

OKREŚLENIE PARAMETRÓW HPL I VPL Z UŻYCIEM SYSTEMU WSPOMAGANIA SBAS W TRANSPORCIE LOTNICZYM

Artykuł przedstawia rezultaty badań dotyczące wyznaczenia poziomów bezpieczeństwa HPL i VPL dla systemu GBAS w transporcie lotniczym. Parametry HPL i VPL zostały określone dla stacji referencyjnej REF1 na podstawie rozwiązania GPS/SBAS. Obliczenia zostały zrealizowane dla metody pozycjonowania Single Point Positioning w trybie statycznym. W artykule dokonano porównania wartości parametrów HPL i VPL ze standardami technicznymi ICAO.

WSTĘP

Technika satelitarna GNSS ograżywa coraz ważniejszą rolę również w obszarze transportu lotniczego. Najlepszym przykładem praktycznego zastosowania techniki satelitarnej GNSS w transporcie lotniczym jest implementacja systemów wspomaganie ABAS, SBAS oraz GBAS. Systemy wspomaganie ABAS, SBAS i GBAS mają swoje przeznaczenie, zastosowanie i współdziałanie głównie z systemem nawigacyjnym GPS [1]. Jednakże docelowo systemy wspomaganie ABAS, SBAS i GBAS mają być kompatybilne i kooperacyjne również z nawigacyjnymi systemami GLONASS, BEIDOU, GALILEO i NAVIC. System ABAS w obecnej postaci posiada certyfikację stosowania pod systemy nawigacyjne GPS i GLONASS. Podstawowym komponentem systemu ABAS jest moduł RAIM, który zapewnia utrzymanie wiarygodności pozycji statku powietrznego, dokładność wyznaczanej pozycji, ciągły monitoring obliczeń i alarmowanie w przypadku utraty rozwiązania nawigacyjnego pozycji [2]. System wspomaganie SBAS bazuje na wykorzystaniu korekt różnicowych od geostacjonarnych systemów satelitarnych (np. EGNOS lub WAAS) do określenia pozycji statku powietrznego [3]. System SBAS zapewnia w głównej mierze podwyższenie dokładności wyznaczenia pozycji statku powietrznego oraz zapewnia określenie parametru wiarygodności do prowadzenia nawigacji w płaszczyźnie poziomej i pionowej [4]. System GBAS funkcjonuje w oparciu o zastosowanie precyzyjnych technik pozycjonowania różnicowego z użyciem naziemnej sieci stacji referencyjnych (np. ASG-EUPOS) [5]. Warto dodać, że system GBAS umożliwia określenie pozycji statku powietrznego z najwyższą dokładnością w stosunku do systemów ABAS i SBAS.

W przypadku funkcjonowania systemów wspomaganie ABAS, SBAS oraz GBAS bardzo ważnym aspektem technicznym jest określenie poziomu wiarygodności pozycjonowania satelitarnego w postaci wyznaczenia parametrów bezpieczeństwa HPL i VPL [6]. Parametr HPL określa poziom bezpieczeństwa dla wykonywania operacji lotniczych w płaszczyźnie poziomej, zaś odpowiednio VPL określa poziom bezpieczeństwa dla wykonywania operacji lotniczych w płaszczyźnie pionowej. Parametry HPL i VPL mogą zostać również wyznaczone dla stacji referencyjnej GNSS zainstalowanej na terenie lotniska lub portu lotniczego. Określone w ten sposób parametry HPL i VPL mogą stanowić cenne źródło informacji w kontekście zabezpieczenia lotniczego dla wykonywanych podejść do lądowania.

Celem prezentowanej pracy jest możliwość wyznaczenia parametrów bezpieczeństwa HPL oraz VPL dla pojedynczej stacji referencyjnej GNSS. Parametry HPL i VPL zostały określone na podstawie rozwiązania GPS/SBAS z użyciem korekt różnicowych od systemu wspomaganie EGNOS. W eksperymencie badawczym dokonano wyznaczenia parametrów HPL i VPL dla stacji referencyjnej REF1, która była wykorzystana w teście lotniczym w Dęblinie w 2010 r. Stacja referencyjna REF1 posłużyła m. in. do określenia precyzyjnej trajektorii lotu samolotu Cessna 172.

