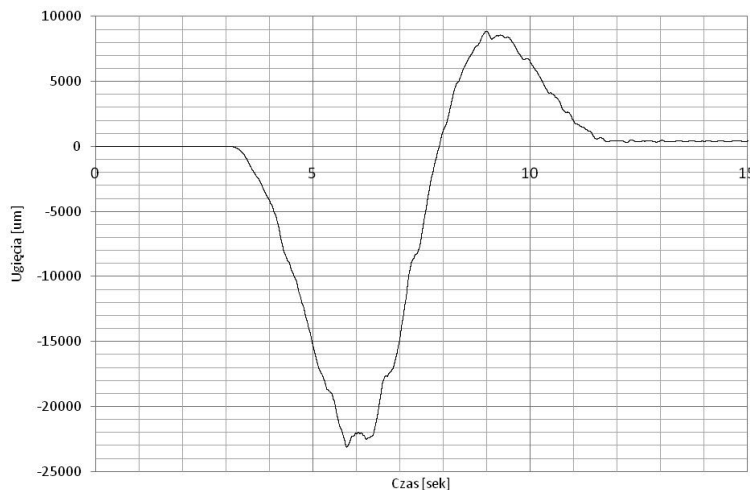
W latach 2009–2010 wykonywano pomiary odbiorcze obiektów mostowych na 8 wiaduktach kolejowych nowych i remontowanych o różnych konstrukcjach nośnych.

Z pomiarowego punktu widzenia, interesujący był nowy wiadukt nad budowanym odcinkiem autostrady A-1, na odcinku Katowice – Gorzyczki granica państwa (rys. 6).



Rys. 6. Wiadukt nad autostradą podczas obciążeń próbnych przęśła nr 1 w torze nr 2

Badano ugięcia konstrukcji nośnej, którą stanowiła belka ciągła dwuprzęsłowa zakrzywiona w planie, zbudowana z 2 dźwigarów pełnościennych ze współpracującym pomostem ortotropowym. Długość całkowita wiaduktu wynosi 98,37 m. Badania odbiorcze przeprowadzono, obciążając na przemian oba przęśła. Obciążenie statyczne wywoływano dwiema lokomotywami S200 o ciężarze służbowym 107 ton. Badania ugięć od obciążenia dynamicznego przeprowadzono podczas przejazdów lokomotywy S200 z prędkościami 10, 20, 30 i 50 km/h (rys. 7).



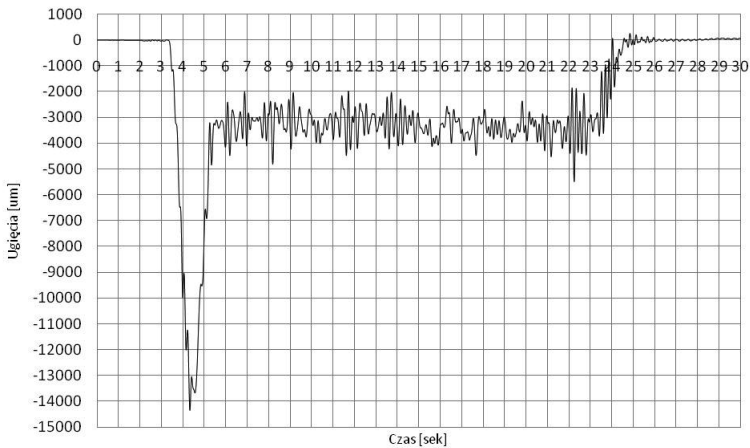
Rys. 7. Wykres ugięć w przęśle nr 1 (belka dwuprzęsłowa) w torze nr 1 – przejazd lokomotywy z prędkością  $V = 50$  km/h

W maju 2011 r. we współpracy z Katedrą Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa AGH w Krakowie przeprowadzono serię pomiarów ugięć konstrukcji stalowej przęsła mostu kolejowego na rzece Raba (rys. 8), na linii kolejowej nr 91 Kraków – Medyka. Mierzono ugięcia wywołane przejazdem pociągów towarowych i osobowych w środku przęsła o rozpiętości około 25 m, na którym tor bezстыkowy ułożony jest na mostownicach. Zarejestrowano również ugięcia konstrukcji podczas przejazdu drezyny oraz wpływ oddziaływania na grunt (drżania gruntu) obciążeń od pociągu towarowego, przejeżdżającego na moście.

