

RTK GPS w zastosowaniach inżynierskich

Odbiorniki GPS na torach

JAN GOCAŁ, MICHAŁ STRACH

Zwiększenie prędkości ruchu pociągów – przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa i komfortu jazdy – w dużym stopniu zależy od obsługi geodezyjnej związanej z kształtowaniem poprawnego układu geometrycznego torów. Czy technika RTK GPS jest już wystarczająco dokładna, by nadawała się do regulacji ich osi?

W naszym kraju pociągi jeżdżą po 23 449 kilometrach torów będących w zarządzie PKP Polskich Linii Kolejowych S.A. Na podstawie międzynarodowych umów Polska zobowiązała się, że do 2015

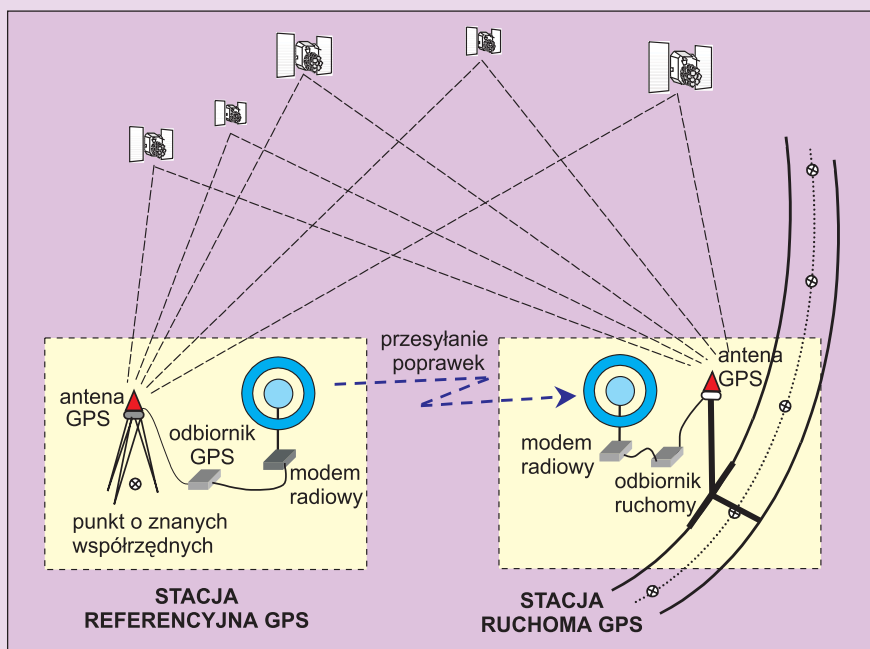
roku osiągnie europejski standard świadczenia usług na około 5000 kilometrów linii kolejowych. Standard ten ma zapewnić kursowanie pociągów pasażerskich z prędkością nie mniejszą niż 160 km/h oraz to-

warowych – odpowiednio 120 km/h, przy jednoczesnym zachowaniu komfortu i bezpieczeństwa jazdy. Obecnie warunki te spełnia jedynie Centralna Magistrala Kolejowa na trasie Warszawa – Kraków i Warszawa – Katowice oraz część modernizowanych magistrali E-20 na trasie Warszawa – Poznań i E-30 łączącej Wrocław, Katowice i Kraków.

AGH bada zastosowania GPS

Podczas budowy każdej linii kolejowej prowadzone są geodezyjne pomiary realizacyjne, a w czasie jej eksploatacji – pomiary inwentaryzacyjne. Celem pomiarów realizacyjnych jest zapewnienie prawidłowego ukształtowania geometrycznego budowanego toru. Natomiast pomiary inwentaryzacyjne dostarczają informacji o aktualnym stanie geometrycznym torów eksploatowanych i stanowią podstawę do przygotowania projektu regulacji.