1. MODEL MATEMATYCZNY DLA OKREŚLENIA PARAMETRÓW HPL I VPL

Model matematyczny opisujący wartości parametrów HPL i VPL bazuje na wykorzystaniu informacji na temat dokładności wyznaczenia pozycji odbiornika ruchomego lub stacji referencyjnej. Podstawowe równania matematyczne określające wartości parametrów HPL i VPL można zapisać, jak poniżej [7]:

$$\begin{cases} HPL = k_H \cdot \sqrt{\frac{m_E^2 + m_N^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{m_E^2 - m_N^2}{2}\right)^2 + m_{EN}^2}} \\ VPL = k_V \cdot m_U \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

- k_H - współczynnik określający nawigację w płaszczyźnie poziomej, $k_H = 6.0$ dla podejścia precyzyjnego PA,
- k_V - współczynnik określający nawigację w płaszczyźnie pionowej, $k_V = 5.33$ dla podejścia precyzyjnego PA,
- m_N - odchylenie standardowe dla współrzędnej North,
- m_E - odchylenie standardowe dla współrzędnej East,
- m_U - odchylenie standardowe dla współrzędnej Up.

Wartości parametrów (m_N, m_E, m_U) określają dokładność pozycjonowania satelitarnego w układzie lokalnym ENU (East-North-Up). Parametry (m_N, m_E, m_U) są wyznaczone w procesie stochastycznym opracowania obserwacji GNSS i określają dokładność wyznaczanych współrzędnych stacji referencyjnej. Ponadto preferowaną metodą służącą do wyznaczenia parametrów (m_N, m_E, m_U) jest metoda najmniejszych kwadratów lub filtr Kalmana. Należy dodać, że parametry (m_N, m_E, m_U) powinny

zostać określone z prawdopodobieństwem 95% (poziom ufności 0.95).

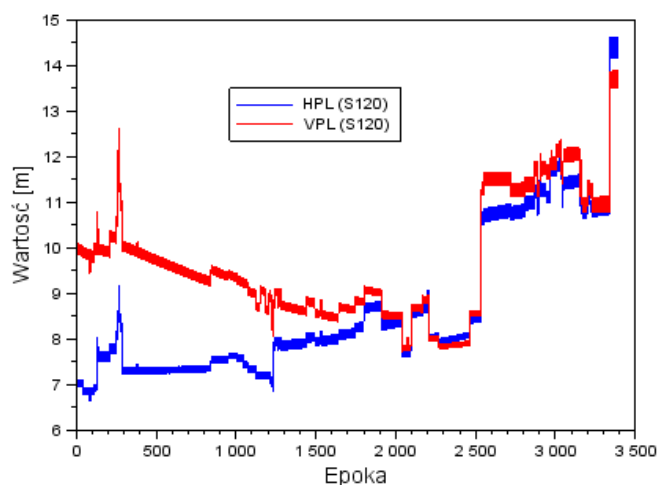
2. OPIS EKSPERYMENTU BADAWCZEGO

W ramach eksperymentu badawczego dokonano wyznaczenia parametrów HPL i VPL na podstawie obserwacji GPS dla stacji referencyjnej REF1 w Dęblinie. Stacja referencyjna REF1 została umieszczona na dachu budynku Wydziału Lotnictwa WSOSP w celu gromadzenia obserwacji GNSS z systemów GPS i GLONASS. Stacja referencyjna REF1 była wykorzystana do określenia precyzyjnej trajektorii lotu samolotu Cessna 172 podczas prowadzonego testu lotniczego w dniu 01.06.2010. Na stacji referencyjnej zainstalowano dwuczęstotliwościowy odbiornik Topcon HiperPro, mający na celu permanentne gromadzenie obserwacji GNSS. W trakcie eksperymentu badawczego wykorzystano obserwacje kodowe na częstotliwości L1 w formacie RINEX 2.11 z odbiornika Topcon HiperPro. Ponadto w obliczeniach użyto również korekt różnicowych w formacie EMS od satelitów EGNOS w celu podwyższenia dokładności pozycjonowania statycznego. W przypadku korekt różnicowych EGNOS wykorzystano dane od satelitów S120, S124 i S126. Do obliczeń zastosowano moduł RTKPOST programu RTKLIB, w którym ustawiono następującą konfigurację parametrów [8]:

- typ pozycjonowania: Single Point Positioning,
- tryb pozycjonowania: statyczny,
- źródło obserwacji: format RINEX 2.11,
- źródło korekt różnicowych EGNOS: format EMS,
- maska elewacji: 5°,
- poprawka jonosferyczna: model SBAS,
- poprawka troposferyczna: model SBAS,
- dane efemerydalne: depesza nawigacyjna typu Broadcast oraz SBAS,
- dane o poprawce zegara satelity: depesza nawigacyjna typu Broadcast oraz SBAS,
- system GNSS: GPS i SBAS (EGNOS),
- układ odniesienia: układ elipsoidalny WGS-84.

