

## OKREŚLENIE OPÓŹNIENIA TROPOSFERYCZNEGO Z UŻYCIEM SENSORA GPS W TRANSPORCIE LOTNICZYM

*W artykule omówiony został problem wyznaczenia parametru opóźnienia troposferycznego z użyciem obserwacji GPS w obszarze implementacji techniki GNSS w transporcie lotniczym. Parametr opóźnienia troposferycznego został wyznaczony na podstawie programów CSRS-PPP, GAPS i magicPPP. W artykule dokonano porównania wartości opóźnienia troposferycznego dla uzyskanych wyników badawczych. W eksperymencie badawczym wykorzystano dane GPS z odbiornika Topcon HiperPro zamontowanego na pokładzie samolotu Cessna 172.*

### WSTĘP

Podstawowym zadaniem techniki satelitarnej GNSS w obszarze transportu lotniczego jest określenie pozycji nawigacyjnej statku powietrznego oraz określenie dokładności wyznaczanych współrzędnych [1]. Ponadto technika satelitarna GNSS dostarcza wielu innych ciekawych produktów, które mogą być wykorzystywane w transporcie lotniczym do poprawy bezpieczeństwa wykonywania operacji lotniczych. Jednym z produktów wyznaczanych z użyciem techniki satelitarnej GNSS jest parametr opóźnienia troposferycznego. Określenie rzeczywistej wartości opóźnienia troposferycznego ma ogromne znaczenia w aspekcie zabezpieczenia meteorologicznego dla prowadzonych operacji lotniczych w branży transportowej. Ponadto opóźnienie troposferyczne jest stosowane w obszarze geodezji, geofizyki, jak i klimatologii [2]. Zasadniczymi komponentami opóźnienia troposferycznego są część hydrostatyczna (ang. *Zenith Hydrostatic Delay*) oraz część mokra (ang. *Zenith Wet Delay*) [3]. Praktycznie około 90% całkowitego opóźnienia troposferycznego stanowi część hydrostatyczna, która jest zależna od ciśnienia atmosferycznego. Z kolei wartość mokra stanowi około 10% całkowitego opóźnienia troposferycznego i jest funkcyjnie związana z temperaturą, wilgotnością powietrza i koncentracją pary wodnej [4]. Część hydrostatyczna opóźnienia troposferycznego jest wyznaczana w oparciu o rozkład atmosfery standardowej lub na podstawie odczytów z sensorów meteorologicznych. Część mokra opóźnienia troposferycznego jest trudna do określenia z użyciem modeli empirycznych, stąd zaleca się wyznaczenie tego parametru w procesie precyzyjnego opracowania obserwacji GNSS [5]. Wśród najbardziej rozpowszechnionych metod wyznaczenia parametru ZWD jest metoda precyzyjnego pozycjonowania punktowego PPP (ang. *Precise Point Positioning*) z użyciem obserwacji kodowo-fazowych GNSS. Warto dodać, iż w metodzie PPP możliwe jest również wyznaczenie gradientów troposferycznych [6].

Celem prezentowanego artykułu naukowego jest przedstawienie uzyskanych wartości opóźnienia troposferycznego dla metody PPP. Obliczenia wartości parametru ZTD dokonano z użyciem programów CSRS-PPP, GAPS oraz magicPPP. W obliczeniach wykorzystano obserwacje kodowo-fazowe GPS z odbiornika Topcon HiperPro umieszczonego w samolocie Cessna 172. Lot testowy został przeprowadzony na lotnisku wojskowym w Dęblinie w 2010 r. Całość artykułu podzielono na 3 części oraz dodano spis literatury na końcu pracy.

### 1. METODYKA BADAŃ. EKSPERYMENT BADAWCZY. WYNIKI I DISKUSJA

Model matematyczny metody PPP opisuje równanie (1) [7]:

$$\begin{cases} P_3 = \rho + c \cdot (dtr - dts) + Trop + Rel + M_{P3} \\ L_3 = \rho + c \cdot (dtr - dts) + Trop + Rel + B_3 + \delta_{wu} + M_{L3} \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

$P_3 = \alpha_1 P1 + \alpha_2 P2$  - kombinacja liniowa Ionosphere-Free dla pomiarów kodowych,