W Zakładzie Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH od 1995 roku prowadzone są badania i testy pomiarowe dotyczące wykorzystania metody pomiarów satelitarnych RTK GPS (*Real Time Kinematic GPS*) do rozwiązywania zagadnień inżynierskich. Bazując na wiedzy zdobytych doświadczeniach, uznano, że takie pomiary mogą być użyteczne w geodezyjnej inwentaryzacji osi torów kolejowych. W Polsce metoda RTK GPS nie była dotąd stosowana w tego typu pracach. Celem badań było więc ustalenie, czy będzie ona wystarczająco dokładna, funkcjonalna i uzasadniona ekonomicznie do prowadzenia prac geodezyjnych związanych z inwentaryzacją i regulacją osi torów kolejowych (z uwzględnieniem linii szybkiego ruchu).



Rys. 1. Schemat pomiaru inwentaryzacyjnego toru kolejowego techniką RTK GPS



Rys. 2. Wózek pomiarowy zaopatrzony w krótką kolumnę do umieszczenia głowicy pomiarowej. W tle stacja referencyjna GPS oraz precyzyjny tachimetr elektroniczny

Doświadczenia przeprowadzono w zróżnicowanych warunkach związanych zarówno z geometrią toru, jak i topografią terenu, przez który przebiegał szlak kolejowy.

● Procedura pomiarów

Do wyznaczania współrzędnych punktów osi toru w układzie bezwzględny można stosować dwie metody: biegunową 3D oraz RTK GPS. Pierwsza z nich pozwala na wyznaczenie przestrzennego położenia punktów osi toru bez potrzeby rozdzielania tych pomiarów na dwa etapy. Dla uzyskania najwyższych dokładności wyznaczenia współrzędnych punktów konieczne jest stosowanie precyzyjnych tachimetrów elektronicznych. Pomiar inwentaryzacyjny najlepiej prowadzić korzystając ze swobodnego stanowiska z dowiązaniem do punktów utrwalonych na słupach trakcyjnych lubpo prostu ustawiając instrument nad punktami utrwalonymi znakami ziemnymi.

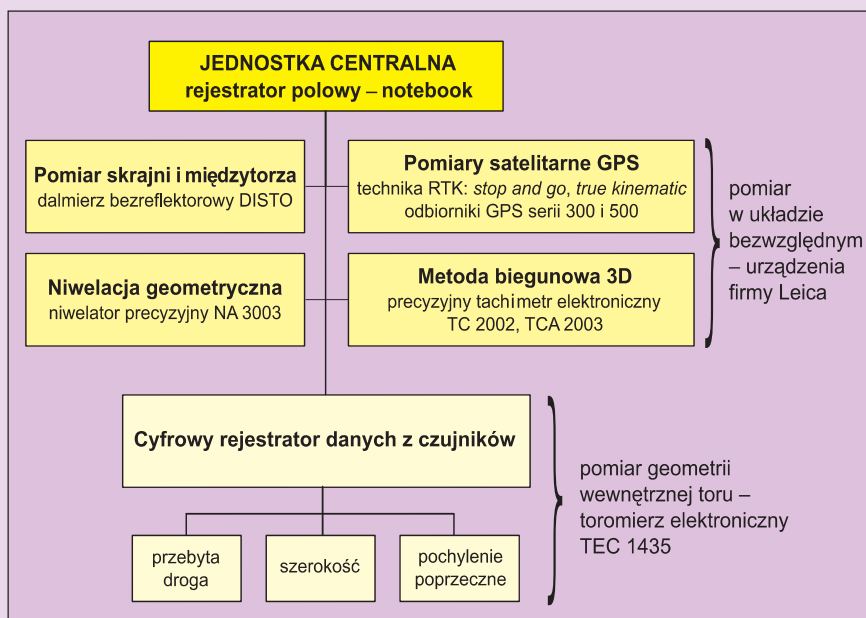
Druga metoda, oznaczona w skrócie symbolem RTK GPS, wymaga zastosowania dwóch odbiorników satelitarnych wyposażonych w modemy radiowe (rys. 1). Antenę jednego z nich ustawia się nad punktem kolejowej osnowy geodezyjnej, którego współrzędne wyznacza się wcześniej metodą statyczną GPS. Odległości pomiędzy kolejnymi punktami odniesienia zależą głównie od zasięgu łączności radiowej pomiędzy odbiornikiem stacjonarnym i ruchomym. Jednak ze względu na zakłócenia sygnałów radiowych przez przeszkody terenowe odległości te nie powinny przekraczać 2 km. Oznacza to, że antenę odbiornika stacjonarnego najkorzystniej jest ustawiać na założonych wzdłuż linii kolejowej punktach pomierzonych techniką