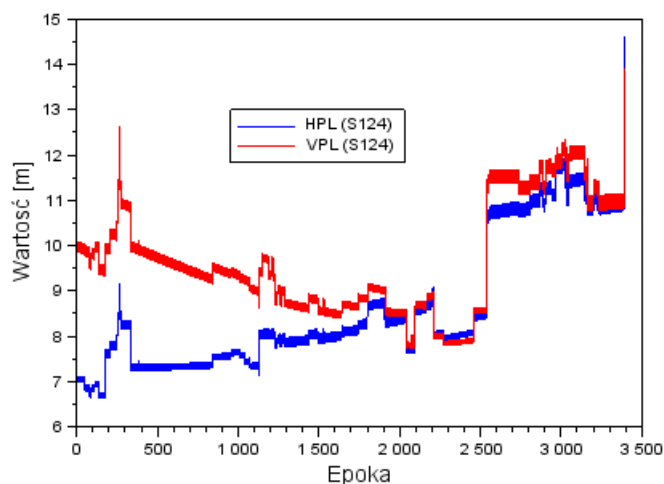
Zastosowanie modułu RTKPOST umożliwiło wyznaczenie współrzędnych stacji referencyjnej oraz dokładności współrzędnych (m_N, m_E, m_U), niezbędnych do określenia parametrów bezpieczeństwa HPL i VPL. Wartości parametrów HPL i VPL wyznaczono w oparciu o równanie (1) i przedstawiono w rozdziale 4.

3. REZULTATY BADAŃ



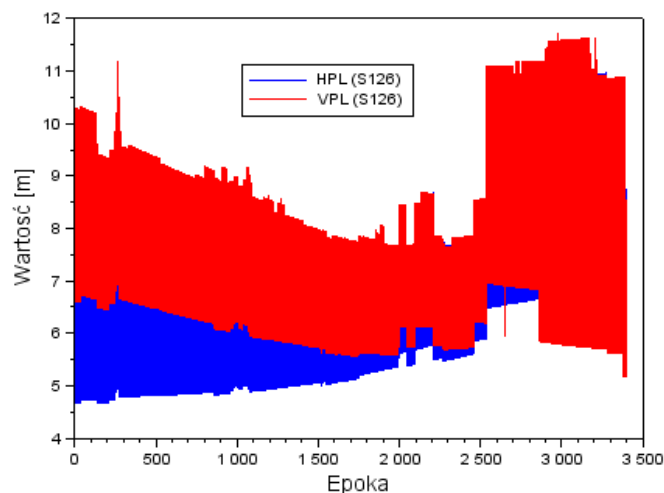
Rys. 1. Wartości parametrów HPL i VPL dla rozwiązania GPS/EGNOS (S120)

Na Rys. 1 przedstawiono wartości parametru HPL i VPL dla rozwiązania z użyciem korekt różnicowych od satelity EGNOS S120. Wartość przeciętna parametru HPL wynosi 8.665 m, zaś odpowiednio parametru VPL równo 9.706 m. Rozrzut uzyskanych wartości parametru HPL wynosi od 6.631 m do 14.648 m, zaś dla parametru VPL wynosi od 7.713 m do 13.919 m. Wartość mediany dla parametru HPL jest równa 8.021 m, natomiast dla parametru VPL odpowiednio 9.410 m. Ponadto parametr RMS dla parametru HPL jest równy 1.619 m, zaś dla parametru VPL odpowiednio 1.316 m.



