

Juliusz SOŁKOWSKI, Jarosław GÓRSZCZYK, Dariusz KUDŁA

BADANIA CZUJNIKÓW UGIĘĆ SZYN ORAZ CAŁKOWANIE SYGNAŁU Z CZUJNIKA PRZYSPIESZEŃ PIONOWYCH SZYNY

Streszczenie

W artykule przedstawiony został problem dokładności pomiarów przemieszczenia w laboratoryjnych badaniach dynamicznych z użyciem różnych typów czujników. Przeanalizowano trzy typy czujników mierzących ugięcie szyny, czujnik laserowy, magneto-indukcyjny oraz wiropływowy. Wyniki uzyskane za pomocą poszczególnych czujników porównywano między sobą oraz z wzorcowym wymuszeniem kinematycznym zrealizowanym za pomocą serwohydraulicznej maszyny wytrzymałościowej. Ponadto przedstawiono wynik całkowania rzeczywistego sygnału przyspieszeń szyny w celu uzyskania wykresów ugięć. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów i tabel. Stwierdzono, że najlepszą zgodność z sygnałem generowanym przez maszynę wytrzymałościową uzyskał czujnik magneto indukcyjny. W zakresie całkowania sygnału przyspieszeń pionowych szyny w celu uzyskania ugięć szyny stwierdzono możliwość stworzenia odpowiedniej metody pomiarowej. Jednakże na obecnym etapie nie może być ona jeszcze zastosowana jako rutynowa metoda pomiarowa, gdyż jej skuteczność wynosi ok. 20%. Autorzy pracują nad jej udoskonaleniem.

WSTĘP

Pomiar ugięć dynamicznych szyny jest jednym z podstawowych narzędzi służących do oceny stanu toru. Autorzy niniejszego referatu mieli dwa główne cele badawcze:

- opracowanie metodyki bezpośredniego pomiaru ugięć szyny, która poprzedzona była laboratoryjnymi badaniami różnych typów czujników przemieszczeń w celu wytypowania najlepszego,
- opracowanie metodyki uzyskiwania ugięć szyny na podstawie całkowania sygnału przyspieszeń szyny.

Celem badań laboratoryjnych czujników przemieszczeń było wyznaczenie dokładności pomiarów. Wyniki uzyskane z pomiarów bezpośrednich czujnikami porównywano z wzorcowym wymuszeniem kinematycznym zrealizowanym za pomocą serwohydraulicznej maszyny wytrzymałościowej MTS o częstotliwości 30 Hz i amplitudzie +/- 1 mm. Badania przeprowadzono w Instytucie Inżynierii Drogowej i Kolejowej Politechniki Krakowskiej.

Dodatkowo opracowano procedurę wyznaczania przemieszczeń poprzez całkowanie sygnału przyspieszeń pionowych szyny na podstawie pomiarów terenowych. Wykonano je na liniach kolejowych nr 91, nr 100 oraz nr 8 w pobliżu Krakowa. Wszystkie pomiary wykonano przy współpracy z firmą NeoStrain sp. z o.o. z Krakowa [3,4].

Należy zauważyć, że uzyskanie ugięć szyny poprzez dwukrotne całkowanie sygnału przyspieszeń nie jest zadaniem łatwym. Przykładem publikacji z tego zakresu są [1,2]. Jednakże ich autorzy nie podają algorytmów do obróbki sygnału przyspieszeń. Stąd wystąpiła konieczność opracowania własnych procedur.

1. SPRZĘT LABORATORYJNY ORAZ METODOLOGIA BADAŃ

Stanowisko laboratoryjne, które zostało wykorzystane w badaniach dokładności pomiarów czujników przemieszczeń służy pierwotnie do badań właściwości mechanicznych materiałów. Bazuje ono na serwohydraulicznej ramie obciążającej 100 kN MTS Landmark oraz składa się z następujących dodatkowych elementów:

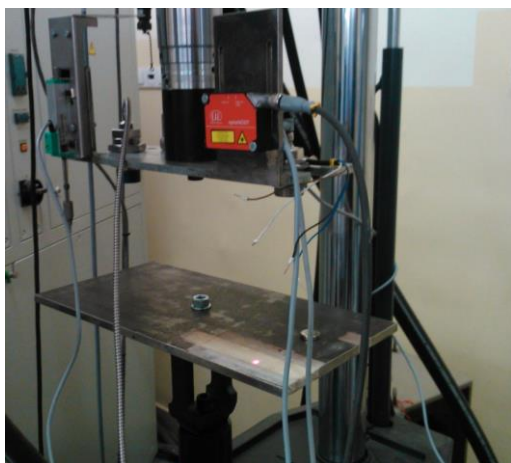
- komputer z oprogramowaniem sterującym,
- kontroler cyfrowy FlexTest 40,
- pompa hydrauliczna,

- przenośny panel sterowania LUCP,
 - komora termiczna,
 - akcesoria – szczęki mocujące,
 - czujniki pomiarowe kontaktowe lub bezkontaktowe systemy pomiarowe (Digital Image Correlation, wideoekstensometry)
- Na fotografii 1 i 2 pokazano stanowisko badawcze oraz ramę wraz z wysuniętą komorą termiczną.



Fot. 1. Rama obciążeniowa do 100 kN

Maszyna wytrzymałościowa o maksymalnym obciążeniu statycznym 100 kN umożliwia przeprowadzanie testów statycznych i zmęczeniowych niskocyklowych i wysokocyklowych o różnych współczynnikach asymetrii cyklu i częstotliwościach. Rama obciążeniowa o sztywnych i lekkich trawersach z wysokimi częstotliwościami drgań własnych i precyzyjnie wykonanymi kolumnami gwarantuje dokładne osiowanie. Przystosowane do pracy zmęczeniowej siłowniki wykorzystują niskotarciowe łożyska ślizgowe i montowane współosiowo czujniki przemieszczenia.



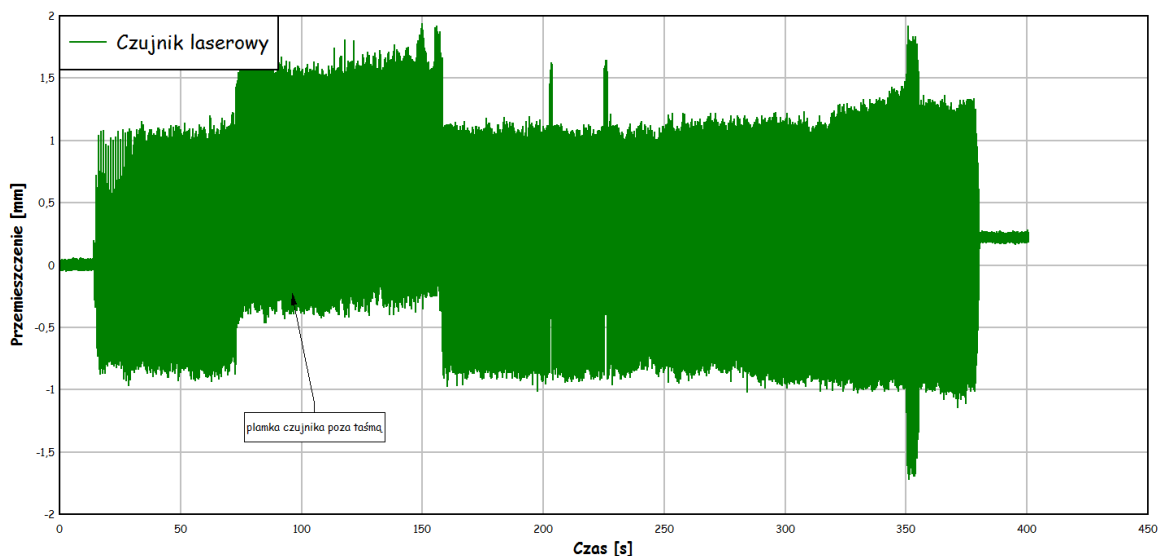
Fot. 2. Stanowisko do badań czujników

Rozdzielacze hydrauliczne z płynną regulacją ciśnienia wyposażone są w pięcioportowe serwowawory z proporcjonalną kontrolą ciśnienia hydraulicznego, sprzężonymi akumulatorami i trójpozycyjnym sterowaniem ciśnieniem. Zastosowanie tych rozwiązań pozwala na uzyskanie bardzo dobrych parametrów dla badań dynamicznych. Zależność pomiędzy wymuszonym przemieszczeniem, zastosowaną siłą i częstotliwością obciążenia pokazano na rysunku 1.