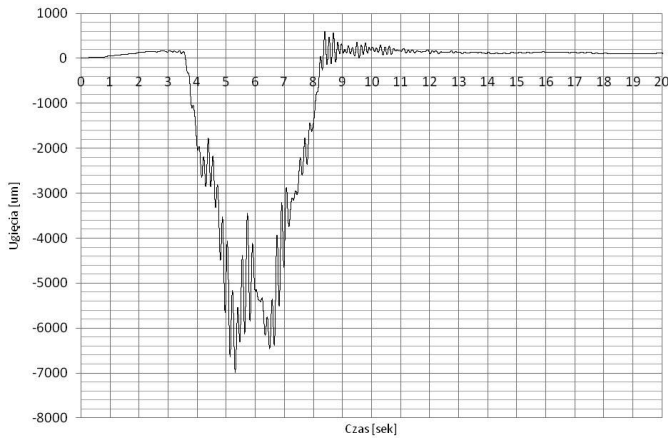


Rys. 8. Pomiary ugięć od obciążeń dynamicznych – most kolejowy nad rzeką Rabą

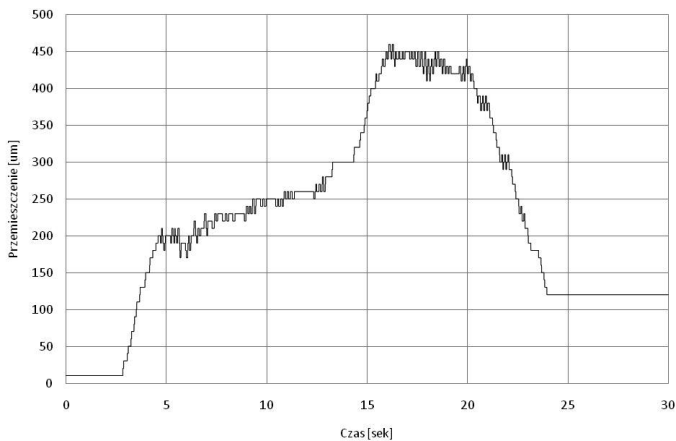
Wyniki pomiarów ugięć konstrukcji podczas przejazdu pociągu towarowego oraz pociągu osobowego po badanym przęsle przedstawiono na rysunkach 9 i 10. Stwierdzono, że oddziaływania dynamiczne przejeżdżających po moście pociągów i wywołane tym obciążeniem drżania gruntu mają wpływ na wyniki pomiarów ugięć konstrukcji mostu, co potwierdza wykres przemieszczeń przedstawiony na rysunku 11.



Rys. 9. Wykres przebiegu ugięć przęsła mostu – przejazd pociągu towarowego



Rys. 10. Wykres przebiegu ugięć przęsła mostu – przejazd jednostki EN57



Rys. 11. Wykres przemieszczeń spowodowanych sprężystym skręceniem wspólnej podpory w gruncie w czasie przejazdu pociągu towarowego po sąsiednim torze

#### 4. POMIARY UGIĘĆ SZYNY W TORZE KOLEJOWYM

Prace naukowo-badawcze Katedry Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego Politechniki Krakowskiej obejmują między innymi pomiary ugięć szyn toru kolejowego pod obciążeniem eksploatacyjnym. Pomiary są prowadzone na dwóch odcinkach poligonowych, z których jeden zlokalizowano w torze stacyjnym w Ruszczy, a drugi w torze szlakowym nr 1 linii kolejowej nr 94, na odcinku przejściowym przed mostem na rzece Skawa. Na obu odcinkach nawierzchnia jest zbudowana z szyny UIC60 na podkładach drewnianych z przytwierdzeniem sprężystym.

Pomiary przeprowadzono w wybranych przekrojach (okienka pomiędzy podkładami) podczas przejazdów z różnymi prędkościami lokomotywy SM42 (I odcinek poligonowy) lub lokomotywy ET22 (II odcinek poligonowy, rysunek 12). Na obu odcinkach wykonano

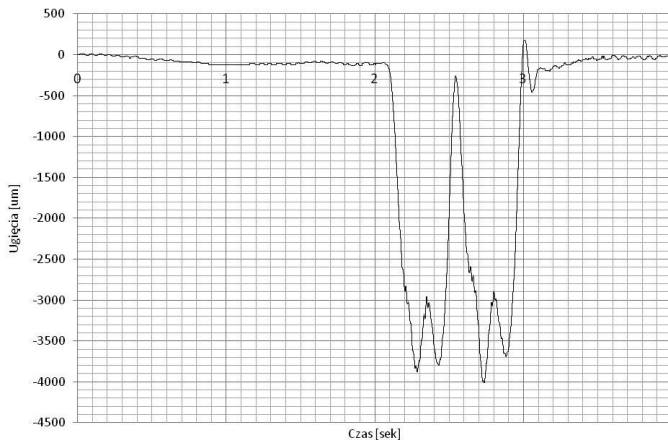


trzy serie badań dla różnych obciążeń dynamicznych. Przykładowe wykresy ugięć szyny w tym samym przekroju na I odcinku poligonowym dla różnych obciążeń, przedstawiono na rysunkach 13 i 14, a wykresy ugięć szyny na II odcinku poligonowym na rysunkach 16 i 17.

