Toromierz iTEC – wyniki badań inercyjnego układu pomiarowego

iTEC measurement trolley - the results of tests of the inertial measurement system

Jerzy Cejmer

mgr inż.

Instytut Kolejnictwa w Warszawie, Zakład Dróg Kolejowych i Przewozów

jcejmer@ikolej.pl

Marcin Kowalski

dr inż.

P.U.T. Graw sp. z o.o.

kowalski@graw.com

Streszczenie: W artykule opisano przebieg prac badawczych i rozwojowych podjętych w celu opracowania innowacyjnego inercyjnego toromierza elektronicznego do pomiaru strzałek toru. Opisywany toromierz przeznaczony jest zarówno do codziennej diagnostyki toru, jak i do pomiarów odbiorowych torów z maksymalną prędkością 160km/h i większych. Autorzy przytoczyli szczegółowe wyniki testów polowych i analiz wykonanych w celu potwierdzenia skuteczności metody pomiarowej.

Słowa kluczowe: *Toromierz inercyjny; Inercyjny układ pomiarowy; Pomiary toru*

Abstract: The article describes the course of research and development undertaken to develop the innovative inertial electronic trolley for measurement of track versines. Described trolley is designed both for the routine daily track diagnostics and the track acceptance measurements of tracks with the maximum line speed of 160 km/h and above. The authors set out the detailed results of field tests and analyses performed to confirm the effectiveness of this measurement method.

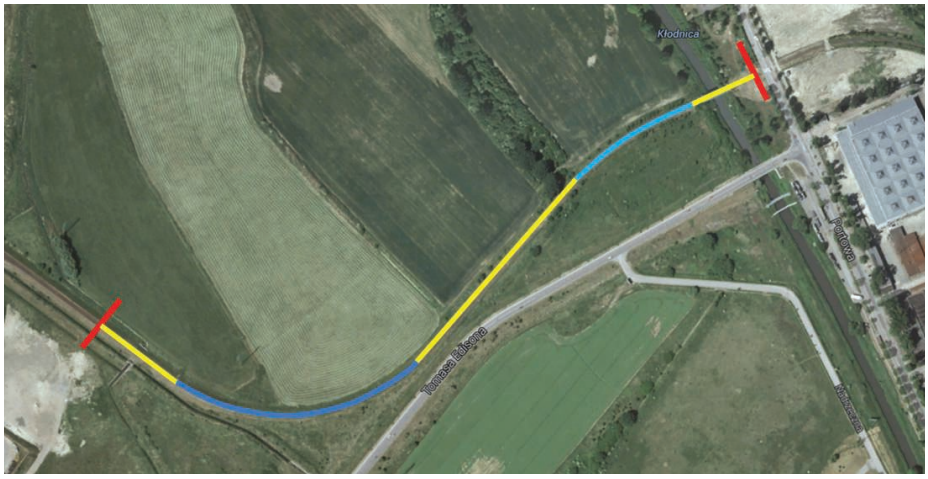
Keywords: *Inertial trolley; Inertial measurement system; Track measurement*

Toromierze samorejestrujące TEC są od wielu lat powszechnie stosowane dla potrzeb rutynowych pomiarów diagnostyki torów. Wyniki pomiarów tymi toromierzami przedstawiane są w sposób podobny do wyników pomiarów z drezyn EM120, a osiągane dokładności pomiarów poszczególnych parametrów oceny stanu torów są zupełnie zadowalające dla potrzeb tego rodzaju diagnostyki. Ponadto foliowe klawiatury pulpitu operatora umożliwiają łatwe notowanie wyników kontroli wizualnej toru i zapisywanie jej rezultatów w funkcji przebytej drogi w pliku z wynikami pomiarów. Takie zalety w połączeniu ze znacznym skróceniem czasu trwania pomiarów i ułatwieniem ich wykonywania, w porównaniu do pomiarów wykonywanych klasycznym toromierzem ręcznym spowodowały, że dzisiaj trudno sobie wyobrazić diagnostykę w zakładach PKP PLK SA bez wykorzystywania toromierzy TEC.

W miarę wzrostu zapotrzebowania na wykonywanie pomiarów odbiorowych prac inwestycyjnych w torach, zwłaszcza dla torów przeznaczonych do prędkości 160 km/godz. i większych, coraz powszechniejsze stało się oczekiwanie zwiększenia dokładności pomiarów wartości strzałek. Toromierze TEC umożliwiają bowiem pomiar różnic wartości strzałek z dokładnością większą niż ±1mm dzięki czemu kształt wykresów strzałek na bazie 10 m jest odtwarzany poprawnie, ale wyliczane z metody trójpunktowej wartości strzałek obarczone są błędem około ±10 mm, co w przypadku pomiarów odbiorowych jest nieakceptowalne.