Zasilanie hydrauliczne maszyny wytrzymałościowej realizowane jest poprzez pompę hydrauliczną SilentFlo o niskim poziomie hałasu pracy. Ponadto stanowisko wyposażone jest w komorę klimatyczną pozwalającą na realizację badań w temperaturach od -40°C do +60°C.



Rys. 1. Wykres zależności pomiędzy przemieszczeniem, siłą i częstotliwością obciążenia [MTS]



Rys. 2. Wyniki pomiaru przemieszczenia, pomiar wykonany czujnikiem laserowym

2. PRZYKŁADY WYNIKÓW POMIARÓW CZUJNIKAMI PRZYJĘTYMI DO BADAŃ LABORATORYJNYCH

W dbałości o dokładność pomiarów przeanalizowano trzy typy czujników mierzących ugięcie szyny:

- czujnik laserowy,
- czujnik magneto-indukcyjny,
- czujnik wiroprowodowy.

2.1. Czujnik laserowy

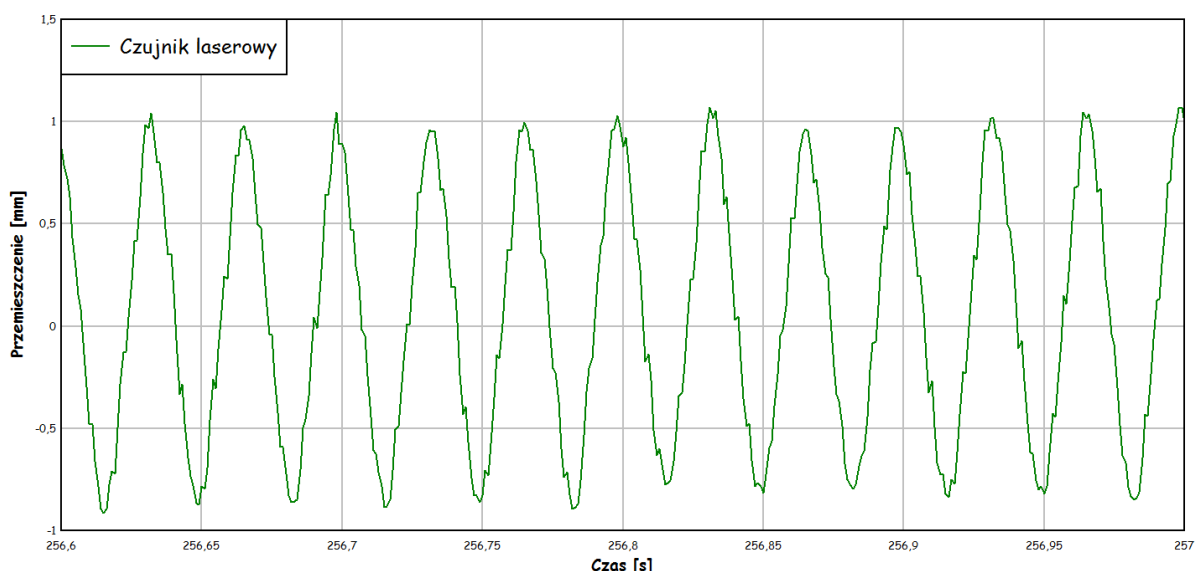
Czujniki laserowe realizują bezkontaktowy pomiar przemieszczenia w oparciu o zasadę triangulacji optycznej. Dioda laserowa oświetla punkt na powierzchni podlegającej pomiarowi. Światło odbite od tego miejsca jest kierowane na światłoczułą matrycę, gdzie jest przetwarzane w czasie rzeczywistym. Zdjęcie czujnika przedstawiono na fotografii 3.

W badaniach laboratoryjnych za cel dla czujnika laserowego posłużyła taśma malarska naklejona na stalową płytkę, która zapewniła gładką powierzchnię o małym stopniu odbicia (kilka warstw taśmy). Amplituda czujnika nie zmienia się wraz z częstotliwością, rysunek 2. W 350 sekundzie maszyna wytrzymałościowa zwiększa częstotliwość drgań, stąd też zanotowano krótkotrwałe zwiększenie amplitudy przemieszczenia.



Fot. 3. Laserowy triangulacyjny czujnik przemieszczenia optoNCDT

Przebieg przemieszczenia w czasie ma kształt zbliżony do sinusoidy, amplituda 1,96mm P-P. Odchylenia od przebiegu sinusoidalnego mogą wynikać z metody pomiaru (cyfrowej obróbki sygnału wejściowego). Rysunek 3.



Rys. 3. Kształt (zbliżenie) przebiegu przemieszczenia w czasie, pomiar wykonany czujnikiem laserowym

2.2. Czujnik wiropływowy

Podstawą działania indukcyjnego czujnika wiropływowego, jest zjawisko prądów wirowych. Zjawisko to występuje wszędzie tam gdzie w obszarze występowania zmiennego pola magnetycznego znajduje się obiekt metalowy. Pole magnetyczne napotykając na swojej drodze obiekt wykonany z metalu wnika do niego indukując przepływ prądu elektrycznego. Kierunek i wartość prądów wirowych zgodny jest z regułą Lenza. Zdjęcie czujnika wiropływowego przedstawiono na fotografii 4. Wyniki pomiarów przemieszczeń zmierzonych czujnikiem wiropływowym przedstawiono na rysunku 4 i 5. Przebieg ma charakter sinusoidalny, brak zniekształceń.

2.3. Czujnik magneto-indukcyjny

Zasada działania tych typów czujników polega na indukowaniu się siły elektromotorycznej w uzwojeniu cewki pod wpływem ruchu ferromagnetycznego. Przeszczanie się magnesu powoduje zmianę strumienia magnetycznego, który wytwarzany jest przez