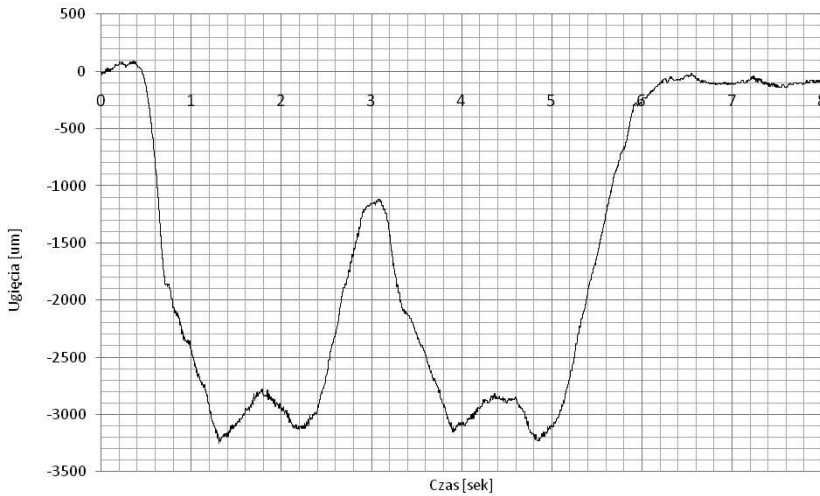


Rys. 12. Pomiary ugięć szyny od obciążeń dynamicznych – odcinek poligonowy II

W badaniach na odcinkach poligonowych ugięcia szyn od obciążeń statycznych mierzono przyrządem oraz precyzyjnym niwelatorem kodowym. Pomiar niwelatorem prowadzono, wykonując odczyty z krótkich łątek przymocowanych do stopki szyny (rys. 12) w wybranych przekrojach w celu określenia linii wpływu obciążenia statycznego na ugięcie szyny w funkcji odległości od punktu przyłożenia siły.

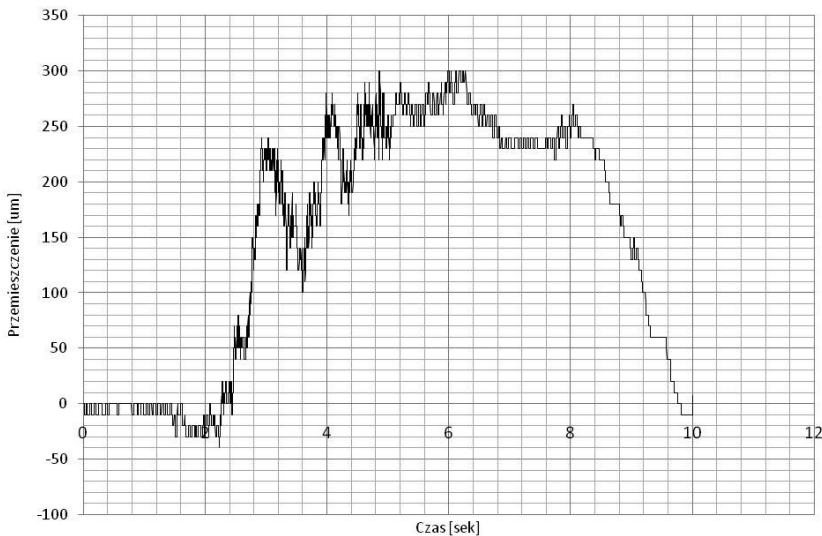


Rys. 13. Wykres przebiegu ugięć szyny – przejazd lokomotywy SM42,  $V = 60$  km/h



Rys. 14. Wykres przebiegu ugięć szyny – przejazd lokomotywy SM42,  $V = 10$  km/h

Wyniki uzyskane z pierwszych pomiarów ugięć szyny wykonanych przyrządem ustawionym na statywie na torowisku, wykazały wpływ drgań statywu na mierzone wartości ugięć szyny od obciążeń dynamicznych, co potwierdziły wyniki pomiaru testującego (rys. 15). Zmodyfikowano więc metodę pomiaru, mocując przyrząd pomiarowy do pręta stalowego wbitego o grunt (rys. 16).