Rys. 2. Wartości parametrów HPL i VPL dla rozwiązania GPS/EGNOS (S124)

Na Rys. 2 przedstawiono wartości parametru HPL i VPL dla rozwiązania z użyciem korekt różnicowych od satelity EGNOS S124. Wartość przeciętna parametru HPL wynosi 8.638 m, zaś odpowiednio parametru VPL równo 9.963 m. Rozrzut uzyskanych wartości parametru HPL wynosi od 6.616 m do 14.631 m, zaś dla parametru VPL wynosi od 7.713 m do 13.920 m. Wartość mediany dla parametru HPL jest równa 8.057 m, natomiast dla parametru VPL odpowiednio 9.449 m. Ponadto parametr RMS dla parametru HPL jest równy 1.472 m, zaś dla parametru VPL odpowiednio 1.234 m.



Rys. 3. Wartości parametrów HPL i VPL dla rozwiązania GPS/EGNOS (S126)

Na Rys. 3 przedstawiono wartości parametru HPL i VPL dla rozwiązania z użyciem korekt różnicowych od satelity EGNOS S126. Wartość przeciętna parametru HPL wynosi 6.809 m, zaś

odpowiednio parametru VPL równo 7.714 m. Rozrzut uzyskanych wartości parametru HPL wynosi od 4.654 m do 11.195 m, zaś dla parametru VPL wynosi od 5.159 m do 11.723 m. Wartość mediany dla parametru HPL jest równa 6.773 m, natomiast dla parametru VPL odpowiednio 7.233 m. Ponadto parametr RMS dla parametru HPL jest równy 1.804 m, zaś dla parametru VPL odpowiednio 1.831 m.

Na podstawie uzyskanych wyników wartości HPL określono również różnicę pomiędzy poszczególnymi rozwiązaniami. Różnicę wartości pomiędzy poszczególnymi rezultatami parametru HPL określono ze wzoru:

$$dHPL = \begin{cases} HPL_{GPS/EGNOS(S120)} - HPL_{GPS/EGNOS(S124)} \\ HPL_{GPS/EGNOS(S120)} - HPL_{GPS/EGNOS(S126)} \\ HPL_{GPS/EGNOS(S124)} - HPL_{GPS/EGNOS(S126)} \end{cases} \quad (2)$$

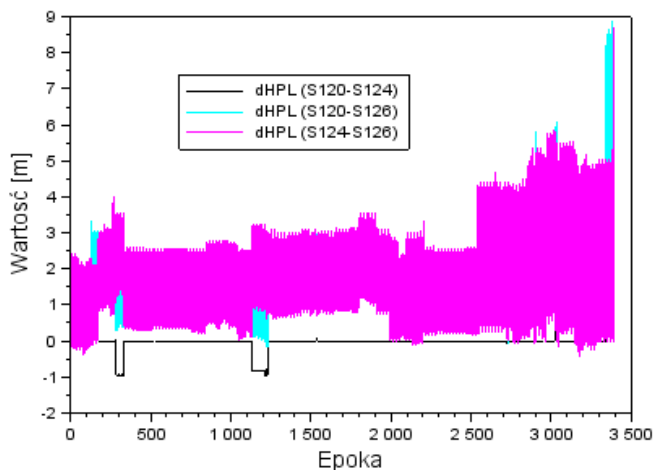
gdzie:

$HPL_{GPS/EGNOS(S120)}$ - wartość HPL z rozwiązania GPS/EGNOS (S120),

$HPL_{GPS/EGNOS(S124)}$ - wartość HPL z rozwiązania GPS/EGNOS (S124),

$HPL_{GPS/EGNOS(S126)}$ - wartość HPL z rozwiązania GPS/EGNOS (S126).

Na Rys. 4 zaprezentowano wartości różnicy parametru HPL pomiędzy poszczególnymi rozwiązaniami (patrz równanie (2)). Średnia wartość parametru dHPL pomiędzy rozwiązaniem GPS/EGNOS(S120) i GSP/EGNOS(S124) wynosi 0.028 m z odchyleniem standardowym na poziomie 0.471 m. Ponadto rozrzut wyników wynosi od -1.003 m do 3.619 m. Średnia wartość parametru dHPL pomiędzy rozwiązaniem GPS/EGNOS(S120) i GSP/EGNOS(S126) wynosi 1.856 m z odchyleniem standardowym na poziomie 1.619 m. Poza tym rozrzut wyników wynosi od -0.468 m do 8.904 m. Średnia wartość parametru dHPL pomiędzy rozwiązaniem GPS/EGNOS(S124) i GSP/EGNOS(S126) wynosi 1.829 m z odchyleniem standardowym na poziomie 1.523 m. W dodatku rozrzut wyników jest w przedziale od -0.468 m do 8.697 m.