GPS, będących punktami nawiązania ciągów szczegółowej osnowy kolejowej. Antenę odbiornika ruchomego, podobnie jak poprzednio pryzmat dalmierczy, ustawia się nad kolejnymi punktami rzeczywistej osi toru przy wykorzystaniu specjalnego wózka pomiarowego.

Pierwszy prototypowy wózek zbudowano na bazie korektora krzywizn firmy Matisa. W trakcie pomiarów doświadczalnych stwierdzono poprawne działanie mechanizmów tego wózka i łatwość jego usuwania z torów na czas przejazdu pociągu. Mankamentem przedstawionej konstrukcji było zbyt niskie usytuowanie anteny satelitarnej, które wprowadzało zakłócenia w odbiorze

sygnałów satelitarnych w rejonach występowania nawet niezbyt wysokich przeszkód terenowych.

Kolejna, poprawiona wersja wózka pomiarowego powstała na bazie toromierza elektronicznego TEC-1435 (rys. 2). Urządzenie wyposażone jest standardowo w rejestrator cyfrowy i czujniki umożliwiające pomiar przebytej drogi, a także szerokości i pochylenia poprzecznego toru. Na krótkim ramieniu toromierza, opierającym się dwiema rolkami o szynę, umocowano kolumnę. W jej górnej części wstawiono głowicę pomiarową z anteną satelitarną oraz pryzmatem dalmierczym. Ponadto na elemencie nośnym umieszczono przesuwaną obejmę wyposażoną w spodarkę, na której ustawia się wymiennie dalmierz DISTO lub elektroniczny niwelator kodowy Leica NA 3003. Konstrukcja głowicy pomiarowej umożliwia jednocześnie prowadzenie obserwacji metodą RTK i metodą biegunową. Tak przygotowany wózek wchodzi w skład systemu umożliwiającego prowadzenie pomiarów inwentaryzacyjnych w każdych warunkach terenowych (rys. 3). W rejonach występowania zwartych wysokich przeszkód pomiaru prowadzi się metodą biegunową 3D z użyciem precyzyjnego tachimetru elektronicznego, zaś w terenie odkrytym – metodą RTK. Z kolei dalmierz DISTO przeznaczony jest do pomiaru szerokości międzytorza w odstępach hektometrowych oraz odległości pomiędzy osią toru a obiektami umieszczonymi wzdłuż niego, takimi jak: słupy trakcyjne, wskaźniki regulacji, semafony, wiadukty, mosty czy perony. Pomierzone odległości wykorzystuje się do kontrolo-



Rys. 3. Schemat systemu do wykonywania pomiarów inwentaryzacyjnych osi toru kolejowego w układzie bezwzględny

wania skrajni budowlu w trakcie przygotowywania projektu regulacji toru. Natomiast zarejestrowane informacje o aktualnej szerokości toru i jego pochyleniu poprzecznym pozwalają na bieżące wprowadzanie odpowiednich korekt do wyznaczonych położenia punktów osi toru. Korekty te wynikają z wysokiego usytuowania punktów obserwowanych, które sygnalizowane są anteną satelitarną lub pryzmatem dalmierzowym.

● Pomiaru sytuacyjnego...