Z tego powodu rozpoczęto pra-

1. *Prototyp toromierza iTEC*



***2**. Zdjęcie satelitarne toru próbnego (Gliwice) z zaznaczonym odcinkiem testowym*

ce nad innowacyjnym inercyjnym systemem pomiaru strzałek przeznaczonym do instalacji na toromierzu samorejestrującym. Na prowadzenie tych prac badawczych i rozwojowych GRAW sp. z o.o. uzyskała dofinansowanie z programu Innowacyjna Gospodarka (1.4). W wyniku realizacji projektu powstał prototyp toromierza iTEC z innowacyjnym inercyjnym systemem pomiaru strzałek (rysunek **1**).

Przebieg badań

W budowie inercyjnego systemu pomiarowego zastosowano najnowocześniejsze, małogabarytowe i niskoenergetyczne komponenty takie jak półprzewodnikowe akcelerometry i żyroskopy wytypowane na podstawie prób i testów prowadzonych w ramach projektu badawczego. Zasadniczą częścią innowacji jest system rejestracji i przetwarzania sygnałów pomiarowych umożliwiający wyliczenie z sygnałów pomiarowych żądanych wartości parametrów geometrycznych toru. Pierwsze próby prowadzono na torach bocznicowych, a wyniki pomiarów promieni łuków uzyskane z prototypu systemu inercyjnego porównano z wynikami pomiarów wykonanych techniką GPS-RTK .

Na rysunku **2** pokazano zdjęcie satelitarne torów, na których prowadzono pomiary, a wyniki obliczeń i porównań obu metod przedstawiono w tabelach **1** oraz **2**. Odcinek testowy składał się z 3 prostych oraz 2 łuków o promieniach 200 i 300 metrów. W ramach testów przeprowadzono 10 pomiarów toromierzem iTEC w obu kierunkach (w odniesieniu do kilometracji toru) oraz przy różnych prędkościach wykonywania pomiarów. Jak wynika z przedstawionych wyników uzyskano bardzo dużą powtarzalność pomiarów (odchylenie standardowe średniej wartości strzałki na obu łukach poniżej 0,2 mm), jak również zgodność wyników z niezależnymi pomiarami wykonywanymi z wykorzystaniem dokładnego odbiornika GPS/RTK.

Po zakończeniu prób własnych przeprowadzenie szczegółowych badań innowacyjnego inercyjnego systemu pomiaru strzałek zlecono Instytutowi Kolejnictwa. Badania były prowadzone zarówno na torze doświadczalnym w Żmigrodzie jak i w warunkach torów szlakowych. Na rysunku **3** pokazano charakterystyczny dla toru doświadczalnego w Żmigrodzie przebieg wartości strzałek zmierzonych kilkukrotnie badanym systemem inercyjnym. Badano zarówno powtarzalność wskazań systemu inercyjnego jak i zgodność wyników jego pomiarów z wynikami pomiarów wykonanych strzałkomierzem.

Na rysunku **4** pokazano wartości różnic wyników dwóch pomiarów wykonanych systemem inercyjnym na długości toru około 300 m z wartościami strzałek zmierzonymi strzałkomierzem. Jak widać na całej długości łuku R600 uzyskano bar-

***Tab. 1.** Wyniki 10 pomiarów toromierza iTEC na 2 łukach testowych (wyliczona średnia wartość strzałki, wyliczona długość promienia łuku)*

Pomiar toromierzem iTEC					
Łuk 1			Łuk 2		
przejazd	Średnia strzałka [mm]	promień m]	przejazd	Średnia strzałka [mm]	promień [m]
1	41,4	302,1	1	-62,4	200,4
2	41,3	302,9	2	-62,7	199,3
3	41,5	301,4	3	-62,5	199,9
4	41,4	302,3	4	-63	198,4
5	41,5	301,4	5	-62,6	199,7
6	41,4	301,6	6	-62,9	198,7
7	41,5	301,5	7	-62,5	199,9
8	41,4	301,8	8	-62,8	199,1
9	41,4	301,6	9	-62,9	198,8
10	41,4	302,2	10	-62,9	198,7

***Tab. 2.** Wyniki 3 pomiarów z użyciem odbiornika GPS/RTK na 2 łukach testowych (wyliczona średnia wartość strzałki, wyliczona długość promienia łuku)*