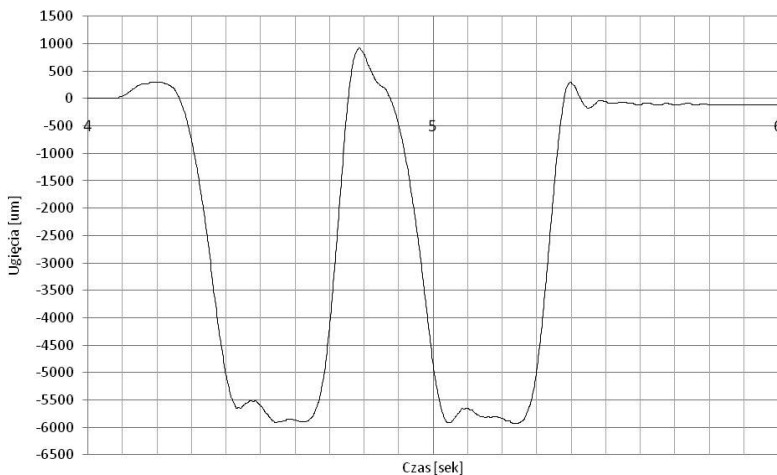


Rys. 15. Wykres przemieszczeń przyrządu ustawionego na statywie od obciążeń gruntu podczas przejazdu lokomotywy SM42

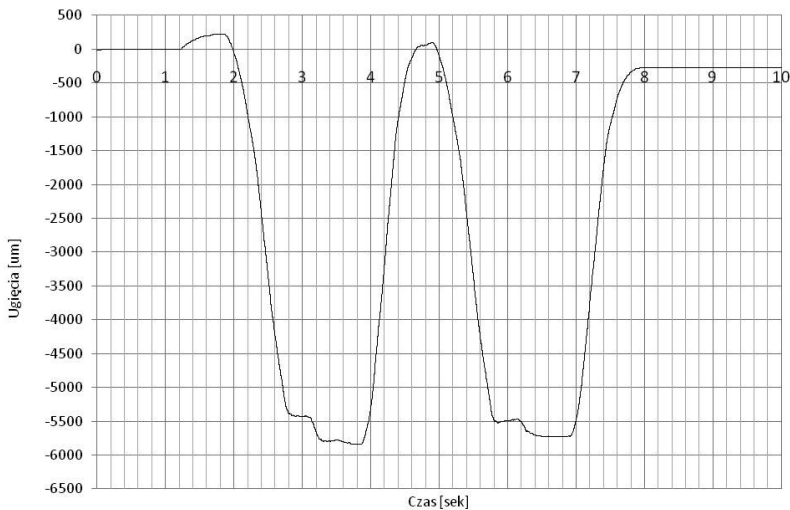


Rys. 16. Test przyrządu zamocowanego do pręta wbitego w podtorze

Zmiana sposobu mocowania przyrządu (mocowanie do pręta), pozwoliła na wyeliminowanie niemal do zera (maksymalna wyznaczona wartość 0,02 mm) wpływu drgań gruntu na wartości mierzonej ugięć szyny od obciążenia dynamicznego. Wszystkie pomiary ugięć szyn na II odcinku poligonowym (rys. 17, 18) od obciążenia statycznego i dynamicznego, zostały przeprowadzone przyrządem mocowanym do pręta wbitego w grunt torowiska.



Rys. 17. Wykres przebiegu ugięć szyny – przejazd lokomotywy ET22,  $V = 60$  km/h



Rys. 18. Wykres przebiegu ugięć szyny – przejazd lokomotywy ET22,  $V = 10$  km/h

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. Przedstawione w artykule wyniki pomiarów przemieszczeń pionowych (ugięć) konstrukcji poddanych obciążeniom dynamicznym pokazują możliwości opisanej metody pomiaru.
2. Prezentowany przyrząd zastosowano do pomiaru pionowych przemieszczeń punktów konstrukcji, ale możliwy jest również pomiar, np. przemieszczeń poziomych.
3. Przyjęta zasada pomiaru wartości liniowych przez pomiar kąta (enkoder), pozwala na pomiar nawet znacznych wielkości przemieszczeń elementów konstrukcyjnych ze stałą dokładnością (0,01 mm) wynikającą z rozdzielczości urządzenia. Na uwagę zasługuje również duża (1000 Hz) częstotliwość próbkowania.
4. Cyfrowy sygnał z przyrządu pomiarowego można przesyłać bezprzewodowo do dowolnego rejestratora i wykorzystując dedykowane oprogramowanie, dokonać wstępnej analizy uzyskanych wyników.

## BIBLIOGRAFIA

1. Jamka M., Ryż K.: *Zastosowanie pochylomierza do badania stanu deformacji przęseł mostowych*. „Zeszyty Naukowo-Techniczne”. Oddział SITK w Krakowie. Kraków, 1992, Zeszyt 21.
2. PN-S-1050:1989 *Obiekty mostowe – Konstrukcje stalowe – Wymagania i badania*.
3. PN-S-1040:1999 *Obiekty mostowe – Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone – Wymagania i badania*.