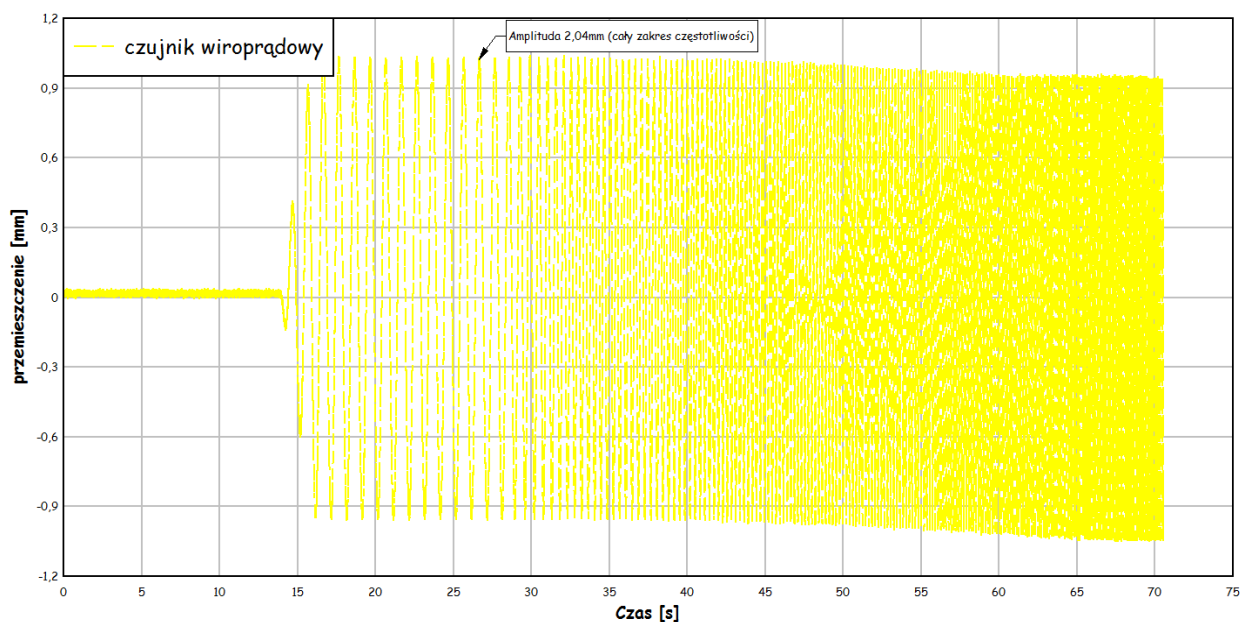


Fot. 4. Czujnik wiropływowy

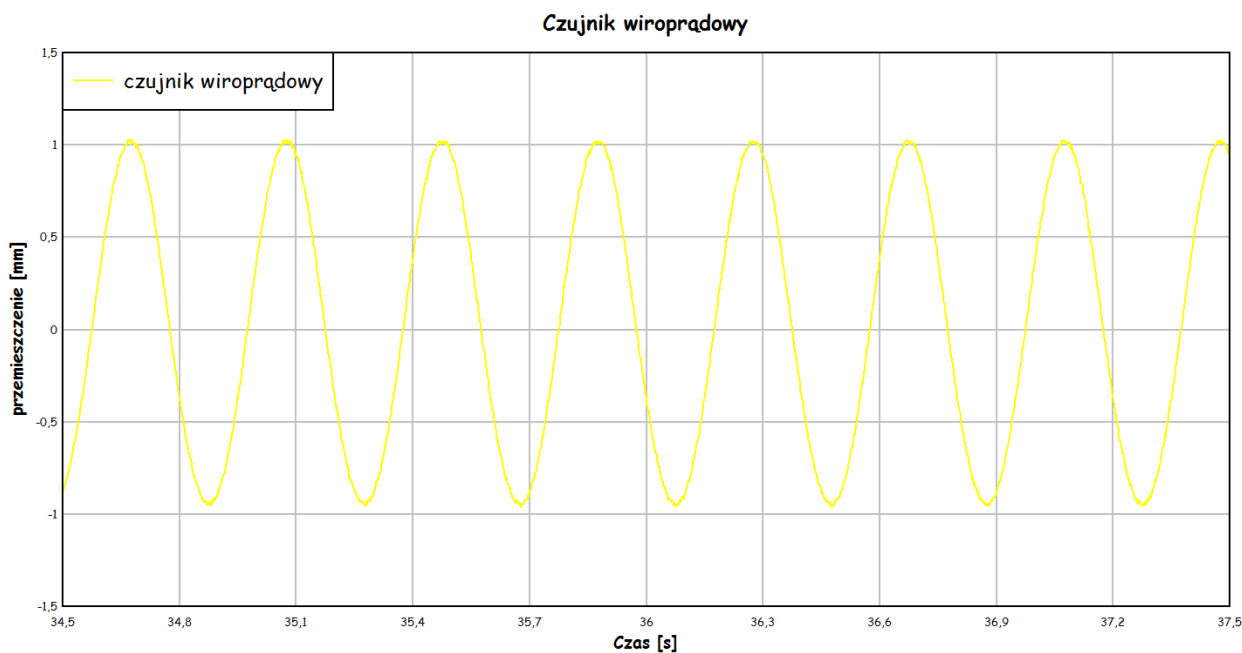
magnes trwały. Wartość siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu jest proporcjonalna do szybkości zmiany strumienia magnetycznego skojarzonego z uzwojeniem. Wygląd czujnika magneto-indukcyjnego przedstawiono na zdjęciu 5. Wyniki pomiarów przemieszczeń zmierzonych czujnikiem magneto-indukcyjnym przedstawiono na rysunku 6 i 7.



Fot. 5. Czujnik magneto-indukcyjny zamontowany w torze



Rys. 4. Wyniki pomiarów przemieszczenia, pomiar wykonany czujnikiem wiroprowadowym

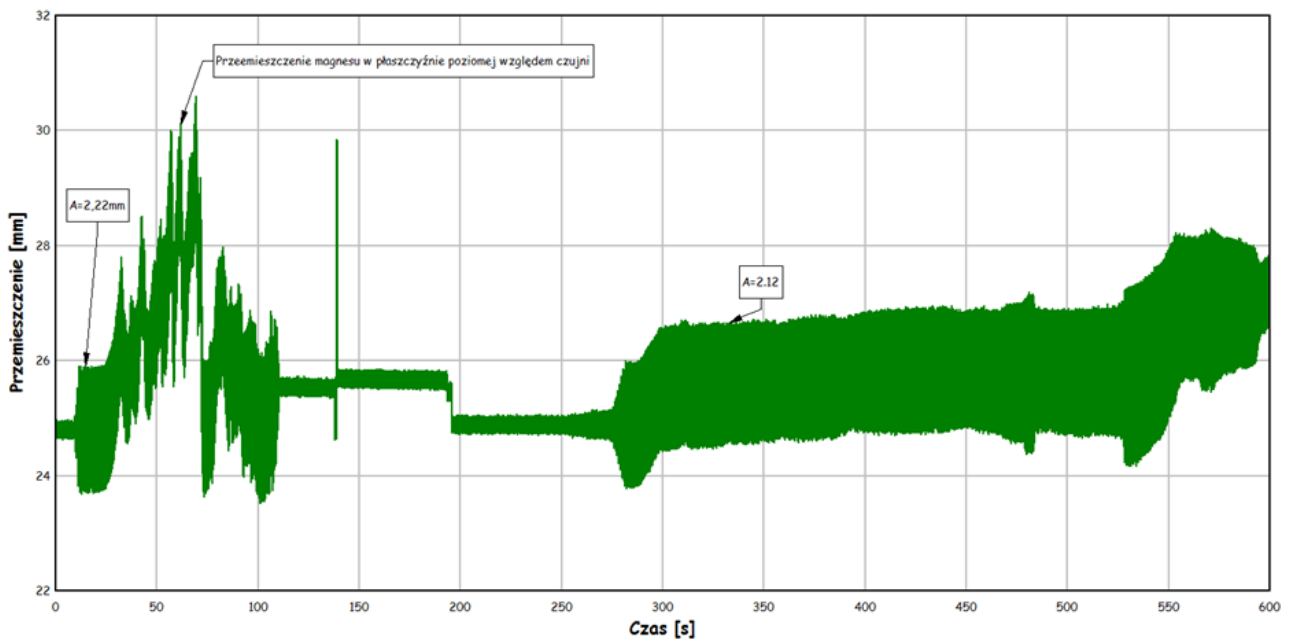


Rys. 5. Kształt (zbliżenie) przebiegu przemieszczenia w czasie, pomiar wykonany czujnikiem wiroprowadowym