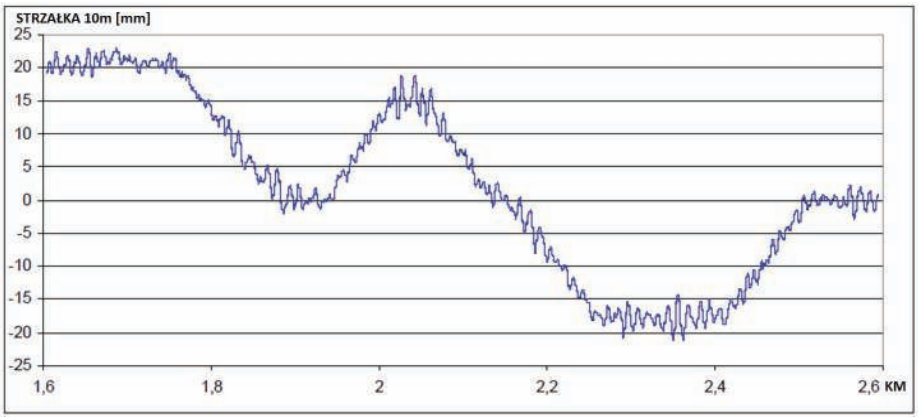
Pomiar GPS/RTK					
Łuk 1			Łuk 2		
przejazd	Średnia strzałka [mm]	promień m]	przejazd	Średnia strzałka [mm]	promień [m]
1	42,9	291,6	1	-62,6	199,7
2	41,2	303,6	2	-62,1	201,2
3	41,6	300,6	3	-62,5	200,1

dzo dobrą zgodność wyników obu metod. Maksymalne wartości różnic strzałek na bazie 10 m są mniejsze niż 0,3, a zazwyczaj te różnice nie przekraczają wartości 0,15 mm.

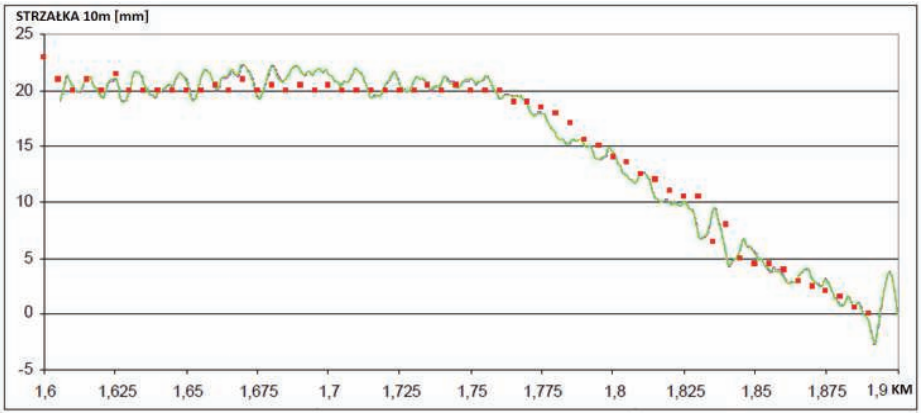
Zbiorcze wyniki badań przeprowadzonych w Żmigrodzie zestawiono w tabeli **3**. Podano w niej średnie wartości strzałek i ich odchylenia standardowe oraz wyliczoną na podstawie średniej wartości strzałek rzeczywista wartość promienia mierzonego łuku. Z zestawienia wynika, że wartości strzałek otrzymanych z pomiaru metodą inercyjną są bardzo zbliżone do wartości uzyskanych z pomiarów strzałkomierzem drutowym. Tak więc nowa metoda pomiaru strzałek, zastosowana w toromierzu iTEC, pozwala na określenie rzeczywistego promienia łuku z dużą dokładnością. O dużej dokładności pomiaru strzałek świadczy szczególnie porównanie obu metod na łukach o promieniu 150 m, gdzie – ze względu na duże wartości strzałek – pomiar strzałkomierzem drutowym jest najbardziej dokładny.

Badania własności metrologicznych prototypu systemu inercyjnego pracownicy Instytutu Kolejnictwa przeprowadzili na szlaku Koniecpol-Julianka. Badania przeprowadzono na torach prostych oraz na łukach R1050-R3000. Wyniki powtarzalności pomiarów wartości strzałek na bazie 10 m zestawiono w tabeli **4**. Jak widać średnie wartości różnic są bliskie zeru, a odchylenia standardowe nie przekraczają wartości 0,4 mm.

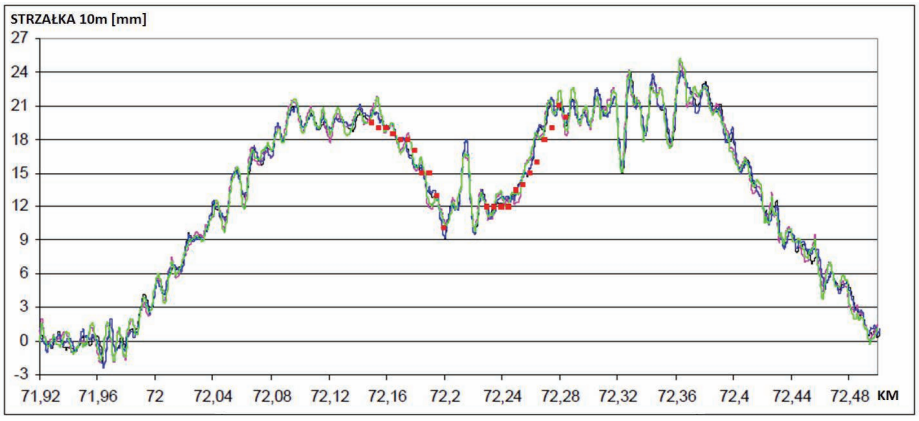
Dla potrzeb oceny możliwości odtwarzania przez badany system pomiarowy bardziej złożonych kształtów toru przeprowadzono pomiar nietypowego odcinka toru. Zgodnie z projektem, na mierzonym odcinku tor powinien przebiegać w łuku o promieniu 674 m, ale w jego części środkowej na przejeździe kolejowym w poziomie szyn wystąpiło spłaszczenie łuku kołowego, które spowodowało, że powstał łuk koszowy. Pomiary strzałek metodą inercyjną oraz pomiary strzałek wykonane strzałkomierzem są zgodne, a kształt