W przeprowadzonych pracach badawczych skoncentrowano się na przedstawieniu charakterystyki dokładnościowej metody RTK GPS w geodezyjnej inwentaryzacji osi torów kolejowych. W tym celu wykonano wzorcowe pomiary z wykorzystaniem precyzyjnych tachimetrów elektronicznych Leica TC 2002 i TCA 2003. Współrzędne punktów osi toru można wyznaczyć przy stosowaniu techniki klasycznej z dokładnością ± 1 mm, stąd też w badaniach doświadczalnych stanowiły one bazę odniesienia dla pomiarów satelitarnych prowadzonych metodą RTK. Duża liczba wykonanych obserwacji umożliwiła przeprowadzenie statystycznej analizy otrzymanych wyników. Badania przeprowadzono na trzech odcinkach linii kolejowych.

● ...metodą stop and go...

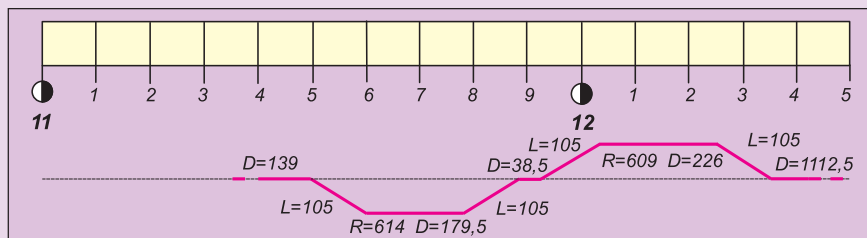
Pierwszym z nich był czynny fragment jednorotorowej zelektryfikowanej linii kolejowej relacji Kraków – Podłężę. Jest to prostoliniowy odcinek toru o długości 1985 m. Pomiarami inwentaryzacyjnymi objęto punkty reprezentujące rzeczywistą oś toru usytuowane w odległościach co 10 m. Do testów użyto prototypowego wózka pomiarowego zbudowanego na bazie korektora krzywizn Matisa, dwóch odbiorników satelitarnych serii 300 firmy Leica i tachimetru TC 2002. W pierwszej kolejności wykonano pomiary metodą RTK w trybie *stop and go*. Następnie przeprowadzono niezależną inwentaryzację osi toru metodą biegunową przy użyciu tachimetru ustawianego na kolejnych punktach poligonowych. W efekcie uzyskano dwa zbiory współrzędnych punktów reprezentujących rzeczywistą oś toru. Ze względu na niejednoznaczność identyfikacji punktów reprezentujących oś toru zrezygnowano z bezpośredniego porównywania współrzędnych tych samych punktów należących do dwóch różnych zbiorów. Uznano natomiast, że możliwe jest porównywanie odległości (d_{GPS} i d_{TC}) jednoimiennych punktów obserwowanych wyznaczonych względem prostych regresji (osi teoretycznych toru) i obliczono ich różnice (Dd_{GPS-TC}). Dla otrzymanych różnic obliczono z kolei odchylenie

standardowe, uzyskując wartość 6,5 mm. Należy podkreślić, że wielkość ta zawiera w sobie łączne wpływy błędów wyznaczenia współrzędnych punktów osi metodą biegunową i metodą RTK, a także błędy niejednoznacznej identyfikacji punktów osi obserwowanych w dwóch niezależnych procedurach pomiarowych i wpływy błędów punktów odniesienia. Wnioski wyciągnięte z przeprowadzonych badań pozwalają przypuszczać, że wprowadzenie do pomiarów odbiorników satelitarnych z antenami typu *choke ring* oraz wykorzystanie wózka pomiarowego zbudowanego na bazie toromierza TEC-1435 doprowadzi do zwiększenia dokładności otrzymanych wyników pomiarów.