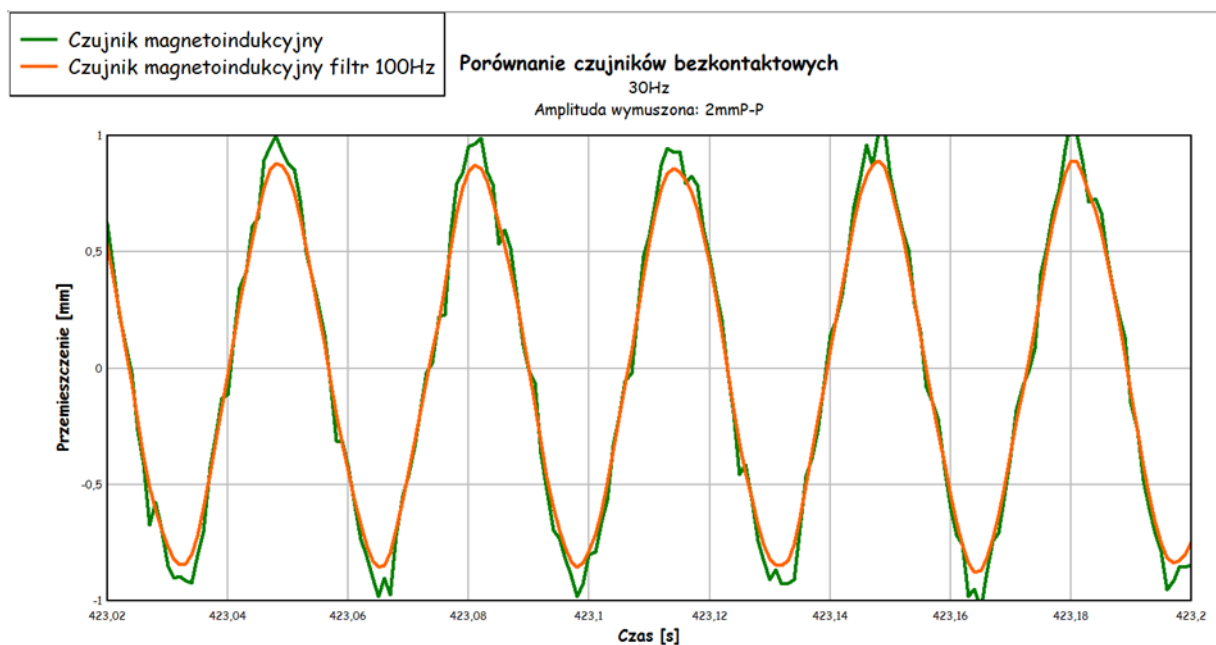
Jak widać na rysunku 6 bardzo duże znaczenie dla czujnika magneto-indukcyjnego ma położenie magnesu względem czujnika. Przemieszczenie w płaszczyźnie poziomej czujnika ma duży wpływ na powstawanie offsetu na czujniku. Wartość amplitudy na poziomie 2,1mm P-P $\pm 0,1$ przy wymuszeniu kinematycznym 2mm P-P może

oznaczać iż do czujnika należy stosować konwersje drugiego lub wyższego rzędu.

Przebieg przypomina kształtem sinusoidę o zaokrąglonych końcach, rysunek 7. Jednak kształt ten może wynikać z drgań poziomych czujnika względem magnesu.



Rys. 6. Wyniki pomiarów przemieszczenia, pomiar wykonany czujnikiem magneto-indukcyjnym



Rys. 7. Przebieg kształtu przemieszczenia, pomiar wykonany czujnikiem magneto-indukcyjnym

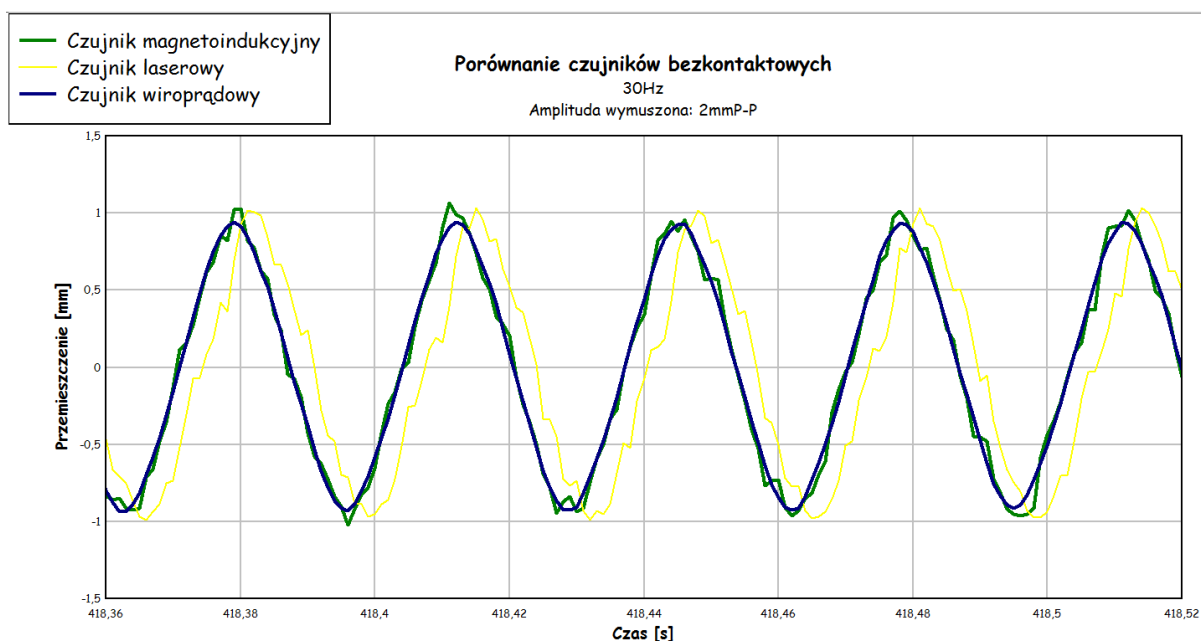
2.4. Porównanie wyników uzyskanych z kilku czujników

Jak widać na rysunku 8 i w tabeli 1 czujnik wiroprowodowy posiada sygnał najbardziej zbliżony do założonego (sinusoida) jednak to czujnik magneto-indukcyjny i laserowy posiadają bardziej zbliżoną amplitudę do zadanej. Ponadto przy czujniku laserowym dostrzegalne jest przesunięcie fazowe które najprawdopodobniej spowodowane jest obróbką sygnału przez przetwornik laserowy.

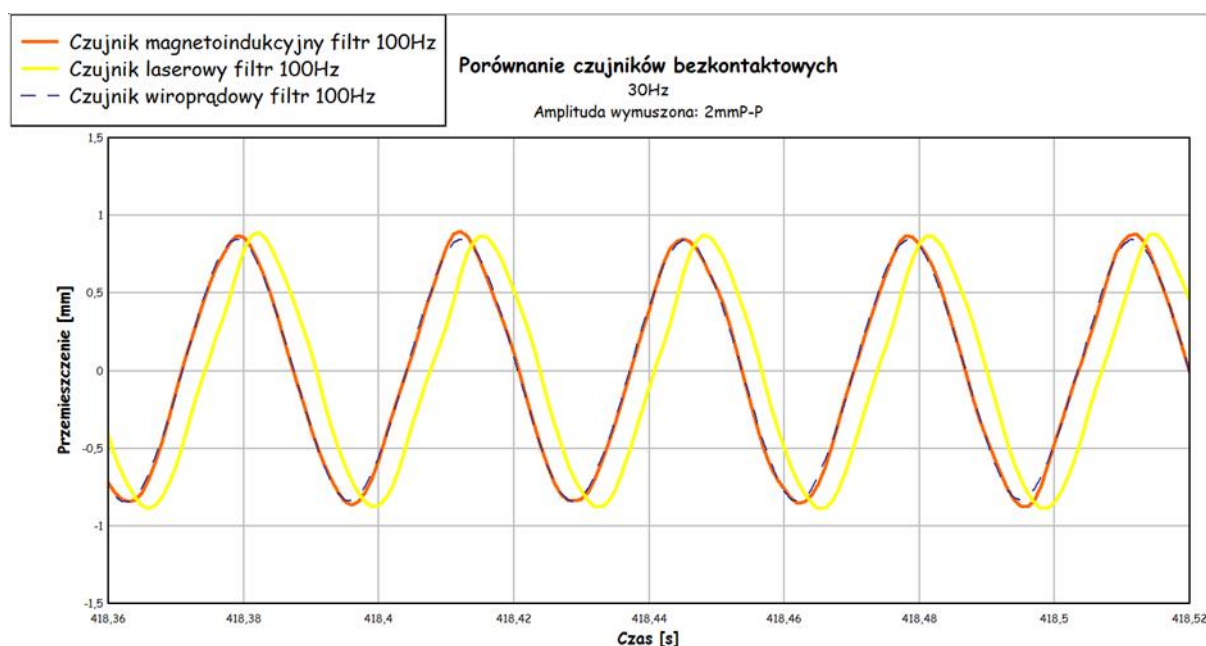
Na rysunku 9 i w tabeli 2 przedstawiono przebieg i wartości dla tego samego sygnału po zastosowaniu filtra dolnoprzepustowego 100Hz. Jak można zauważyć wszystkie przebiegi są zbliżone do siebie pod względem amplitudy (<0,1mm).