***3**. Wykres rozkładu strzałek na torze testowym w Żmigrodzie na odcinku 1.6-2.6km (łuki 600m, 700m, 800m)*



***4**. Porównanie wyników pomiarów wykonanych strzałkomierzem (czerwony) z pomiarami wykonanymi toromierzem iTEC (zielony) – łuk o promieniu 600m*



***5**. Porównanie wyników pomiarów wykonanych strzałkomierzem (czerwony) z pomiarami wykonanymi toromierzem iTEC (zielony) na przejeździe kolejowym w okolicach 72,2 [km]g*

***6**. Wersja produkcyjna toromierza iTEC*

Tab. 3. *Wyniki porównania pomiarów wykonanych strzałkomierzem z pomiarami wykonanymi toromierzem iTEC*

Promień nominalny [m]	Nr pomiaru	strzałka [mm]		Promień rzeczywisty [m]
		średnia	odch. stand	
150	21	86,01	5,41	145
	22	86,92	3,06	144
	23	85,86	5,43	146
	24	86,79	3,13	144
	strzałkomierz	85,7	5,56	146
150	21	82,19	2,57	152
	22	82,83	2,28	151
	23	82,21	2,61	152
	24	82,83	2,26	151
	strzałkomierz	81,63	4,12	153
600	1	20,84	0,94	600
	2	20,75	0,77	602
	3	20,83	0,94	600
	4	20,77	0,78	602
	strzałkomierz	20,3	0,61	615
700	1	17,76	1,37	704
	2	17,69	1,54	707
	3	17,76	1,37	704
	4	17,69	1,54	707
	strzałkomierz	18,1	0,38	691
800	1	15,20	1,82	822
	2	15,23	1,14	821
	3	15,20	1,83	822
	4	15,25	1,14	820
	strzałkomierz	15,19	0,35	823
900	17	13,89	0,77	900
	18	14,02	1,55	892
	19	13,93	0,76	897
	20	13,93	1,54	897
	strzałkomierz	13,9	0,70	899

Tab. 4. *Wyniki porównania pomiarów wykonanych strzałkomierzem z pomiarami wykonanymi toromierzem iTEC dla łuków R1050 – R3000*

Nr pomiaru	Średnia wartość błędu [mm]	Odchylenie standardowe
1 – 3 (łuk R1050)	0,04	0,30
2 – 4 (łuk R1050)	-0,03	0,28
5 – 1 (łuk R1050)	0,00	0,27
6 – 2 (łuk R1050)	0,14	0,25
7 – 9 (łuki R1920, R2500, R3000)	-0,05	0,29
8 – 10 (łuki R1920, R2500, R3000)	-0,04	0,37

tego zniekształcenia toru pokazano na rysunku **5**.

Wyniki badań systemu inercyjnego pokazują więc, że wartości strzałek mierzonych systemem inercyjnym wykazują dużą zgodność z wartościami strzałek mierzonych strzałkomierzem na bazie 10 m i co więcej system inercyjny pozwala na odtwarzanie nawet nietypowych, skomplikowanych kształtów torów. Warto przy tym podkreślić, że badania przeprowadzone przez Instytut Kolejnictwa dotyczyły także własności eksploatacyjnych prototypowego systemu inercyjnego, w tym także technologii wykonywania pomiarów w warunkach toru otwartego. Wykonywanie pomiarów w takich warunkach wiąże się z koniecznością przerywania pomiarów na czas przejazdu pociągu i ich wznowienia po przejechaniu pociągu. Badania te wykazały, że przy zachowaniu opracowanej w ramach projektu technologii pomiaru możliwe jest przerywanie i wznawianie pomiarów bez pogorszenia ich dokładności.

Po zakończeniu prac rozwojowych i badań prototypu objętych projektem GRAW sp. z o.o. opracowała produkcyjną wersję toromierza iTEC (rysunek **6**).