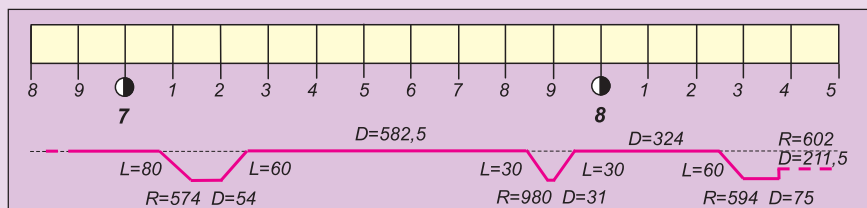
● ...i jeszcze dokładniejsze

Do dalszych badań wybrano czynny odcinek linii kolejowej Kraków Płaszów – Oświęcim („Sidzina”) o długości 1020 m (rys. 4) oraz nieczynną kolejową linię obwodową

cie pomiarów pięciokrotnie przetaczano wózek ze średnimi prędkościami przejazdów: 5,7; 5,9; 5,0; 8,7 i 5,4 km/h. W wyniku wykonanych obserwacji terenowych i przeprowadzonych obliczeń uzyskano osiem zbiorów współrzędnych. Zbiór pierwszy otrzymano z pomiarów metodą biegunową 3D, kolejne dwa zbiory odpowiadają pomiarom metodą *stop and go*. Pozostałych pięć zbiorów zawiera współrzędne punktów rejestrowanych metodą kinematyczną w odstępach co 0,1 sekundy. Chcąc określić jakość współrzędnych punktów wyznaczonych metodami satelitarnymi: *stop and go* oraz *true kinematic*, należało porównać je ze współrzędnymi tych samych punktów uzyskanych z pomiarów metodą biegunową 3D. W tym celu dokonano rzutowania punktów obserwowanych (środek pryzmatu i centrum anteny) na poziom, który wyznaczają toki szyn toru. Oznacza to wprowadzenie redukcji geometrycznych



Rys. 4. Profil podłużny odcinka doświadczalnego linii kolejowej Kraków Płaszów-Oświęcim w okolicach przystanku Kraków Sidzina



Rys. 5. Profil podłużny odcinka doświadczalnego kolejowej linii obwodowej wokół Krakowa „Duża Obwodowa”

wokół Krakowa relacji Kraków Mydlniki – Kraków Batowice („Duża Obwodowa”) o długości 1420 m (rys. 5). Na odcinkach tych pomiarami inwentaryzacyjnymi objęto punkty reprezentujące rzeczywistą oś toru, usytuowane w odległościach co 5 m. Badania wykonano, używając systemu pomiarowego przedstawionego schematycznie na rysunku 3. Użyto wózka pomiarowego, dwóch odbiorników satelitarnych serii 500 firmy Leica wyposażonych w anteny typu *choke ring* i tachimetru TCA 2003.

Po przeprowadzeniu serii doświadczeń, w których pomiary inwentaryzacyjne osi toru wykonywano metodą biegunową 3D i RTK GPS w trybie *stop and go*, przystąpiono do pomiarów w trybie *true kinematic* (na obiekcie „Duża Obwodowa”). W trak-

do współrzędnych wszystkich pomierzonych punktów z tytułu różnicy wysokości usytuowania reflektora pryzmatycznego i anteny satelitarnej GPS względem niwelety inwentaryzowanego toru. Redukcje zależą od położenia wózka pomiarowego na torze.

Przystępując do wykonania analiz dokładności poszczególnych metod pomiarowych, obliczono różnice współrzędnych według wzorów:

$$DX_{TC-GPS} = X_{TC} - X_{GPS}$$

$$DY_{TC-GPS} = Y_{TC} - Y_{GPS}$$

Na podstawie przeprowadzonych analiz ustalono, że sytuacyjne położenie obserwowanego punktu w metodzie *stop and go*

wyznacza się z przeciętnym odchyleniem standardowym na poziomie $\pm 4-5$ mm, natomiast w metodzie *true kinematic* – na poziomie $\pm 6-7$ mm.