$L_3 = \alpha_1 L1 + \alpha_2 L2$  - kombinacja liniowa Ionosphere-Free dla pomiarów fazowych,

$$\alpha_1 = + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2},$$

$$\alpha_2 = - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2},$$

$\rho$  - odległość geometryczna między satelitami GPS a odbiornikiem, zawiera informacje na temat parametrów ruchu obrotowego Ziemi, precyzyjnych współrzędnych anteny satelity i odbiornika, centrum fazowego anteny satelity i odbiornika oraz efektów pływowych i dynamicznych, prędkości ruchu płyty kontynentalnej, itp.,

$$\rho = \sqrt{(X_r - X_s)^2 + (Y_r - Y_s)^2 + (Z_r - Z_s)^2},$$

$(X_r, Y_r, Z_r)$  - pozycja samolotu w układzie geocentrycznym,

$(X_s, Y_s, Z_s)$  - pozycja satelity GPS na orbicie,

$c$  - prędkość światła,

$dtr$  - chód zegara odbiornika dla obserwacji GPS,

$dts$  - chód zegara satelity GPS,

$Trop$  - opóźnienie troposferyczne dla obserwacji GPS,

$Rel$  - efekty relatywistyczne dla obserwacji GPS,

$\delta_{wu}$  - ślizg fazy,

$B_3$  - wartość rzeczywista nieoznaczoności fazy,

$M_{P3}$  - efekt wielotorowości dla pomiarów kodowych,

$M_{L3}$  - efekt wielotorowości dla pomiarów fazowych.

Parametr  $Trop$  w równaniu (1) opisuje wartość skośną opóźnienia troposferycznego STD (ang. *Slant Total Delay*), które jest określane dla każdego śledzonego satelity i wyznaczone z równania [8]:

$$Trop = STD = SHD + SWD \quad (2)$$

gdzie:

SHD- skośna wartość części hydrostatycznej opóźnienia troposferycznego,

SWD- skośna wartość części mokrej opóźnienia troposferycznego.

Ponadto rozwijając zmienne SHD i SWD z równania (2) za pomocą funkcji odwzorowujących, otrzymamy:

$$STD = MF_H \cdot ZHD + MF_W \cdot ZWD \quad (3)$$

gdzie:

$MF_H$ - funkcja odwzorowująca dla części hydrostatycznej opóźnienia troposferycznego,

$MF_W$ - funkcja odwzorowująca dla części mokrej opóźnienia troposferycznego.

Natomiast całkowita wartość opóźnienia troposferycznego (ang. *Zenith Total Delay*) jest opisywana za pomocą wyrażenia [9]:

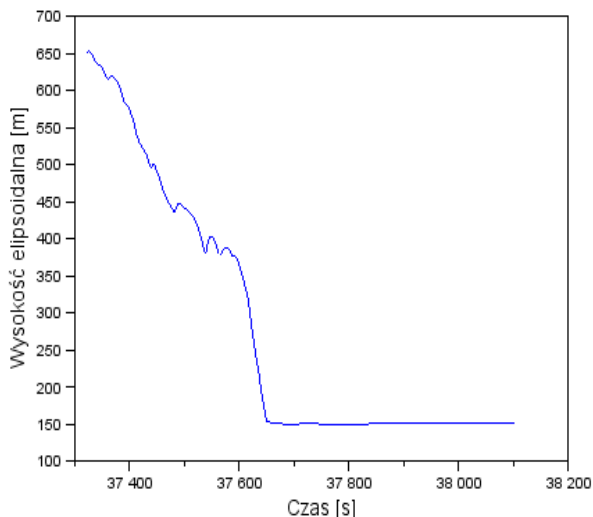
$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (4)$$

gdzie:

ZHD- część hydrostatyczna opóźnienia troposferycznego na kierunku zenitu,

ZWD- część mokra opóźnienia troposferycznego na kierunku zenitu.