Podsumowanie

Pomiar strzałek i dołków odbywa się bezdotykowo systemem inercyjnym. Dla sprostania zwiększonemu zapotrzebowaniu na energię toromierz zaopatrzony jest w zewnętrzne akumulatory, które w razie potrzeby można łatwo wymienić bez przerywania sesji pomiarowej. Ponadto toromierz zaopatrzony jest w system GPS dzięki czemu wyniki pomiarów są łatwe do zlokalizowania w czasie i przestrzeni. Uwzględniając uwagi użytkowników, którzy widzą potrzebę wykonywania pomiarów inercyjnych nie tylko w czasie prac odbiorowych, ale także w wielu przypadkach codziennej diagnostyki toromierz może się komunikować przez złącze Bluetooth ze smartfonami i tabletami. Odpowiednie oprogramowanie umożliwia duplikowanie na ekranach takich przenośnych urządzeń pulpitu operatora toromierza i wprowadzanie informacji opisowych o stanie toru przez osobę nie zajmującą się bezpośrednio obsługą toromierza. Dzięki znakomitym własnościom metrologicznym i eksploatacyjnym toromierz iTEC jest stosowany coraz szerzej w kraju i za granicą.◀

Toromierz profilowy TEP – wyniki badań laserowego układu pomiarowego

TEP Rail Head Profile Trolley - test results of the laser measurement system

Marcin Kowalski

dr inż.

P.U.T. Graw sp. z o.o.

kowalski@graw.com

Streszczenie: W artykule opisano przebieg prac badawczych i rozwojowych podjętych w celu opracowania kompaktowego, optycznego układu pomiarowego do pomiarów elementów infrastruktury torowej. Opisano główne cechy optycznych układów pomiarowych oraz przedstawiono wyniki realizowanego projektu badawczego. Autor przedstawił 2 przykłady implementacji opracowanej technologii w przenośnych urządzeniach diagnostycznych: wózkowym toromierzu elektronicznym oraz urządzeniu do tworzenia modeli 3D krzyżownic rozjazdowych.

Słowa kluczowe: *Toromierz elektroniczny; Laserowy pomiar główki szyny; Optyka pomiarowa*

Abstract: The article describes the course of research and development undertaken to develop a compact, optical measurement system for measuring the elements of track infrastructure. The article describes the main features of the optical measurement systems and the results of the research project. The author presents two examples of the implementation of this technology in the portable diagnostic devices: electronic trolley and in the unit for the creation of 3D models of turnout crossings.

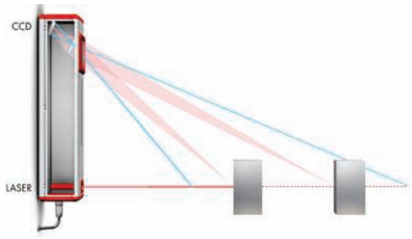
Keywords: *Electronic trolley; Laser measurement of rail head; Measurement optics*

W badaniach diagnostycznych stanu toru oprócz oceny podstawowych parametrów geometrii toru takich jak przechyłka, szerokość i nierówności toków szynowych niezbędne jest także kontrolowanie wielkości zużycia główek szyn. Kontrolę wielkości zużycia główki szyny można przeprowadzać ręcznie przy użyciu szablonów lub profilomierzy dotykowych lub laserowych (rysunek **1**).

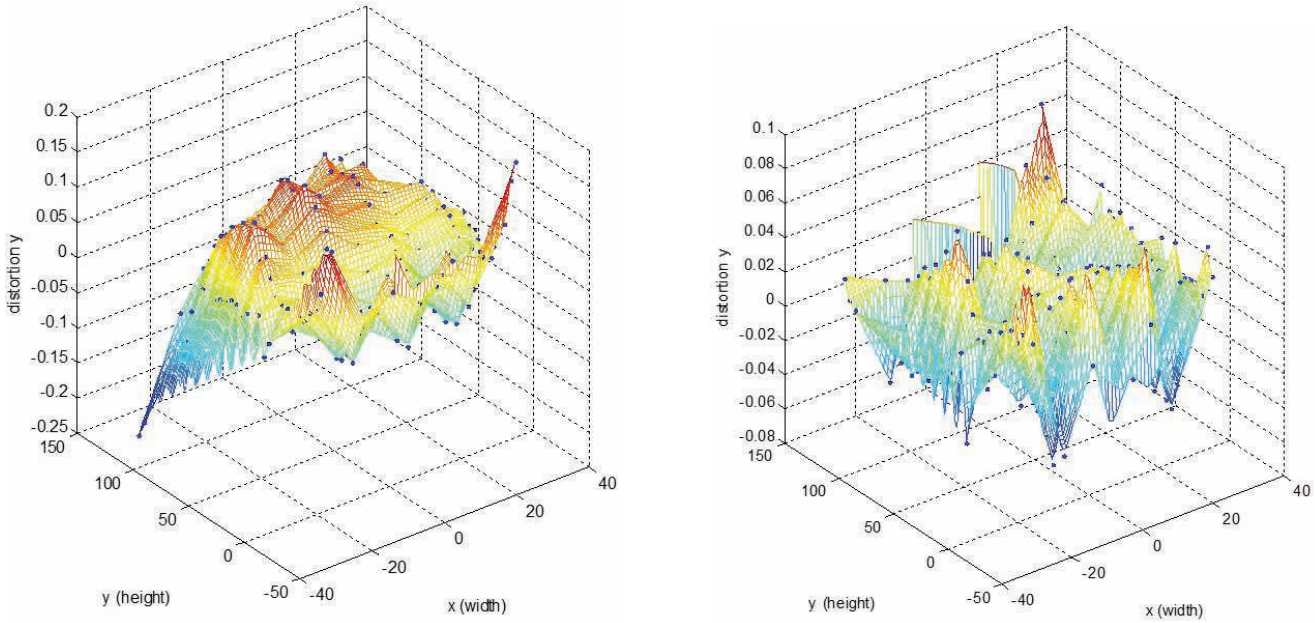
Ręczne metody pomiaru pozwalają skontrolować wielkość zużycia w dowolnym, wybranym przez diagnostę przekroju szyny. Jest zupełnie naturalne, że dąży się do zastąpienia takich punktowych informacji, pomiarami ciągłymi z możliwością prezentowania wyników analiz w postaci wykresów, tabel i ocen dla wybranych odcinków toru podobnie jak dla podstawowych parametrów stanu toru. Możliwości ciągłego pomiaru zużycia główki szyny stwarza zastosowanie laserowych systemów pomiarowych instalowanych