● Pomiar wysokościowy

Opisane dotychczas prace badawcze pozwoliły na zweryfikowanie dokładności metod satelitarnych GPS jedynie w pomiarach sytuacyjnych. W związku z tym na obiekcie „Sidzina” przeprowadzono dodatkowo testy związane z określeniem przydatności metody biegunowej 3D oraz RTK GPS do wyznaczania rzędnych wysokości punktów osi toru. Pomiar wysokościowe odniesiono do punktów precyzyjnej osnowy założonej wzdłuż inwentaryzowanego odcinka. Wysokości poszczególnych punktów osnowy wyznaczono za pomocą niwelatora kodowego NA 3003. Niwelator ten posłużył również do przeprowadzenia wysokościowych pomiarów wzorcowych. Wykonano więc precyzyjną niwelację geometryczną punktów reprezentujących oś toru. Otrzymane wyniki stanowiły odniesienie w analizach dokładności metody RTK GPS i metody biegunowej 3D.

Pomiary wysokości punktów osi toru techniką GPS oraz metodą klasyczną wykonano w stosunku do różnych układów odniesienia. Należało więc wprowadzić kolejną poprawkę związaną z różnicą undulacji (odstęp geoidy od elipsoidy) dla skrajnych punktów badanego odcinka toru o długości 1020 m.

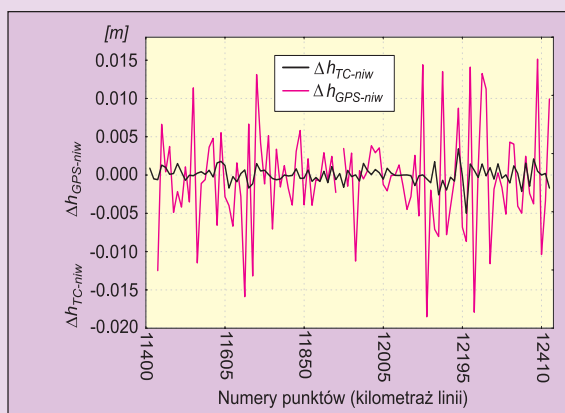
Po ostatecznym wyznaczeniu wysokości punktów osi toru z trzech metod pomiarowych obliczono przewyższenia pomiędzy sąsiednimi punktami osi dla każdej z metod (Dh_{niv} , Dh_{TC} i Dh_{GPS}). Następnie z tak wyznaczonych przewyższeń obliczono ich różnice pomiędzy poszczególnymi metodami pomiarowymi i sporządzono wykresy liniowe (rys. 6). Wartości odchylen standardowych dla wielkości Dh_{TC-niw} i $Dh_{GPS-niw}$ wyniosły odpowiednio: 1,2 i 7,7 mm.

● RTK – tak, ale nie do wszystkiego

Celem przeprowadzonych badań było określenie stanu geometrycznego torów, przygotowanie projektu regulacji i jego wytyczenie w terenie. Tego rodzaju pomiary były dotychczas wykonywane klasycznymi metodami i instrumentami geodezyjnymi,

pozwalającymi na regulację torów w układach względnych. Obecnie, dzięki wykorzystaniu nowoczesnych instrumentów elektronicznych i wprowadzeniu do pomiarów geodezyjnych technologii satelitarnej GPS, pojawiła się możliwość zautomatyzowania procesu wykonywania i przetwarzania obserwacji. Dodatkowo możliwe jest także znaczne podwyższenie dokładności pomiarów. Jest to niezwykle istotne, zwłaszcza podczas prac modernizacyjnych prowadzonych na liniach kolejowych przeznaczonych dla pociągów osiągających duże prędkości. Zastosowanie w pomiarach geodezyjnych technologii GPS pozwala również wyznaczyć kształt osi toru w jednolitym układzie bezwzględny. Zachowane zostają milimetrowe dokładności wyznaczenia położenia punktów osi, nawet dla odcinków toru sięgających kilkudziesięciu kilometrów.