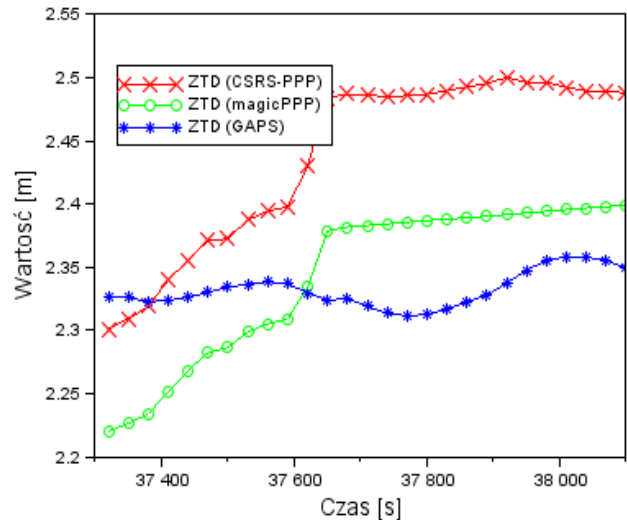
W metodzie PPP, wartość całkowitego opóźnienia troposferycznego jest wyznaczana z zastosowaniem filtracji Kalmana lub metody najmniejszych kwadratów w procesie sekwencyjnym. W takim rozwiązaniu parametr ZHD jest określany z użyciem empirycznych modeli troposfery (np. MOPS, UNB3m, GPT) lub rzeczywistych danych meteorologicznych, z kolei część mokra ZWD jest wyznaczana z obserwacji GNSS w procesie stochastycznym. W metodzie PPP wyznaczone są ponadto parametry współrzędnych anteny odbiornika, chodu zegara odbiornika oraz nieoznaczoności fazy [10].



**Rys. 1.** Wysokość elipsoidalna lotu samolotu Cessna podczas lądowania

W ramach eksperymentu badawczego dokonano wyznaczenia parametru ZTD z wykorzystaniem programów CSRS-PPP, GAPS oraz magicPPP. W teście badawczym użyto obserwacji kodowofazowych GPS, zarejestrowanych przez dwuczęstościowy odbiornik Topcon HiperPro. Odbiornik GNSS został umieszczony w kabinie pilotów na potrzeby wykonywanego testu lotniczego z wykorzystaniem samolotu Cessna 172. Czas zapisu obserwacji w odbiorniku GNSS wynosił 1 sekundę. Test lotniczy odbył się w dniu 1

czerwca 2010 w okolicach lotniska wojskowego w Dęblinie. W eksperymencie badawczym dokonano analizy uzyskanych wartości ZTD podczas procesu podchodzenia samolotu Cessna do lądowania oraz samego procesu lądowania (patrz Rysunek 1). Proces podejścia samolotu do lądowania jest bardzo ważnym elementem pilotażu, a zarazem kluczowym etapem lotu samolotu podczas pokonywanej trasy.



**Rys. 2.** Wartość ZTD z programu CSRS-PPP, GAPS i magicPPP

Na Rysunku nr 2 przedstawiono uzyskane wartości parametru ZTD z programów CSRS-PPP, GAPS oraz magicPPP. W celu synchronizacji danych z 3 programów, wartości ZTD zostały zaprezentowane dla rozdzielczości czasowej 30 sekund. Przeciętna wartość parametru ZTD w programie CSRS-PPP wynosi 2,437 m z odchyleniem standardowym 0,069 m. Ponadto rozrzut wartości parametru ZTD w programie CSRS-PPP wynosi od 2,301 m do 2,500 m. Z kolei mediana dla zbioru wyników ZTD z programu CSRS-PPP jest równa 2,486 m. Przeciętna wartość parametru ZTD w programie magicPPP jest równa 2,343 m z odchyleniem standardowym 0,062 m. Natomiast rozpiętość uzyskanych wartości parametru ZTD w programie magicPPP wynosi od 2,221 m do 2,399 m. Różnica pomiędzy maksymalną a minimalną wartością parametru ZTD z programu magicPPP jest równa 0,178 m. Z kolei mediana dla zbioru wyników ZTD z programu magicPPP wynosi 2,383 m. Przeciętna wartość parametru ZTD w programie GAPS jest równa 2,332 m z odchyleniem standardowym 0,014 m. Natomiast rozpiętość uzyskanych wartości parametru ZTD w programie GAPS wynosi od 2,312 m do 2,358 m. Różnica pomiędzy maksymalną a minimalną wartością parametru ZTD z programu GAPS jest równa 0,046 m. Z kolei mediana dla zbioru wyników ZTD z programu GAPS wynosi 2,328 m.