Tab. 1. Zestawienie wartości szczytowych czujników

TYP CZUJNIKA						
PUNKTY POMIĘDZY X=418,3599 a X=418,52						
	MAGNETO-INDUKCYJNY		LASEROWY		WIROPROWODOWY	
MIN	-1,0216200	dla X=418,396	-0,992353	dla X= 418,366	-0,934147	dla X= 418,362
MAX	1,0678100	dla X=418,411	1,033548	dla X= 418,481	0,942428	dla X= 418,511
MAX-MIN	2,0894300		2,025901		1,876575	
ŚREDNIA	0,0068534		-0,029092		0,012192	
porównywano 161 punktów						



Rys. 8. Zestawienie przebiegów przemieszczeń z pomiarów czujnikami bezdotykowymi przy częstotliwości 30 Hz oraz amplitudzie wymuszenia 1 mm



Rys. 9. Zestawienie przebiegów przemieszczeń z pomiarów czujnikami bezdotykowymi przy zastosowaniu filtru 100 Hz

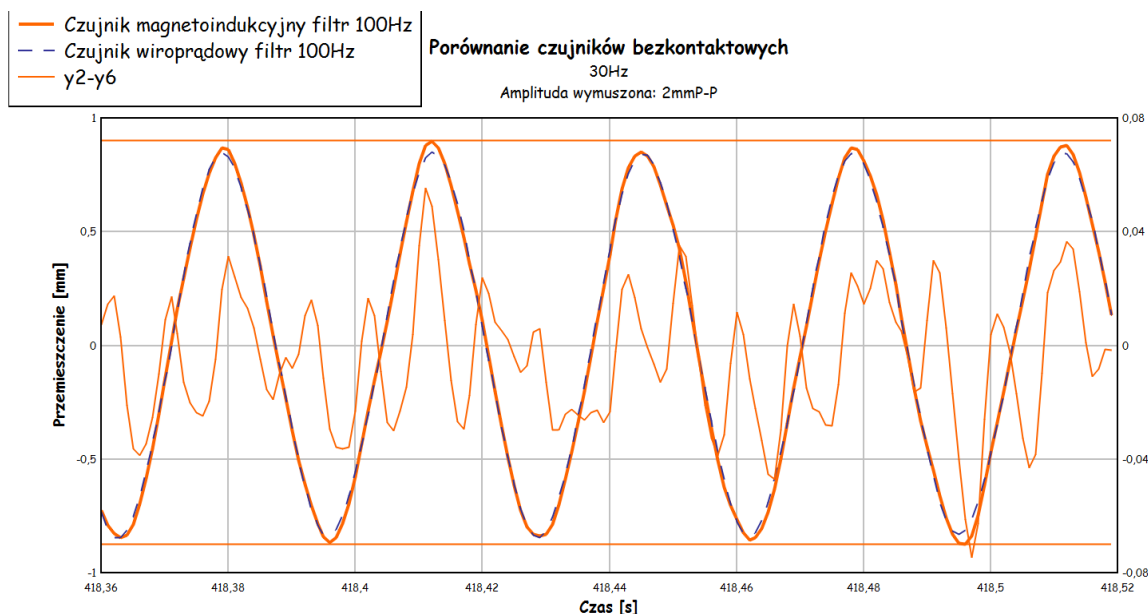
Tab. 2. Zestawienie wartości szczytowych czujników, filtr 100 Hz

TYP CZUJNIKA					
PUNKTY POMIĘDZY X=418,3599 a X=418,52					
	MAGNETO-INDUKCYJNY FILTR 100 Hz	LASEROWY FILTR 100 Hz	WIROPROWADOWY FILTR 100 Hz		
MIN.	0,8739396 dla X=418,496	0,8883253 dla X=418,366	0,846207 dla X=418,363		
MAX.	0,8993983 dla X=418,412	0,8921918 dla X=418,382	0,850228 dla X=418,412		
MAX-MIN	1,7733379	1,7805171	1,696435		
ŚREDNIA	0,0064576	0,0286494	0,011483		
porównywano 161 punktów					

Na rysunku 10 przedstawiono przebiegi uzyskane z czujników magneto-indukcyjnego i wiroprowadowego oraz różnice pomiędzy tymi sygnałami (y2-y6). Różnica pomiędzy odczytem z tych czujników w całym porównywanym zakresie jest mniejsza niż 0,2mm co uwidocznione jest na zestawieniu zamieszczonym w tabeli 3 (wartość max- wartość min).

Wyniki uzyskiwane w laboratorium wskazują, że czujnik magneto-indukcyjny jest wrażliwy na przesunięcie magnesu (odbiornika). Natomiast czujniki wiroprowadowy oraz laserowy zachowują się podobnie. Konieczne są dalsze badania w celu określenia dokładności czujników.

Porównanie przemieszczeń z wszystkich czujników i czujnika maszyny MTS przedstawiono na rysunku 11. Amplituda 1 mm i częstotliwość drgań 10 Hz.



Rys. 10. Przebiegi przemieszczeń z czujników wiroprowodowego i magneto-indukcyjnego wraz z różnicami pomiędzy sygnałami z tych czujników

Tab. 3. Szczytowe różnice pomiędzy sygnałami czujników wiroprowodowego i magneto-indukcyjnego, filtr 100 Hz

TYP CZUJNIKA						
	MAGNETOINDUKCYJNY FILTR 100 Hz		WIROPROWODOWY FILTR 100 Hz		y2-y6	
MIN.	-0,8966202	dla X=415,714	-0,8573925	dla X=436,145	-0,0876071	dla X=398,463
MAX.	0,8878288	dla X=430,367	0,8607251	dla X=414,074	0,0950045	dla X=442,778
MAX-MIN	1,7844490		1,7181176		0,1826116	
SREDNIA	-0,0077558		-0,0000522		-0,0005755	
LICZBA PUNKTÓW	51067		51472		51472	

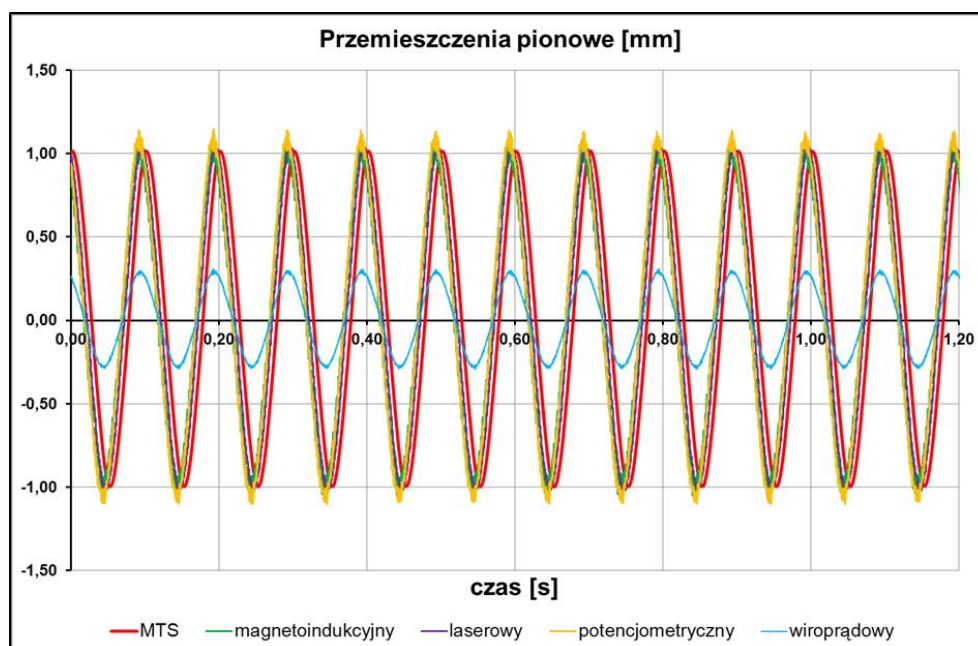
3. WYZNACZANIE PRZEMIESZCZEŃ (DRGAŃ) NA PODSTAWIE POMIARZONEGO SYGNAŁU PRZYŚPIESZEŃ.