1. *Profilomierz XY produkcji GRAW*

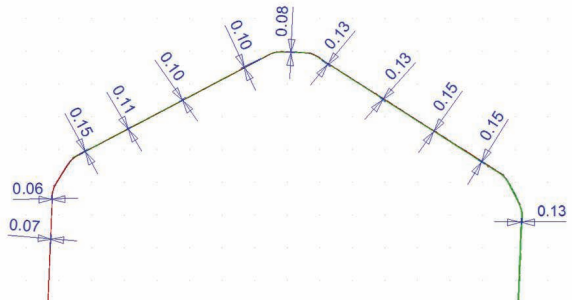
na pojazdach i takie systemy stanowią zazwyczaj opcjonalne wyposażenie nowoczesnych pojazdów pomiarowych. W diagnostyce podstawowych parametrów geometrycznych toru są także powszechnie stosowane toromierze samorejestrujące TEC produkcji GRAW umożliwiające wykonywanie ciągłych pomiarów toru co wypełnia lukę pomiędzy ręcznymi, punktowymi pomiarami, a pomiarami wykonywanymi drezynami pomiarowymi. Postęp techniczny w zakresie techniki przetwarzania obrazu oraz coraz szersza oferta małogabarytowych komponentów mogących służyć do budowy laserowych systemów 2D (rysunek **2**).



2. *Wizualizacja laserowej głowicy profilowej*

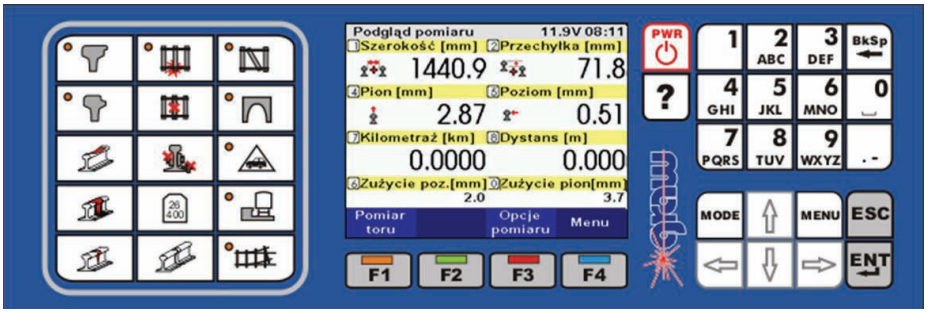


3. Przykład rozkładu błędu odtworzenia profilu w obszarze roboczym kamery przed (prawy) i po (lewy) linearyzacji głowicy pomiarowej



4. Wyniki porównania zmierzonego profilu z certyfikowanym wzorcem pomiarowym. Powtarzalność zmierzonego profilu < 0.10mm, odtwarzalności dla 10 pomiarów < 0.15mm

5. Toromierz profilowy TEP2.2 (wersja produkcyjna)



6. Pulpit sterujący toromierza TEP2.2

Wyniki badań

Taki stan techniki pozwolił na rozpoczęcie w GRAW sp. z o.o. prac badawczo-rozwojowych nad budową głowicy 2D specjalizowanej do potrzeb pomiaru profilu główki szyny. Środki finansowe na realizacje tych prac uzyskano z funduszu Innowacyjna Gospodarka. W początkowych etapach projektu dobierano nisko–kosztowe komponenty o małym poborze mocy, przeprowadzano badania ich własności metrologicznych i eksploatacyjnych. Bardzo ważną część prac stanowiło wykonanie stanowisk kalibracyjnych oraz opracowanie procedur kalibracyjnych dla głowic 2D. Dzięki temu znacząco polepszono katalogowe osiągi nisko-kosztowych komponentów użytych do budowy głowic, a przykładowe rezultaty ich linearyzacji przedstawiono na rysunku **3**.