Na Rysunku nr 3 zaprezentowano wartości różnicy parametru ZTD z programu CSRS-PPP, GAPS oraz magicPPP. Wartość różnicy parametru ZTD określono ze wzoru:

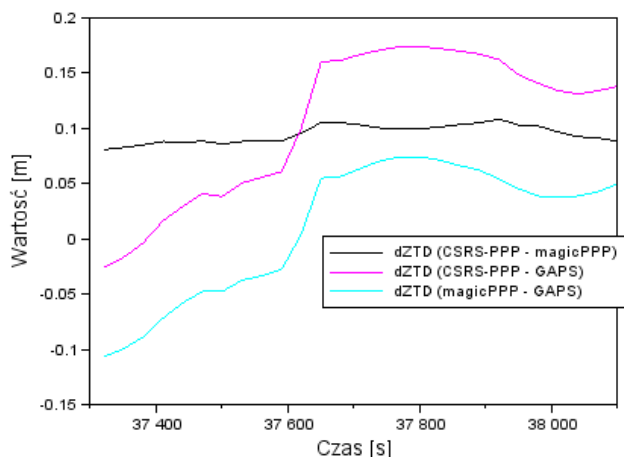
$$dZTD = \begin{cases} ZTD_{CSRS-PPP} - ZTD_{magicPPP} \\ ZTD_{CSRS-PPP} - ZTD_{GAPS} \\ ZTD_{magicPPP} - ZTD_{GAPS} \end{cases} \quad (5)$$

gdzie:

$ZTD_{CSRS-PPP}$  - wartość ZTD z programu CSRS-PPP,

$ZTD_{magicPPP}$  - wartość ZTD z programu magicPPP,

$ZTD_{GAPS}$  - wartość ZTD z programu GAPS.



**Rys. 3.** Różnica wartości ZTD z programu CSRS-PPP, GAPS i magicPPP

Przeciętna wartość parametru dZTD pomiędzy wynikami z programu CSRS-PPP oraz magicPPP wynosi 0,095 m z odchyleniem standardowym 0,008 m. Ponadto rozrzut wartości parametru dZTD wynosi od 0,081 m do 0,108 m. Różnica pomiędzy maksymalną a minimalną wartością parametru dZTD jest równa 0,027 m. Natomiast mediana dla zbioru wyników dZTD jest równa 0,096 m. W przypadku porównania wyników opóźnienia troposferycznego z programu CSRS-PPP oraz GAPS, średnia wartość parametru dZTD wynosi 0,105 m z odchyleniem standardowym 0,068 m. Poza tym rozrzut wartości parametru dZTD wynosi od -0,026 m do 0,174 m. Ponadto mediana dla zbioru wyników dZTD jest równa 0,134 m. Przepiętna wartość parametru dZTD pomiędzy wynikami z programu magicPPP oraz GAPS wynosi 0,106 m z odchyleniem standardowym 0,061 m. Ponadto rozrzut wartości parametru dZTD wynosi od -0,107 m do 0,074 m. Różnica pomiędzy maksymalną a minimalną wartością parametru dZTD jest równa 0,181 m. Natomiast mediana dla zbioru wyników dZTD jest równa 0,039 m.

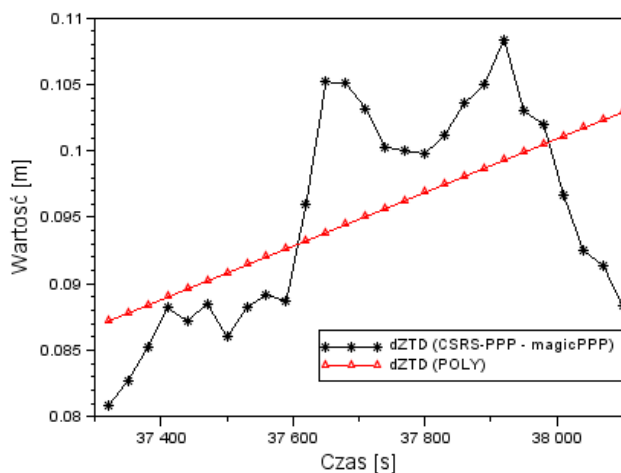
Na Rysunku nr 4, 5 i 6 pokazano charakter zmian parametru dZTD dla zastosowania rozwiązania modelu wielomianowego. Zmiany parametru dZTD dla metody wielomianowej opisano zależnością [11]:

$$dZTD = a_1 \cdot T + a_2 \quad (6)$$

gdzie:

$(a_1, a_2)$  - wyznaczone współczynniki wielomianu 1-ego stopnia,

T- epoka pomiarowa.