W pierwszym etapie wyznaczania przemieszczeń, sygnał przyśpieszeń rozwijamy w szereg Fouriera.

Postać trygonometrycznego szeregu Fouriera funkcji f(x) jest następująca:

$$f(x) \cong \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2n\pi}{L} x + b_n \sin \frac{2n\pi}{L} x \right) \quad (1)$$

gdzie współczynniki a_n i b_n określone są poniższymi wzorami:



Rys. 11. Zestawienie przebiegów przemieszczeń z pomiarów czujnikami bezdotykowymi i czujnika maszyny MTS

$$a_n = \frac{2}{L} \int_{-l}^l f(x) \cos \frac{2n\pi}{L} x dx \quad (2)$$

$$b_n = \frac{2}{L} \int_{-l}^l f(x) \sin \frac{2n\pi}{L} x dx \quad (3)$$

W wyniku rozwinięcia, sygnał przyspieszeń uzyskujemy, jako sumę funkcji trygonometrycznych.

Na poniższych rysunkach pokazano dwa przykłady takiego rozwinięcia; dla $n = 50$ wyrazów szeregu (rysunek 12) oraz $n = 300$ wyrazów szeregu (rysunek 13).

W kolejnym kroku, otrzymany szereg całkujemy dwukrotnie i dostajemy - po pierwszym całkowaniu - nowy szereg, przedstawiający prędkość drgań (v), po drugim całkowaniu, przemieszczenia (u).

Poniższe wzory przedstawiają pierwszą i drugą całkę szeregu Fouriera.

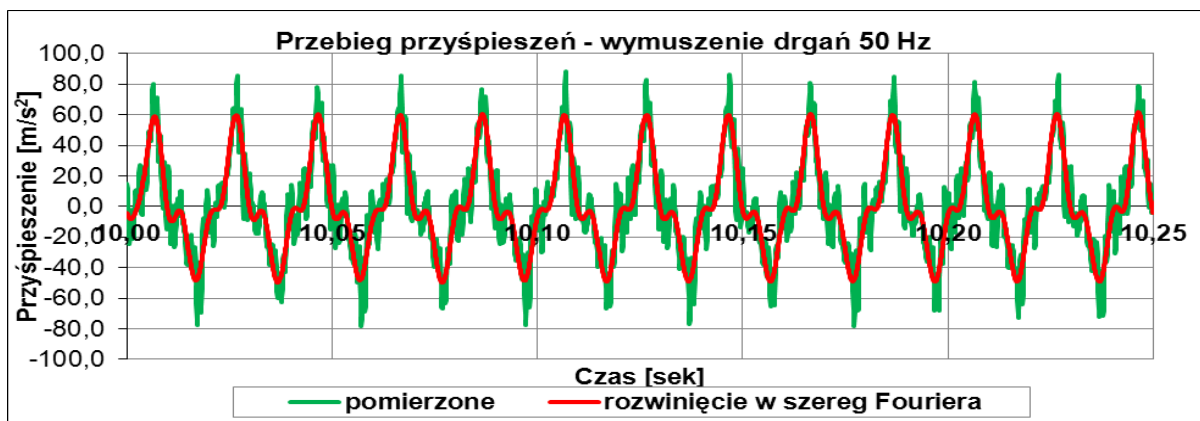
$$v = \int f(x) dx \cong \frac{a_0}{2} x + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\begin{matrix} a_n \frac{L}{2n\pi} \sin \frac{2n\pi}{L} x - \\ b_n \frac{L}{2n\pi} \cos \frac{2n\pi}{L} x \end{matrix} \right) + C_1 \quad (4)$$

$$u = \iint f(x) dx \cong \frac{a_0}{4} x^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\begin{matrix} -a_n \frac{L^2}{4n^2\pi^2} \cos \frac{2n\pi}{L} x - \\ b_n \frac{L^2}{4n^2\pi^2} \sin \frac{2n\pi}{L} x \end{matrix} \right) + C_1 x + C_2 \quad (5)$$

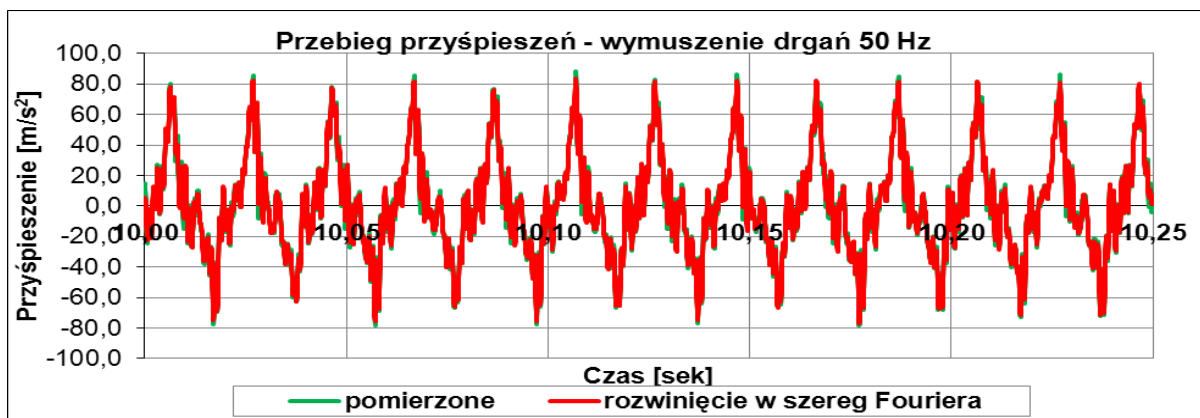
Kolejne rysunki pokazują efekt dwukrotnego całkowania przyspieszeń w celu uzyskania sygnału prędkości oraz przemieszczeń. Rysunki 14, 15 są wykonane dla częstotliwości wymuszenia równej 50 Hz, natomiast rysunki 16, 17 dla częstotliwości 10 Hz.

4. PRZYKŁAD CAŁKOWANIA RZECZYWISTEGO SYGNAŁU PRZYSPIESZEŃ

Pomiary przyspieszeń szyn przeprowadzono na szeregu obiektach w Krakowie – na linii nr 91, 100 oraz nr 8. Celem pomiarów było praktyczne wytestowanie działania wybranego czujnika do pomiarów – tj. czujnika magneto-indukcyjnego oraz uzyskanie sygnału przyspieszeń pionowych szyny w celu wykonania całkowania na danych rzeczywistych. Na fotografii 6 pokazano moment wykonywania pomiarów na linii nr 8. Natomiast na rysunkach 18,19 oraz 20 pokazano przebiegi czasowe pomierzonych przyspieszeń szyny, wynik pierwszego całkowania (przebieg prędkości szyny) oraz wynik dwukrotnego całkowania - tj. przebieg czasowy ugięcia szyny. Prędkość pociągu ok. 100 km/h.