Poprawność działania kompletnych głowic pomiarowych jest sprawdzana na wzorcach o znanym kształcie i wymiarach przez porównanie profilu zmierzonego głowicą 2D z profilem wzorca (rysunek **4**).

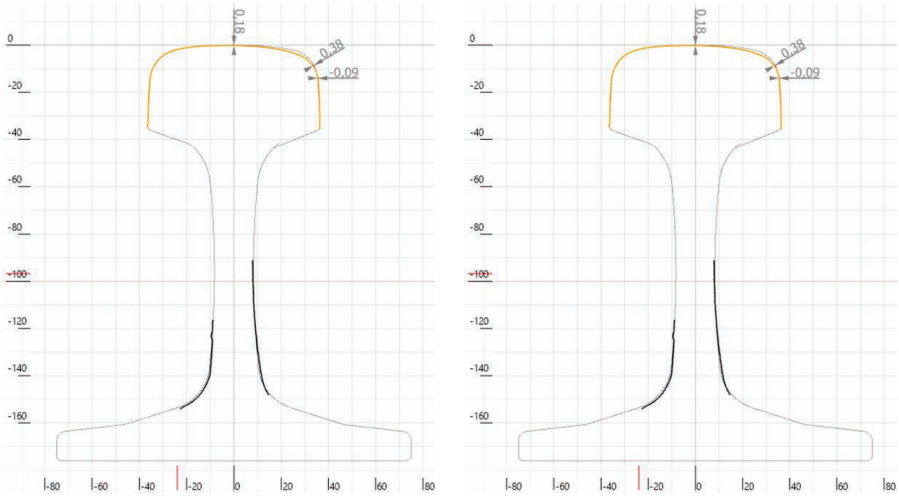
Głowice 2D opracowane w ramach projektu są oferowane jako przystawki profilowe do toromierzy TEC zarówno w wersji jednogłowicowej –TEP2.1 jak i w wersji dwugłowicowej TEP2.2 ,która umożliwia jednoczesny pomiar profilu główek szyn na obu tokach szynowych (rysunek **5**).

Funkcjonalność pulpitu toromierzy TEP jest analogiczna do typowej funkcjonalności toromierzy TEC (rysunek **6**), a więc w czasie pomiarów profilu rejestrowane są parametry geometryczne toru, diagnosta ma możliwość rejestrowania w pliku pomiarowym dostrzeżonych usterek toru, a jednocześnie rejestrowane są w tym samym pliku pomiarowym zmierzone profile poprzeczne główki szyny (rysunek **7**). Oprogramowanie dostarczane wraz z toromierzem TEP umożliwia prezentację zmierzonych wartości zużyć główki szyny w postaci wykresów w sposób analogiczny do wykresów parametrów geometrycznych torów.

Toromierz TEP może być także stosowany do pomiarów zużycia iglicy rozjazdów. W tym celu opracowano specjalne biblioteki oprogramowania wyliczające szereg parametrów, między innymi obniżenie iglicy względem opornicy w całym obszarze przylegania.

W ramach testów przeprowadzono również badania dotyczące zastosowania pomiarów z wykorzystaniem głowic 2D do oceny zużycia krzyżownic rozjazdowych. Typowe podejście zakłada ocenę zużycia dzioba krzyżownicy względem szyn skrzydłowych. Porównań i oceny kształtu dzioba dokonuje się w takich przypadkach z wykorzystaniem profilomierzy ręcznych (rysunek **1**) oraz liniałów mechanicznych. Taka ocena, wykonywana w warunkach polowych, ma sporo wad, a przede wszystkim nie gwarantuje wysokich dokładności zarówno w czasie oceny stanu krzyżownicy jak i przy odbiorach prac remontowych.

W celu wyeliminowania powyższych problemów zaproponowano umieszczenie głowy 2D na niezależnej ramie (rysunek **8**). W takim rozwiązaniu głowica pomiarowa porusza się nad mierzonym obiektem wzdłuż prostoliniowej prowadnicy, stanowiącej linię referencyjną dla oceny wzdłużnej kształtu dzioba krzyżownicy.