Na podstawie przeprowadzonych doświad-



Rys. 6. Wykresy różnic przewyższeń Δh_{TC-niw} i $\Delta h_{GPS-niw}$

czeń ustalono, że pomiary metodą RTK mogą być wykonywane na odkrytych odcinkach linii kolejowej, wolnych od wysokich przeszkód terenowych. Obserwacje można prowadzić w trybie *stop and go* (z chwilowym zatrzymaniem anteny nad punktem) oraz w trybie *true kinematic* (przy ciągłym ruchu anteny). Omawiana metoda nie może być stosowana do wyznaczania wysokości punktów, gdyż nie gwarantuje uzyskania odpowiednich dokładności. W pracach związanych z kształtowaniem osi toru w płaszczyźnie pionowej dokładność wyznaczenia wysokości normalnych sięga pojedynczych milimetrów. W związku z tym najkorzystniej jest posłużyć się elektronicznym niwelatorem kodowym z automatyczną rejestracją wyników obserwacji.

● Coraz więcej automatyzacji

Przedstawiona technologia geodezyjnej inwentaryzacji osi toru pozwala na wyznaczanie współrzędnych dowolnej liczby

punktów osi zarówno na prostoliniowych, jak i krzywoliniowych odcinkach toru. Obserwowane punkty mogą być rozmieszczone w dowolnych lub ściśle określonych odległościach. Pozwala to na rezygnację z bezpośredniego, uciążliwego pomiaru strzałek charakteryzujących rzeczywisty przebieg krzywych przejściowych i łuków kołowych. Istnieje jednak możliwość obliczania wartości tych strzałek na podstawie współrzędnych punktów rozmieszczonych w równych odstępach na torze. Dzięki temu możemy przygotowywać projekt regulacji z wykorzystaniem dotychczas stosowanych algorytmów i programów komputerowych. Możliwe jest również zastosowanie nowoczesnych programów do wykonania projektów regulacji. Pozwalają one na bezpośrednie wykorzystanie współrzędnych dowolnie rozmieszczonych punktów reprezentujących rzeczywistą oś toru.

Wszystkie prace prowadzone przy użyciu omówionego systemu pomiarowego są niemal w pełni zautomatyzowane. Jedynie w pomiarach wykonywanych tachimetrem i niwelatorem elektronicznym operator musi wycelować na reflektor przyzmatyczny lub na łatę kodową. Natomiast cały proces obserwacji i rejestracji uzyskanych wyników, a także prowadzonych w terenie obliczeń odbywa się bez jego ingerencji. Wyniki obserwacji są automatycznie zapisywane w modułowym rejestratorze toromierza oraz w komputerze polowym usytuowanym na wózku pomiarowym.

Prof. Jan Gocał jest kierownikiem Zakładu Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie, a **dr Michał Strach** adiunktem w tym Zakładzie

Literatura

- Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego Nr 9T12C00318 pt. „Zintegrowany system 3D kontroli stanu geometrycznego osi torów kolejowych w procesie ich regulacji” KBN 2000-2003*, kierownik Jan Gocał;
- Strach M.** (2003), *Ocena możliwości wykorzystania techniki satelitarnej RTK GPS do regulacji osi torów kolejowych*, Rozprawa doktorska, Kraków, AGH;
- Gocał J., Lenda G., Strach M., Uznański A.** (2003), *Experimental Inventory Measurements of Railway Tracks by a RTK GPS Method*, „Proceedings of the Geodesy and Environmental Engineering Commission”, Geodesy 40, Polish Academy of Sciences – the Kraków Section;
- Gocał J., Strach M.** (2001), *An initial assessment of the RTK GPS method as applied to monitoring of railway track geometry*, „Geodezja i Kartografia” t. L, z. 2,
- Strach M.** (2002), *An assessment of the 3D polar method as applied to the adjustment of the railway track axis in the vertical plane*, „Proceedings of the Geodesy and Environmental Engineering Commission, Geodesy 39”, Polish Academy of Sciences – the Kraków Section.