Rys. 4. Różnica wartości parametru HPL

Na podstawie uzyskanych wyników wartości VPL określono również różnicę pomiędzy poszczególnymi rozwiązaniami. Różnicę wartości pomiędzy poszczególnymi rezultatami parametru VPL określono ze wzoru:

$$dVPL = \begin{cases} VPL_{GPS/EGNOS(S120)} - VPL_{GPS/EGNOS(S124)} \\ VPL_{GPS/EGNOS(S120)} - VPL_{GPS/EGNOS(S126)} \\ VPL_{GPS/EGNOS(S124)} - VPL_{GPS/EGNOS(S126)} \end{cases} \quad (3)$$

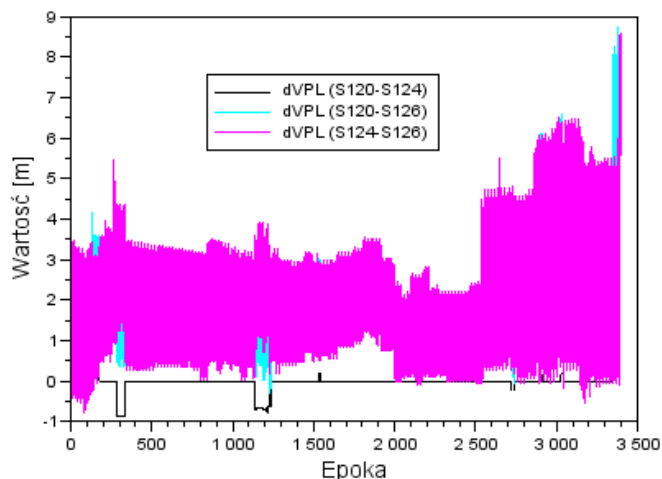
gdzie:

$VPL_{GPS/EGNOS(S120)}$ - wartość VPL z rozwiązania GPS/EGNOS (S120),

$VPL_{GPS/EGNOS(S124)}$ - wartość VPL z rozwiązania GPS/EGNOS (S124),

$VPL_{GPS/EGNOS(S126)}$ - wartość VPL z rozwiązania GPS/EGNOS (S126).

Na Rys. 5 zaprezentowano wartości różnicy parametru VPL pomiędzy poszczególnymi rozwiązaniami (patrz równanie (3)). Średnia wartość parametru dVPL pomiędzy rozwiązaniem GPS/EGNOS(S120) i GSP/EGNOS(S124) wynosi 0.014 m z odchyleniem standardowym na poziomie 0.367 m. Ponadto rozrzut wyników wynosi od -0.869 m do 2.761 m. Średnia wartość parametru dVPL pomiędzy rozwiązaniem GPS/EGNOS(S120) i GSP/EGNOS(S126) wynosi 1.992 m z odchyleniem standardowym na poziomie 1.802 m. Poza tym rozrzut wyników wynosi od -0.813 m do 8.751 m. Średnia wartość parametru dVPL pomiędzy rozwiązaniem GPS/EGNOS(S124) i GSP/EGNOS(S126) wynosi 1.978 m z odchyleniem standardowym na poziomie 1.746 m. W dodatku rozrzut wyników jest w przedziale od -0.813 m do 8.583 m.



Rys. 5. Różnica wartości parametru VPL

4. DYSKUSJA

Celem dyskusji w prezentowanej pracy jest dokonanie porównania uzyskanych wyników HPL i VPL ze standardami technicznymi opracowanymi przez organizację ICAO. W ramach rekomendacji ICAO, parametry HPL i VPL służą ocenie wiarygodności pozycjonowania satelitarnego z użyciem sensora GNSS dla wykonywanych operacji lotniczych. Standardy techniczne opracowane przez ICAO oparte są o stosowanie techniki nawigacji obszarowej RNAV [9]. W Tabeli przedstawiono standardy ICAO dla etapu podejścia samolotu do lądowania z użyciem sensora GNSS [10].

W przypadku nieprecyzyjnego podejścia do lądowania (NPA), graniczna wartość parametru HPL nie może przekraczać 556 m, zaś odpowiednio w płaszczyźnie pionowej parametr VPL nie posiada certyfikacji stosowania. Należy nadmienić, że w procedurze nieprecyzyjnego podejścia do lądowania wykorzystywany jest system ABAS, bazujący na rozwiązaniu nawigacyjnym pozycji z sensorów GPS i GLONASS. W przypadku podejścia SBAS APV-I, graniczna wartość parametru HPL nie może przekraczać 40 m, a dla parametru VPL odpowiednio 50 m. Warto zauważyć, że w procedurze SBAS APV-I kluczową rolę odgrywa system wspomagania SBAS, bazujący na stosowaniu korekt różnicowych od satelitów geostacjonarnych (np. EGNOS lub WAAS). W przypadku podejścia SBAS APV-II, graniczna wartość parametru HPL nie może przekraczać 40

m, a dla parametru VPL wartość tolerancji jest ograniczona do 20 m. W procedurze SBAS APV-II jest stosowany również system wspomagania SBAS lub zewnętrzny sensor do określenia wysokości lotu statku powietrznego (np. wysokościomierz baryczny). W przypadku podejścia PA (kat. I), graniczna wartość parametru HPL nie może przekraczać 40 m, a dla parametru VPL wynosi odpowiednio do 15 m. Trzeba dodać, że w procedurze PA (kat. I) jest wykorzystywany system wspomagania GBAS, który umożliwia określenie pozycji statku powietrznego z użyciem technik różnicowych dla sieci stacji referencyjnych.

Tab. 1. Standardy wiarygodności pozycjonowania z użyciem sensora GNSS wg ICAO [10]

Typ podejścia do lądowania	Wiarygodność pozycjonowania satelitarnego GNSS	
	Parametr HPL	Parametr VPL
Podejście nieprecyzyjne NPA	556	Usługa niedostępna
Podejście SBAS APV-I	40	50
Podejście SBAS APV-II	40	20
Podejście precyzyjne PA (kategorii I)	40	15

Na bazie przeprowadzonych eksperymentów badawczych możliwe jest porównanie wartości uzyskanych wyników parametrów HPL i VPL ze standardami technicznymi ICAO. Wyznaczone w pracy wartości parametru HPL z rozwiązania GPS/EGNOS (S120), GPS/EGNOS (S124), GPS/EGNOS (S126) nie przekraczają 15 m. W związku z tym wartości parametru HPL spełniają standardy wiarygodności pozycjonowania satelitarnego dla podejścia NPA, APV-I, APV-II oraz PA (kat. I). Ponadto uzyskane wartości HPL stanowią cenne źródło informacji w aspekcie monitoringu i funkcjonowania systemu wspomagania SBAS. Z kolei wyznaczone w pracy wartości parametru VPL z rozwiązania GPS/EGNOS (S120), GPS/EGNOS (S124), GPS/EGNOS (S126) nie przekraczają 14 m. Należy podkreślić, że wyznaczone wartości parametru VPL spełniają standardy wiarygodności pozycjonowania satelitarnego dla podejścia APV-I, APV-II oraz PA (kat. I). Wartości parametru VPL umożliwiają ocenę wiarygodności dla prowadzenia nawigacji w płaszczyźnie pionowej oraz pozwalają na określenie poziomów bezpieczeństwa dla zabezpieczenia nawigacyjnego podczas wykonywanych operacji lotniczych. Uzyskane w pracy wyniki HPL i VPL są bardzo ważne również z punktu widzenia działania systemu SBAS we wschodniej Polsce.

PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono możliwość wyznaczenia parametrów HPL i VPL z zastosowaniem systemu wspomagania SBAS dla pojedynczej stacji referencyjnej GNSS. Eksperyment badawczy został przeprowadzony dla stacji referencyjnej REF1, zainstalowanej w pobliżu lotniska wojskowego w Dęblinie. Parametry HPL i VPL zostały wyznaczone na podstawie metody pozycjonowania Single Point Positioning z użyciem obserwacji GPS oraz korekt różnicowych od satelitów systemu EGNOS (S120, S124 i S126). Na podstawie uzyskanych wyników badań określono, że wartości parametru HPL nie przekraczają 15 m, zaś dla parametru VPL są mniejsze niż 14 m. Wartości parametrów HPL i VPL są najmniejsze dla rozwiązania GPS/EGNOS (S126), ale parametr RMS jest większy niż dla rozwiązania GPS/EGNOS(S120) i GPS/EGNOS (S124). W pracy ponadto dokonano porównania uzyskanych wyników parametrów HPL i VPL ze standardami technicznymi ICAO, dotyczącymi etapu podejścia samolotu do lądowania z użyciem sensora GNSS. Wartości parametru HPL spełniają standardy wiarygodności pozycjonowania satelitarnego dla podejścia NPA, APV-I, APV-II oraz PA (kat. I). Poza tym wartości parametru VPL spełniają standardy