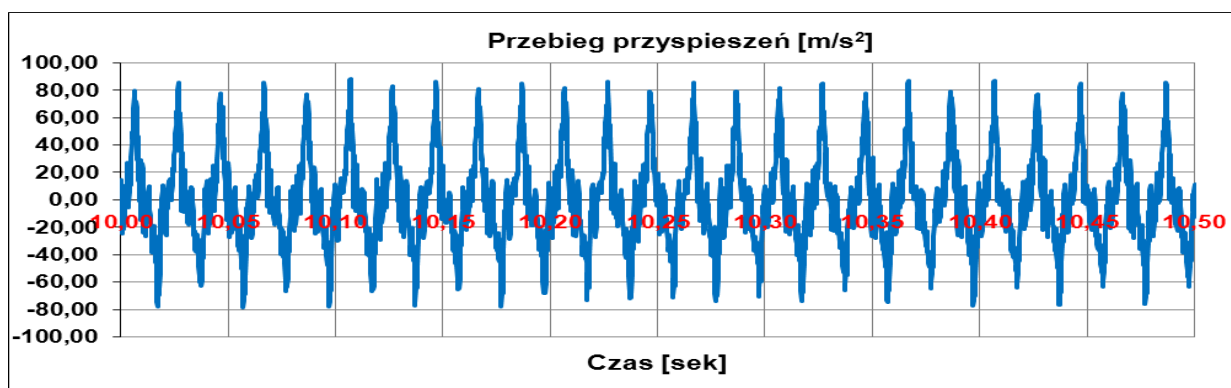
Rys. 12. Sygnał przyspieszeń jako suma funkcji trygonometrycznych dla $n=50$



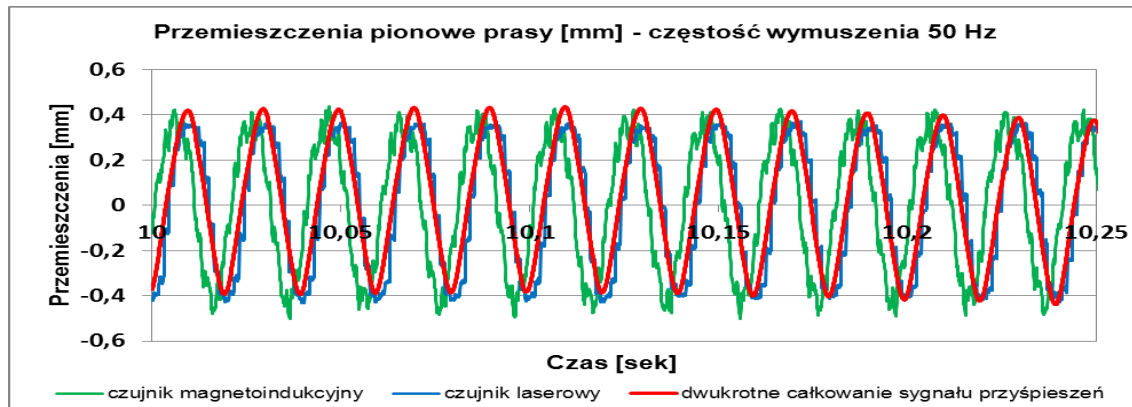
Rys. 13. Sygnał przyspieszeń jako suma funkcji trygonometrycznych dla $n=300$



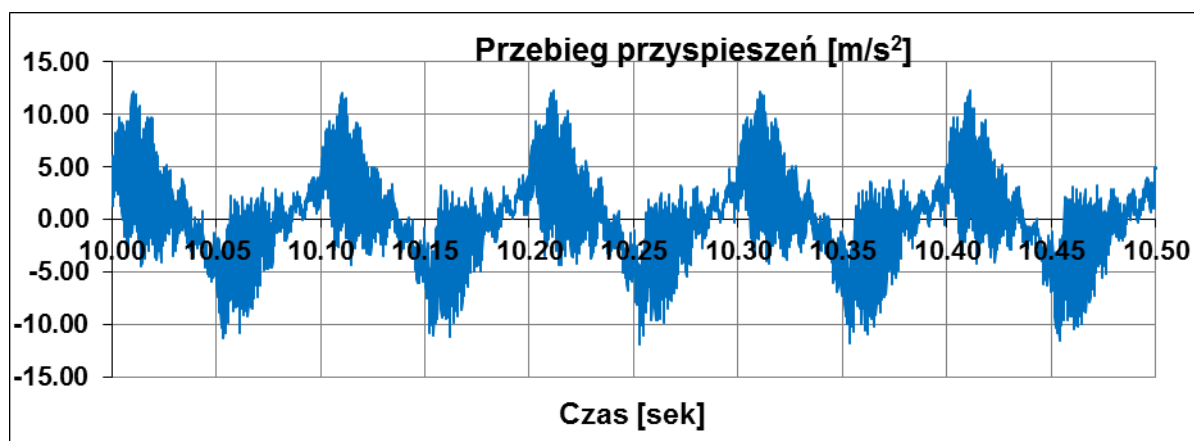
Fot. 6. Pomiar przyspieszeń elementów nawierzchni szynowej – linia nr 8 (przy współpracy z firmą NeoStrain sp. z o.o. z Krakowa)



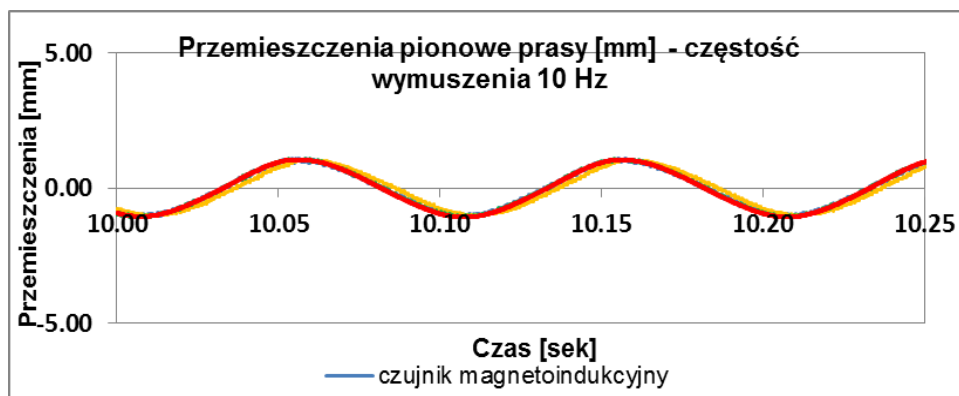
Rys. 14. Przebieg przyspieszeń prasy – częstotliwość wymuszenia wynosi 50 Hz



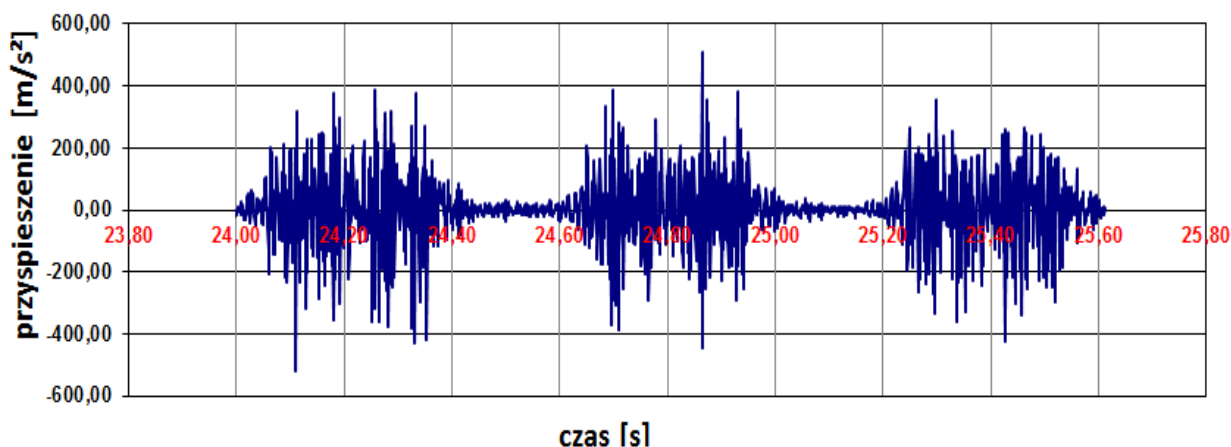
Rys. 15. Przebieg przemieszczeń maszyny zarejestrowanych przez czujnik magneto-indukcyjny i laserowy w porównaniu z przemieszczeniami otrzymanymi po dwukrotnym całkowaniu sygnału przyspieszeń – częstotliwość wymuszenia wynosi 50 Hz