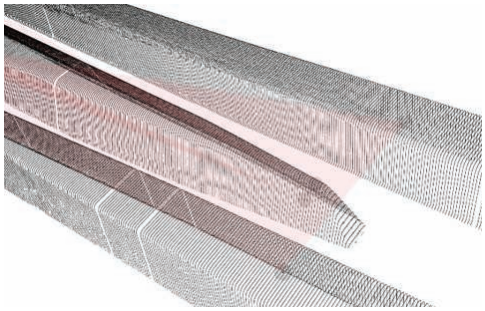


***7**. Przykłady pomiarów zużycia profilu szyny: po lewej rozkład zużycia na powierzchni tocznej przed szlifowaniem, po prawej pomiar podstawowych wartości zużycia główki szyny*

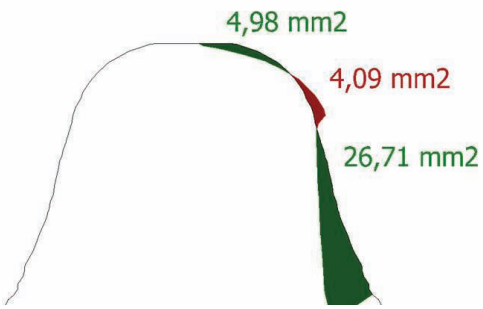
***8**. Skorpion - urządzenie do pomiarów 3D*

W pełni skalibrowane urządzenie pozwala na stworzenie pełnego modelu 3D krzyżownicy (rysunek **9**) z dokładnością lepszą niż ±0.1mm, z uwzględnieniem dzioba oraz szyn skrzydłowych na o długości do 1.2m i krokiem pomiarowym o długości 1mm.

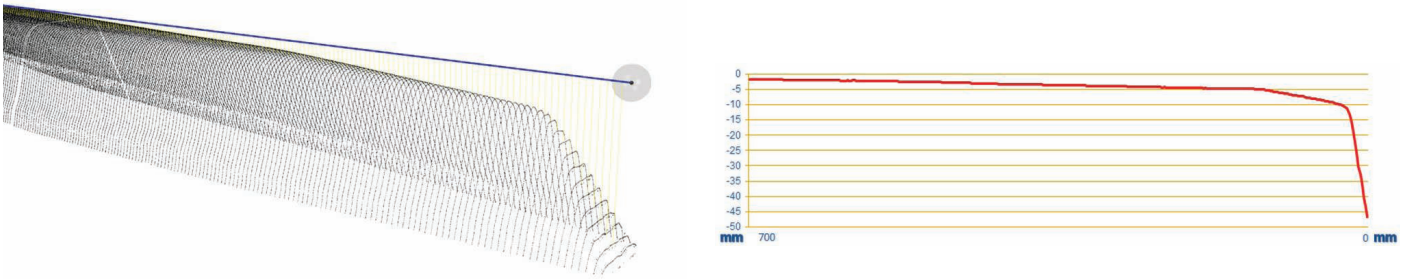
W celu usprawnienia procesu oceny krzyżownic, w ramach prac rozwojowych, podjęto współpracę z odziałem DB System Technik, prowadzącym wieloletnie badania dotyczące wydłużenia okresu użytkowania krzyżownic rozjazdowych. W okresie 2 lat powstało zaawansowane oprogramowanie, automatyzujące między innymi proces



***9**. Przykładowy model 3D krzyżownicy rozjazdu z zaznaczoną powierzchnią referencyjną osadzoną na szynach skrzydłowych (czerwony obszar)*



***10**. Przykład porównania profilu poprzecznego dzioba krzyżownicy z analizą zużycia*



11. *Przykład oceny profilu wzdłużnego dzioba krzyżownicy (z lewej model 3D krzyżownicy z zaznaczonym kierunkiem oceny, z prawej profil dzioba krzyżownicy wzdłuż zdefiniowanego kierunku oceny)*

oceny zużycia krzyżownic w czasie. Wbudowane funkcje pozwalają dodatkowo na: nakładanie na siebie pomiarów 3D krzyżownic wykonanych w różnych okresach, generowanie dowolnych przekroi poprzecznych krzyżownic z analizą zużycia (rysunek **10**), precyzyjną ocenę profilu wzdłużnego dzioba krzyżownicy (rysunek **11**).

Duże możliwości oferowane przez system sprawiło że obecnie urządzenie Skorpion (rysunek **8**) jest stosowane w do badań trwałości krzyżownic rozjazdów na PKP, DB a ostatnio także na kolejach w Azji.

Podsumowanie

Badania prowadzone w ramach realizowanego projektu wykazały duże możliwości systemów opartych o głowice 2D, jak również ograniczenia takiej metody. Do głównych wad można zaliczyć słabą odporności działania systemu przy dużym nasłonecznieniu. W celu minimalizacji negatywnego wpływu promieni słonecznych można stosować różne metody, w tym różnego rodzaju kurtyny, filtry optyczne i algorytmiczne, jednak idealne rozwiązanie nie istnieje. Dlatego bardzo ważnym etapem projektowym jest ocena środowiska pomiarowego i każdorazowe dostosowanie do niego dedykowanego zestawu narzędzi zwiększających stabilność i jakość otrzymywanych wyników.

Przeprowadzone testy pokazały również że możliwe jest stworzenie niskobudżetowych głowic pomiarowych o bardzo wysokiej precyzji pomiaru, jednak wymaga to zastosowania wieloetapowego procesu kalibracji oraz odpowiedniego sparametryzowania oprogramowania odpowiedzialnego za opracowanie profili pomiarowych. ◄

REKLAMA