wiarygodności pozycjonowania satelitarnego dla podejścia APV-I, APV-II oraz PA (kat. I). Wyznaczone w pracy parametry HPL i VPL pozwalają na ciągłe monitorowanie poziomu wiarygodności pozycjonowania satelitarnego dla lotniska wojskowego w Dęblinie oraz umożliwiają określenie poziomów bezpieczeństwa technicznego dla prowadzenia nawigacji w płaszczyźnie poziomej i pionowej.

BIBLIOGRAFIA

1. Jaferník H., Krasuski K., Michta J., *Assessment of suitability of radionavigation devices used in air*, „Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport”, 2016, 90, pp. 99-112. ISSN: 0209-3324. DOI: 10.20858/sjsutst.2016.90.9.
2. Nowak A., *Nowa metoda oceny dokładności wyznaczeń GNSS na potrzeby monitoringu pojazdów*, „Logistyka”, nr 3, str. 4706-4717, 2014.
3. Krzykowska K., Siergiejczyk M., *Signal monitoring as a part of maintenance of navigation support system in civil aviation*, „Archives of Transport System Telematics”, vol. 7, issue 1, 2014, pp. 36-40.
4. Grunwald G., Bakula M., Ciećko A., Kaźmierczak R., Grzegorzewski M., Ćwiklak J., *Wiarygodność pozycjonowania satelitarnego w transporcie lotniczym*, „Logistyka”, nr 3, str. 2231-2238, 2014.
5. Ciećko A., Grzegorzewski M., Ćwiklak J., Oszczak S., Grunwald G., Baber K., *Wykorzystanie systemów satelitarnych w bezpiecznej nawigacji powietrznej*, „Logistyka”, nr 3, str. 744-750, 2015.
6. Ciećko A., Grunwald G., Kaźmierczak R., Tanajewski D., Bakula M., Oszczak S., Zazula M., *Stacja referencyjna GNSS – EGNOS w procesie wdrażania procedur lądowania z wykorzystaniem technologii satelitarnej*, „Logistyka”, nr 6, str. 2774-2781, 2014.
7. Kaźmierczak R., Bakula M., Ciećko A., Grunwald G., *Analiza jakości sygnałów satelitarnych w nawigacji i transporcie lotniczym*, „Logistyka”, nr 3, str. 2832-2838, 2014.
8. Takasu T., *RTKLIB ver. 2.4.2 Manual, RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning*, Available at: http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf, pp. 34-49 2013.
9. Fellner A., Fellner R., Piechoczek E., *Pre-flight validation RNAV GNSS approach procedures for EPKT in “EGNOS APV Mielec project”*, „Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport”, 2016, 90, pp. 37-46. ISSN: 0209-3324. DOI: 10.20858/sjsutst.2016.90.4.
10. International Civil Aviation Organization: *ICAO standards and recommended practices (SARPS), Annex 10 volume I (Radio navigation aids)*, 2006. Dokument dostępny na stronie internetowej: <http://www.ulc.gov.pl/pl/prawo/prawo-mi%C4%99dzynarodowe/206-konwencje>, wersja aktualna na: 26 grudnia 2016.

Designation the HPL and VPL parameters using SBAS augmentation system in air transport

This paper presents results of research concerning to determination HPL and VPL protection levels for GBAS system in air transport. The HPL and VPL parameters were designated for REF1 reference station based on GPS/SBAS solution. The computations were executed for Single Point Positioning method in static mode. In paper, the values of HPL and VPL parameters were compared with technical standards of ICAO.

Autorzy:

mgr inż. **Kamil Krasuski** – Wydział Geodezji, Kartografii i Katastru Nieruchomości, Starostwo Powiatowe Ryki, e-mail: kk_deblin@wp.pl
dr inż. **Henryk Jaferník** – Wydział Transportu, Politechnika Śląska, Katowice, e-mail: henryk.jaferník@polsl.pl