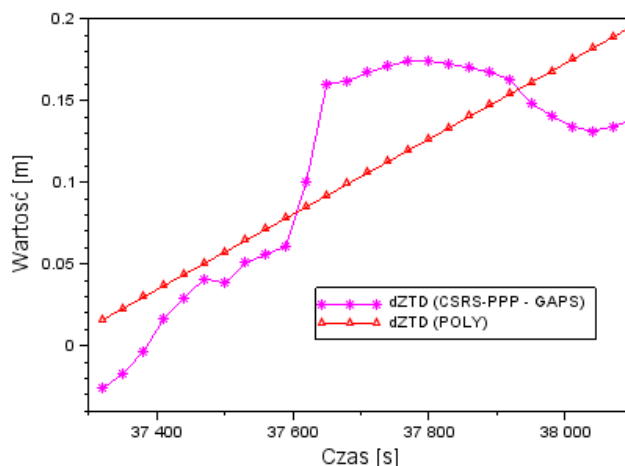
**Rys. 4.** Charakterystyka zmian parametru dZTD pomiędzy CSRS-PPP i magicPPP dla metody wielomianowej

Na Rysunku 4 zaprezentowano charakter zmian parametru dZTD z użyciem wielomianu 1-ego stopnia dla wyników z programu CSRS-PPP oraz magicPPP. Wyznaczone współczynniki wielomianu 1-ego stopnia są równe odpowiednio:

$$a_1 = 0.202 \cdot 10^{-4} \text{ m/s},$$

$$a_2 = -0.666 \text{ m}.$$

Amplituda wyników dla wielomianu 1-ego stopnia wynoszą od 0,087 m do 0,103 m. Ponadto błąd dopasowania funkcji wielomianowej względem rzeczywistych wyników dZTD wynosi 0,007 m.



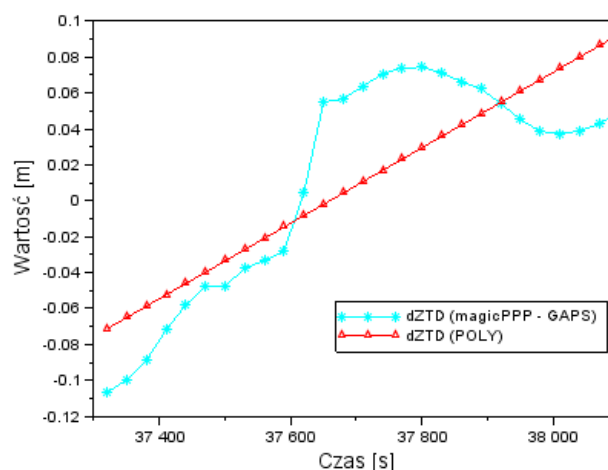
**Rys. 5.** Charakterystyka zmian parametru dZTD pomiędzy CSRS-PPP i GAPS dla metody wielomianowej

Na Rysunku 5 zaprezentowano charakter zmian parametru dZTD z użyciem wielomianu 1-ego stopnia dla wyników z programu CSRS-PPP oraz GAPS. Wyznaczone współczynniki wielomianu 1-ego stopnia są równe odpowiednio:

$$a_1 = 0.230 \cdot 10^{-3} \text{ m/s},$$

$$a_2 = -8.578 \text{ m}.$$

Amplituda wyników dla wielomianu 1-ego stopnia wynoszą od 0,016 m do 0,195 m. Ponadto błąd dopasowania funkcji wielomianowej względem rzeczywistych wyników dZTD wynosi 0,040 m.



**Rys. 6.** Charakterystyka zmian parametru dZTD pomiędzy magicPPP i GAPS dla metody wielomianowej

Na Rysunku 6 zaprezentowano charakter zmian parametru dZTD z użyciem wielomianu 1-ego stopnia dla wyników z programu magicPPP oraz GAPS. Wyznaczone współczynniki wielomianu 1-ego stopnia są równe odpowiednio:

$$a_1 = 0.210 \cdot 10^{-3} \text{ m/s},$$

$$a_2 = -7.918 \text{ m}.$$

Amplituda wyników dla wielomianu 1-ego stopnia wynoszą odpowiednio od -0,071 m do 0,093 m. Ponadto błąd dopasowania funkcji wielomianowej względem rzeczywistych wyników dZTD wynosi 0,034 m.

## PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono metody wyznaczenia parametru opóźnienia troposferycznego ZTD z obserwacji GPS. W tym celu wykorzystano programy CSRS-PPP, GAPS i magicPPP, działające jako darmowe serwisy obliczeniowe dla użytkowników. Dane obserwacyjne GPS zostały zgromadzone przez odbiornik Topcon HiperPro w teście lotniczym, wykonywanym samolotem Cessna 172 w okolicach miasta Dęblin. W ramach prezentowanego artykułu określono wartości parametru ZTD z programu CSRS-PPP, GAPS i magicPPP; określono różnicę parametru ZTD pomiędzy wynikami z programu CSRS-PPP, GAPS i magicPPP; określono również charakter zmian różnicy parametru ZTD przy zastosowaniu modelu wielomianowego. Prezentowane w pracy metody badawcze określające wielkość parametru ZTD powinny być dalej rozwijane w celu prawidłowej weryfikacji opóźnienia troposferycznego na potrzeby implementacji techniki GNSS w transporcie lotniczym. Dla procedury nieprecyzyjnego podejścia do lądowania NPA zastosowany system określenia wartości parametru opóźnienia troposferycznego może stanowić cenne źródło informacji na temat zmiany stanu troposfery. Ponadto wyznaczenie prawidłowej wartości opóźnienia troposferycznego wpływa na wysokość elipsoidalną odbiornika GNSS, co z kolei ma przełożenie na określenie wysokości lotu statku powietrznego.

## BIBLIOGRAFIA

1. Ćwiklak J., Grzegorzewski M., Jaferník H., Oszczak S., Ciećko A., *Wykorzystanie systemu EGNOS na potrzeby nawigacji lotniczej w Polsce wschodniej*, „Problemy eksploatacji”, nr 1/2011, str. 57-64.
2. Kruczyk M., *Opóźnienie troposferyczne GNSS i jego zastosowanie do badań stanu atmosfery*, „Prace Naukowe Geodezja”, z. 54, ISBN 978-83-7814-151-8, 2013.
3. Schüler T., *On Ground-based GPS tropospheric delay estimation*, Ph.D. thesis, Institute of Geodesy and Navigation University of FAF Munich, Germany, 2001.
4. Bosa J., *Precyzyjne opracowanie satelitarnych obserwacji GPS w lokalnych sieciach położonych w terenach górskich*, Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Nr 522, ISSN 0867-7964, 2005.
5. Hadaś T., Bosa J., Kapłon J., Rohm W., Sierny J., Wilgan K., *Modelowanie stanu troposfery z wykorzystaniem obserwacji GNSS i meteorologicznych*, „GEODETA”, 1(224), 44-48, 2014.
6. Kroszczyński K., *Mezoskalowe funkcje odwzorowujące opóźnienia troposferycznego sygnałów GNSS*, Redakcja Wydawnictwa WAT, ISBN 978-83-62954-99-5, 2013.
7. Sanz Subirana J., Juan Zornoza J. M., Hernández-Pajares M., *GNSS Data Processing, Volume I: Fundamentals and Algorithms*, Publisher: ESA Communications, ESTEC, Noordwijk, Netherlands, ISBN 978-92-9221-886-7, 2013.
8. Bosa J., Rohm W., Sierny J., Kapłon J., *GNSS Meteorology*, „TransNav”, vol. 5, no. 1, 2011, pp. 79-83.
9. Kleijer F., *Troposphere modeling and filtering for precise GPS leveling*, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, ISBN 90-6132-284-7, 2004.
10. Leandro R., Santos M., Langley R., *Analyzing GNSS data in precise point positioning software*, „GPS Solutions”, Vol. 15, Issue 1, 2011, 1-13, DOI 10.1007/s10291-010-0173-9.
11. Ratajczak T., *Metody numeryczne: przykłady i zadania*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2006.

### Determination troposphere delay using GPS sensor in air transport

*The article discussed the problem of the designation of tropospheric delay parameter using GPS observations in the area of implementation of GNSS technology in air transport. Tropospheric delay parameter has been set on the basis of CSRS-PPP, GAPS and magicPPP softwares. The article compares the values of tropospheric delay for the results presented in the research. In experiment the GPS data from Topcon Hiper Pro receiver that was installed on the aircraft Cessna 172, were used.*

Autorzy:

mgr inż. **Kamil Krasuski** – Wydział Geodezji, Kartografii i Katastru Nieruchomości, Starostwo Powiatowe Ryki, e-mail: [kk\\_deblin@wp.pl](mailto:kk_deblin@wp.pl)

dr inż. **Henryk Jaferník** – Wydział Transportu, Politechnika Śląska, Katowice, e-mail: [henryk.jafernik@polsl.pl](mailto:henryk.jafernik@polsl.pl)