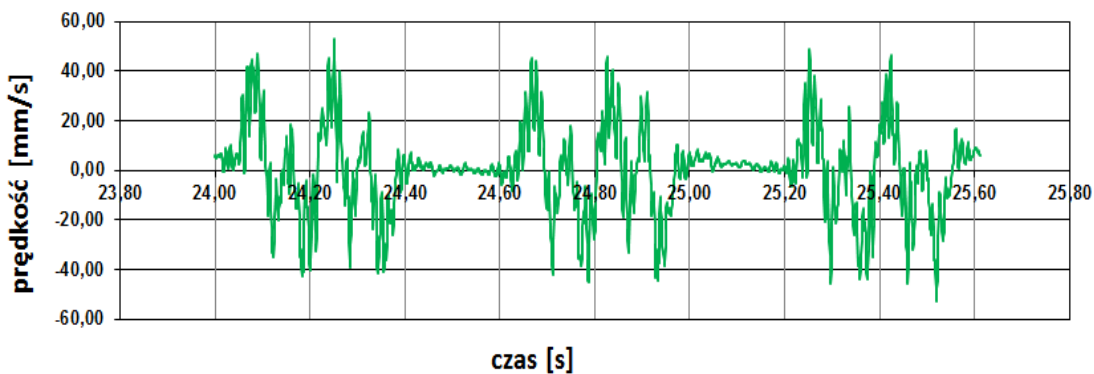
Rys. 16. Przebieg przyspieszeń maszyny – częstotliwość wymuszenia wynosi 10 Hz



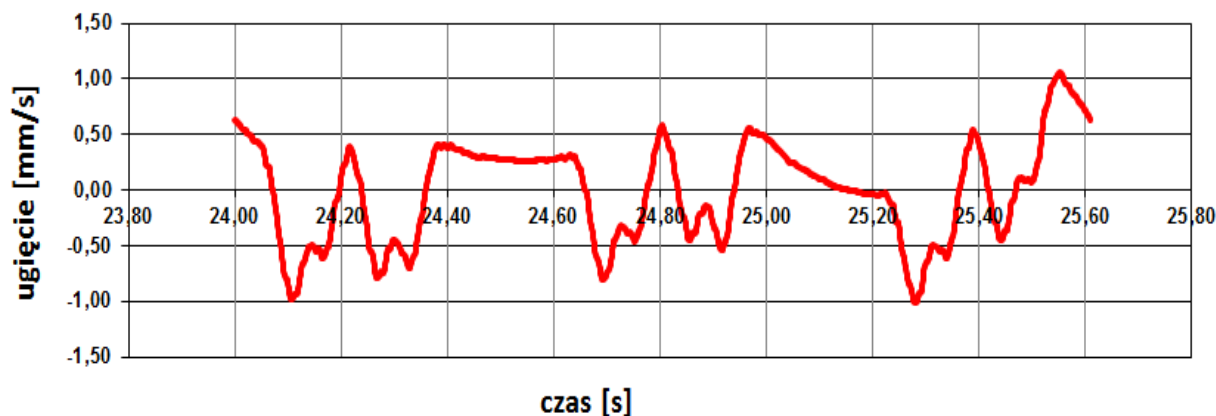
Rys. 17. Przebieg przeszczeń maszyny zarejestrowanych przez czujnik magnetoindukcyjny, potencjometryczny i laserowy w porównaniu z przeszczeniami otrzymanymi po dwukrotnym całkowaniu sygnału przyspieszeń – częstość wymuszenia wynosi 10 Hz



Rys. 18. Przebieg przyspieszeń pionowych szyny zarejestrowany podczas przejazdu pociągu na odcinku testowym na linii nr 8



Rys. 19. Przebieg czasowy prędkości szyny po scałkowaniu sygnału przyspieszeń (rys. 18) na odcinku testowym na linii nr 8



Rys. 20. Przebieg czasowy przeszczeń szyny po dwukrotnym scałkowaniu sygnału przyspieszeń (rys. 18) na odcinku testowym na linii nr 8

PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki badań czujników przemieszczeń szyny oraz wstępne wyniki opracowywanej metody otrzymywania ugięć szyny poprzez dwukrotne całkowanie sygnału przyspieszeń.

W zakresie pierwszego zadania stwierdzono, że czujnikiem dającym największe szanse praktycznego wykorzystania jest bezkontaktowy czujnik magneto-indukcyjny, który okazał się wystarczająco dokładny. Potwierdzono jego przydatność poprzez pomiary porównawcze oraz pomiary w torze. Okazało się, że nadaje się do stosunkowo łatwego montażu, jest także wystarczająco odporny na możliwe prądy błędzące oraz prąd trakcyjny i sygnalizacyjny płynące w szynie. Pewnym problemem jest uzyskanie wystarczająco trwałej (tj. nieruchomej) bazy odniesienia. Została ona zrealizowana poprzez zakotwienie pręta stalowego przechodzącego przez podsypkę i sięgającego głęboko w podtorze (do ok. 80cm).

W zakresie drugiego zadania, tj. całkowania sygnału przyspieszeń w celu uzyskania ugięć szyny, stwierdzono, że ogromny wpływ na możliwość uzyskania wiarygodnej linii ugięcia ma czułość czujnika przyspieszeń, który powinien pracować w zakresie od ok. 2Hz do 1000Hz. Czujniki takie są osiągalne na rynku. Ponadto, obróbka sygnału przyspieszeń musi obejmować filtrowanie wyższych częstotliwości oraz przyjęcie warunków brzegowych dla całkowania. Ten ostatni problem nie został jeszcze wystarczająco opracowany i w związku z tym skuteczność uzyskiwania sygnału ugięć z przyspieszeń jest jeszcze dość mała (na poziomie 20%). W związku z tym metoda ta na razie nie może być stosowana jako rutynowe działanie. Autorzy w obecnej chwili pracują nad udoskonaleniem prezentowanej metody.

BIBLIOGRAFIA

1. D.Ebersbach, F.H. Müller-Borutta, *Dynamische Wegmessungen im Gleis – eine unverzichtbare Methode zur Auswahl neuer Oberbaukomponenten*, ETR no. 45, H. 5, 1996, str. 271-280
2. B.E. Zuada Coelho, *Dynamics of railway transition zones in soft soils*, TU-Delft, the Netherlands, 2010 (wydawnictwo TU-Delft)
3. J. Górszczyk, J. Sołkowski, *Raport z badań czujników*, Politechnika Krakowska, 2014
4. M. Jamka, J. Sołkowski, *Raport z pomiarów terenowych*, Neo-Strain sp. z o.o., 2015

LABORATORY TESTING OF RAIL DEFLECTION SENSORS AND RESEARCH INTO POSSIBILITY OF OBTAINING DISPLACEMENTS FROM VERTICAL RAIL ACCELERATION TIME HISTORIES

Abstract

In the paper the problem of accuracy of rail displacement sensors is discussed. The sensors were tested in laboratory conditions using a hydraulic press as the template for cinematically enforced displacement. The measured displacements (up to 30Hz) were compared with one another and the most promising sensor was chosen. In the next step of the investigations, a field research was carried out in order to verify the practicality of the selected sensor (that was magnetic induction sensor). Moreover, an attempt was made to obtain a reliable rail displacement signal by double integration of the vertical rail acceleration. At the moment, however, the efficiency of the proposed method is at a level of 20%, which is not sufficient for practical routine procedures. The authors continue to work in order to refine the method and implement it into railway practice.

Autorzy:

dr hab. inż. **Juliusz Sołkowski** – Politechnika Krakowska Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej

dr inż. **Jarosław Górszczyk** – Politechnika Krakowska, Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej

mgr inż. **Dariusz Kudła** – Politechnika Krakowska, Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej