

SPECHT Cezary

DOSTĘPNOŚĆ SYSTEMÓW NAWIGACYJNYCH – PODSTAWY TEORETYCZNE

Streszczenie

Pojęcie dostępności stosowane jest w polskiej literaturze nawigacyjnej od początku lat 90-tych ubiegłego wieku. Pomimo, iż jej definicja znana jest w teorii niezawodności pod terminem gotowość, do dnia dzisiejszego określenie dostępność stosowane jest wciąż w niezmiennym postaci w nawigacji. Pomimo upływu wielu lat polska literatura nawigacyjna nie wypracowała spójnej metodyki wyznaczania tego jakże istotnego kryterium porównawczego systemów służącego procesowi nawigacji obiektów morskich, lotniczych i lądowych. Ten sam wniosek można odnieść do literatury światowej, gdzie wciąż pojawiają się odmienne interpretacje tego samego pojęcia.

W artykule podjęto próbę systematyki zagadnień teoretycznych związanych z pojęciem dostępność, zaprezentowano elementy wpływające na jej wartość oraz aparat matematyczny umożliwiający jej obliczanie.

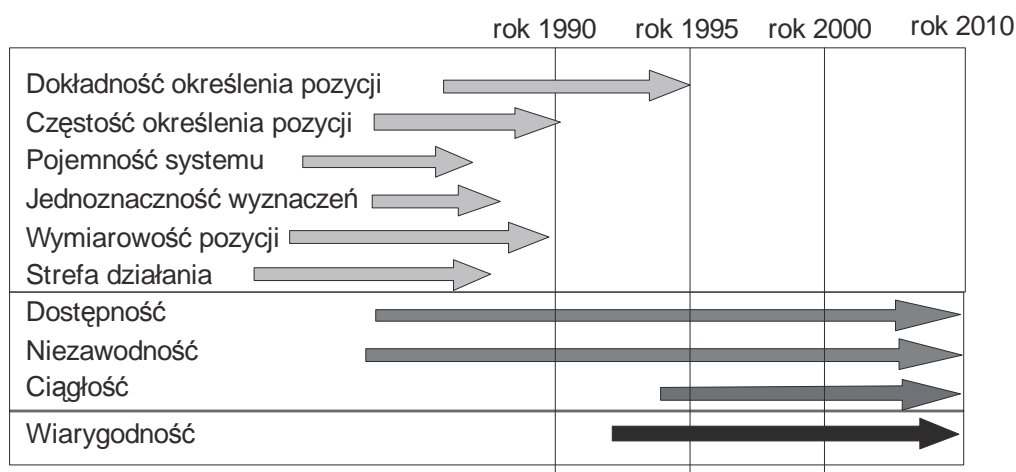
WSTĘP

Wymagania formalne dla procesu nawigacji obiektów są każdorazowo określane w oparciu o możliwości zapewnienia serwisu oraz realizacji zadania nawigacyjnego przez użytkownika. Ich określenie leży w kompetencjach agencji światowych, rządowych i resortowych. Proces określania minimalnych wymagań serwisów pozycyjnych jest procesem ciągłym stąd podczas ich definiowania bierze się pod uwagę [4]:

- akceptowalny poziom ryzyka nawigacyjnego użytkownika, przy uwzględnieniu możliwości zapewnienia serwisu przez jego dostawcę,
- aspekt ekonomiczny opłacalności dostawcy serwisu radionawigacyjnego umożliwiający efektywne finansowo przesyłanie sygnału oraz utrzymania infrastruktury systemu,
- całkowity koszt przedsięwzięcia (rozwinienia i pracy systemu) z punktu widzenia instytucji państwowej lub dostawcy komercyjnego uwzględniający możliwości budżetowego finansowania i utrzymania serwisów.

Ocena parametryczna systemów nawigacyjnych stanowi w ostatnim dziesięcioleciu zasadniczą metodę ich klasyfikacji jakościowej. Obejmuje ona ustaloną przestrzeń kryterialną, która jest w bezpośrednim związku z wymaganiami nawigacyjnymi stawianymi różnorodnym jej formom. Kryteria porównawcze systemów nawigacyjnych prezentowane powszechnie w literaturze światowej [4, 6, 7, 10, 15] i polskiej [1, 5, 12, 13] ulegają na przestrzeni lat przewartościowaniu wraz z rozwojem technologicznym oraz potrzebami procesu nawigacji, przy jednoczesnej zmianie rang poszczególnych z nich. Analiza kryteriów pozwala wyodrębnić wśród nich 3 grupy, które odpowiadają poszczególnym fazom rozwoju systemów pozycjonowania na przestrzeni lat (rys. 1), a są nimi:

- **kryteria pozycyjne** – charakteryzujące system w zakresie jakości określenia pozycji. Obejmują one 3 miary dokładności określenia pozycji (odtwórczą, powtarzalną, względną), strefę działania oraz częstotliwość, jednoznaczność i wymiarowość wyznaczeń.
- **kryteria niezawodnościowe** – stanowią odrębną grupę wskaźników odnosząc się do niezawodnościowych charakterystyk eksploatacyjnych systemów. Należą do nich niezawodność, dostępność i ciągłość.
- **kryteria bezpieczeństwa eksploatacji** – związane z zapewnieniem użytkownikowi bieżącej informacji o jakości (stanie) pracy systemu zapewniając w ten sposób odpowiedni poziom ich użytkowania. Jedynym, jak na razie, z tej grupy kryterium jest wiarygodność (ang.: integrity) charakteryzowana przez całą gamę zmiennych takich jak czas do alarmu, prawdopodobieństwo fałszywego alarmu i in.



Rys. 1. Kryteria porównawcze systemów nawigacyjnych i ich rola na przestrzeni ostatnich lat [14]

Obserwując tendencje zmian istotności kryteriów porównawczych systemów nie sposób nie dostrzec ich bezpośredniego związku z kolejnymi fazami ewolucji satelitarnych systemów pozycjonowania (GPS, Glonass), które zdominowały współczesną nawigację. Pierwsza z rozważanych grup – kryteria pozycyjne – stanowiły do początku lat 90-tych główne charakterystyki eksploatacyjne [12]. Działające ongiś systemy charakteryzowała relatywnie niska dokładność jak i częstotliwość wyznaczeń (Omega, Loran, Decca, Transit) oraz niejednokrotnie pozbawione były jednoznaczności pomiarów (Loran C, Decca). Stąd też kryteria pozycyjne były zasadniczymi, jak nie w większości wypadków jedynymi, charakterystykami takich systemów. Od drugiej połowy lat 90-tych, gdy system GPS został ogłoszony w pełni operacyjnym zapewniając tym spełnienie praktycznie wszystkich wymagań nawigacyjnych użytkowników w zakresie dokładności wyznaczeń, problematyka badawcza związana z kryteriami pozycyjnymi została powiązana z grupę kryteriów o niezawodnościowej genezie. Początkowo dostępność i niezawodność [9], a potem ciągłość [14] określane w stosunku do różnych struktur funkcjonalnych systemów umożliwiły ocenę zdolności systemu do bezawaryjnej pracy, a tym samym dały możliwość odniesienia ich charakterystyk do czynników efektywnościowo-ekonomicznych.

Trzecia z grup, związana z bezpieczeństwem użytkowania systemów, jawi się jako wyjątkowo dynamicznie rozwijająca się problematyka badawcza początku XXI wieku w nawigacji. Bez wątpliwości wiarygodność można porównać do bieżącej diagnostyki funkcjonalnej, która wydaje się być synonimem nowoczesności we wszystkich współczesnych dziedzinach techniki.

1. DOSTĘPNOŚĆ – Dyskusja terminologiczna

Analiza postrzegania terminu dostępność w piśmiennictwie nawigacyjnym prowadzi do wniosku, iż można wyróżnić w niej dwa wyraźnie rozgraniczające się okresy czasowe. Pierwszy z nich sięga końca lat osiemdziesiątych, gdzie głównymi kryteriami oceny systemów były ich parametry dokładnościowe. Natomiast drugi, rozpoczynający się na początku lat dziewięćdziesiątych i związany jest z wielokryterialnym opisem oraz oceną systemów nawigacyjnych. Do końca lat osiemdziesiątych termin dostępność występuje w nawigacji zasadniczo jako wskaźnik oceny stanu technicznego urządzeń zarówno w piśmiennictwie wschodnim jak i zachodnim. W najobszerniejszym opracowaniu [8] będącym rekomendacją dotyczącą niezawodności i dostępności systemów oznakowania nawigacyjnego odnotowujemy że: dostępność – rozumiana jest jako prawdopodobieństwo tego, że znak nawigacyjny lub system oznakowania nawigacyjnego wypełnia wymagane funkcje w określonych warunkach w dowolnym momencie czasu. Dostępność, zdaniem autorów rekomendacji była kryterium oceny systemu umożliwiającym ustalenie na ile spełnia on stawiane przed nim funkcje. Dzięki takiemu rozumieniu terminu wyodrębniono kategorie systemów z punktu widzenia dostępności, których ocenę przeprowadza się w oparciu o zależności określone na podstawie odpowiednio licznej próby pomiarowej. W stosunku do pojedynczych urządzeń technicznych lub ich grup metoda wyznaczania tego wskaźnika jest oczywista, jednakże w stosunku do systemów nawigacyjnych, w których istnieje silne oddziaływanie czynników środowiskowych brak jest jednolitej spójnej metodyki.

Nie sposób nie wiązać pojęcia dostępności systemu nawigacyjnego z jego niezawodnością. Niezawodność [8] – jest to zdolność znaku nawigacyjnego lub systemu oznakowania nawigacyjnego do wypełniania wymaganych funkcji w określonych warunkach przez wyznaczony przedział czasu. Szereg kolejnych dokumentów o charakterze normatywnym powieliło przytoczoną tu rekomendację. Charakterystyczne dla tego okresu sprzętowe podejście do kryterium niezawodnościowego sprawiło, że jedynym parametrem charakteryzującym je był Średni Czas Pomiedzy Uszkodzeniami MTBF (ang.: Mean Time Between Failure). Proponowana metodyka obliczania niezawodności opierała się o szereg przykładowych oszacowań wartości MTBF urządzeń nawigacyjnych zestawianych w niezawodnościowe struktury szeregowe i równoległe. Należy tu odnotować, że mimo zawężenia terminu niezawodność do pojedynczego wskaźnika - MTBF, dokument ten zawiera również zależności odniesione do funkcji niezawodności oraz wskaźnika intensywności uszkodzeń.

Początek lat dziewięćdziesiątych w nawigacji morskiej to okres dominacji satelitarnych systemów nawigacyjnych w zakresie pozycjonowania. Wraz z ich wdrożeniem pojawiło się szereg dokumentów określających ich charakterystyki eksploatacyjne. Podyktowane było to koniecznością dostarczenia użytkownikom systemów kompleksowej informacji o właściwościach systemów. Zaproponowana w [11] przestrzeń kryterialna obejmująca zarówno charakterystyki pozycyjne (dokładność, jednoznaczność wyznaczeń, częstość wyznaczeń) oraz eksploatacyjne (strefę działania niezawodność, dostępność, wiarygodność) stała się pierwowzorem oceny wielokryterialnej systemów. Z punktu widzenia prowadzonej analizy najbardziej interesującym materiałem porównawczy jawi się być dokument: „Globalny System Pozycyjny (GPS) Standardowy Serwis Pozycyjny, Specyfikacja Sygnału” [2] będący udostępnionymi środowisku cywilnemu charakterystykami eksploatacyjnymi systemu GPS. Na przestrzeni lat podlegał on modyfikacjom aby przyjąć w 2001 roku, po wyłączeniu Selekttywnej Dostępności, kolejną formę [3]. W celach porównawczych zestawmy definicje dostępności serwisu GPS z obu wspomnianych źródeł:

- **Dostępność serwisu GPS** [2] - procent czasu w stosunku do zadanego jego interwału, takiego, że wystarczająca liczba satelitów dla określenia pozycji transmituje użyteczne sygnały odległościowe dla dowolnego punktu na lub nad Ziemią.

- **Dostępność serwisu GPS** [3] - procent czasu w stosunku do interwałów 24-godzinnych takiego, że przewidywany błąd określenia pozycji ($p=0.95$) jest mniejszy niż założony, dla dowolnej lokalizacji w strefie działania systemu.

Zestawienie powyższych definicji prowadzi do wniosku, iż uległy one w niespełna 7 lat znacznej zmianie. W definicji z 1993 roku dostępność związana jest jedynie z użytecznością sygnałów radiowych docierających do użytkownika, natomiast nowe uściślenie tego terminu odnosi go do błędu nawigacyjnego rozwiązania pozycji. Doszukując się przyczyny zmiany znaczenia obu tych terminów zauważyć należy, że sama istota obu definicji – prawdopodobieństwo lub stosunek czasów funkcjonowania do całkowitego będący w istocie miarą prawdopodobieństwa nie uległy zmianie. Jednakże definicja warunków, które przyjmuje się za spełnione, aby uznać system za funkcjonujący poprawnie uległa istotnej zmianie. Analogiczne spostrzeżenia dokonamy analizując wiele z dokumentów normatywnych odnoszących się do nawigacji satelitarnej gdzie definiowane są inne formy dostępności takie jak dostępność: transmisji, sygnału oraz użytkownika czy dostępności: współczynnika PDOP oraz horyzontalnej i wertykalnej serwisu [3].

2. WYZNACZANIE DOSTĘPNOŚCI

Dla określania dostępności systemu muszą być zdefiniowane pewne parametry określające charakterystykę niezawodnościową pracy systemu oraz funkcjonowanie jego obsługi technicznej Parametrami tymi są [8, 9]:

- **Dostępność** – (ang.: Availability – *A*) będąca prawdopodobieństwem tego że urządzenie lub system nawigacyjny spełnia założone funkcje w dowolnym momencie czasu.
- **Niezawodność** (ang.: Reliability – *R*) będąca prawdopodobieństwem tego że urządzenie lub system nawigacyjny spełnia założone funkcje bez uszkodzeń w określonym przedziale czasu. Parametr ten odnosi się zasadniczo do urządzeń wchodzących w skład systemów nawigacyjnych.
- **Ciągłość** (ang.: Continuity – *C*) będąca prawdopodobieństwem tego że urządzenie lub system nawigacyjny spełnia założone funkcje bez uszkodzeń w określonym przedziale czasu. Parametr ten odnosi się zasadniczo do systemów radionawigacyjnych.
- **Średni czas między uszkodzeniami** (ang.: Mean Time Between Failure - *MTBF*) – jest to wartość oczekiwana czasu między kolejnymi uszkodzeniami elementów systemu powodujących utratę przez niego zdolności do realizacji funkcji, do których został stworzony.
- **Średni czas do naprawy** (ang.: Mean Time To Repair - *MTTR*) – jest to wartość oczekiwana czasu, jaki upływa od chwili wystąpienia uszkodzenia systemu do chwili, w której jest on ponownie zdolny do realizacji swoich funkcji.
- **Niedostępność systemu** (ang. : Unavailability System - *US*) – prawdopodobieństwo niedostępności systemu określa się przez czas potrzebny do naprawy jego uszkodzonych *n* elementów.

Nie sposób w tym miejscu odnieść się krytycznie do prezentowanych definicji niezawodności i ciągłości. Należy zauważyć, iż obie definicje są identyczne a rozgraniczenie ich stosowanie zawarte w rekomendacjach IALA należy uznać za sztuczne.

Zmiana stanu pracy systemu na niezdatny (awaria) związana jest z podjęciem działań przez operatora celem usunięcia niesprawności z wykorzystaniem serwisu technicznego. Należy założyć, że na wydłużanie się czasu naprawy wpływają wszystkie opóźnienia cząstkowe związane ze stwierdzeniem uszkodzenia, poinformowaniem serwisu, czasem przygotowania naprawy, dojazdu oraz naprawy na miejscu. Wymienione elementy wpływają na oszacowanie

średniego czasu do naprawy *MTTR*. W rekomendacji IALA [8] wspomnianymi elementami są:

- **Średni czas na zgłoszenie awarii** (ang.: Mean Time To Report - *MTTRP*) – jest to wartość oczekiwana czasu w jakim operator serwisu nawigacyjnego zostanie powiadomiony o awarii. Czas ten jest uzależniony od rodzaju systemu, a głównie od tego, czy informacja o uszkodzeniu jest zgłaszana w sposób automatyczny (system z automatycznym monitorowaniem stanu elementów) czy za pośrednictwem operatora, który stwierdził awarię na miejscu.
- **Średni czas reakcji na awarię** (ang.: Failure Response Time - *MFRT*) – jest to wartość oczekiwana czasu w jakim serwis zobowiązany do rozpoczęcia procesu organizacyjnego zmierzający do jej usunięcia. *MFRT* zależy przede wszystkim od zdolności organizacyjnych serwisu oraz od stopnia złożoności awarii.
- **Średni czas przygotowania do naprawy** (ang.: Mean Time To Prepare - *MTTP*) – jest to wartość oczekiwana czasu na zapoznanie się serwisanta z budową systemu, pobranie lub sprowadzenie odpowiedniego sprzętu i części zamiennych.
- **Średni czas dojazdu** (ang.: Mean Time To Transport - *MTTT*) – jest to wartość oczekiwana czasu przewidzianego na dojazd do miejsca awarii. Zależy przede wszystkim od rozmieszczenia w terenie uszkodzonych elementów.
- **Średni czas naprawy na miejscu** (ang.: Mean Time To Repair on Site - *MTTRoS*) – jest to wartość oczekiwana czasu na wykonanie naprawy na miejscu.

Wspomniane powyżej definicje łączy z wartością *MTTR* zależność:

$$MTTR = MTTRP + MFRT + MTTT + MTTP + MTTRoS \quad (1)$$

Podstawową metoda określenia dostępności jest skorzystanie z poniższego wzoru:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2)$$

Innym sposobem obliczania dostępności jest podzielenie całkowitego czasu niepoprawnego działania (ang.: *UP Time*), przez całkowity czas działania (ang.: *Mission Time*) zgodnie z zależnością

$$A = \frac{UP\ Time}{Mission\ Time} \quad (3)$$

Jako przykład rozważmy system nawigacyjny który działał przez 1000 dni i w ciągu tego czasu przez 2 dni działał niepoprawnie. Stąd otrzymamy wartości *UP Time* = 1000 – 2 = 998 dni i *Mission Time* = 2 dni. Podstawiając powyższe wartości do wzoru (3) otrzymamy

$$A = \frac{UP\ Time}{Mission\ Time} = \frac{998}{1000} = 0.998 \quad (4)$$

lub wyrażając procentowo uzyskujemy 99.8%.

Jako kolejny przykład rozważmy system nawigacyjny który działał przez 499 dni, a przez 1 dzień był uszkodzony. Stąd otrzymamy wartości $MTBF = 499$ dni i $MTTR = 1$ dzień. Podstawiając powyższe wartości do wzoru (1) otrzymamy

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{499}{499 + 1} = 0.998 \quad (5)$$

lub wyrażając procentowo otrzymamy 99.8%.

Istotnym elementem dla systemów nawigacyjnych jest obliczanie średniego czasu reakcji na awarię $MTTR$, przy założonym poziomie dostępności. Na podstawie tego wyliczenia operator systemu nawigacyjnego winien ustalić czas w którym uszkodzenie powinno zostać usunięte przy zachowaniu wymagań stawianych systemowi nawigacyjnemu w zakresie dostępności. Dla jego określenia z równania (1) wyznaczmy $MTTR$

$$A(MTBF + MTTR) = MTBF, \quad (6)$$

wtedy

$$A \cdot MTBF + A \cdot MTTR = MTBF, \quad (7)$$

stąd

$$A \cdot MTTR = MTBF - A \cdot MTBF, \quad (8)$$

aby w postaci końcowej uzyskać:

$$MTTR = \frac{MTBF - A \cdot MTBF}{A}. \quad (9)$$

Ostatecznie, $MTTR$ można wyrazić za pomocą wzoru

$$MTTR = \frac{MTBF(1 - A)}{A}. \quad (10)$$

Niejednokrotnie istnieje konieczność wyznaczenie jednej z wielkości czasów będących częścią składową wielkości $MTTR$. Rozważmy przykład, w którym należy oszacować średni czas reakcji na awarię $MFRT$, dla którego zdefiniowano określony poziom dostępności. Nadmienmy, że czas $MFRT$ związany jest zasadniczo ze sprawnością organizacyjną służby oznakowania nawigacyjnego odpowiedzialnej za utrzymanie systemu nawigacyjnego. Dostawcy serwisów winni tak organizować system powiadamiania o uszkodzeniach i reakcji na nie, aby możliwym było utrzymanie ustalonych poziomów dostępności. Wielkości pozostałych zmiennych zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry pracy systemu – przykład [9]

Parametr		Wartość
Dostępność	A	0.998
Średni pomiędzy uszkodzeniami	MTBF	14000 h
Średni czas na zgłoszenie awarii	MTTRP	5 h
Średni czas przygotowania do naprawy	MTTP	4 h
Średni czas dojazdu	MTTT	11 h
Średni czas naprawy na miejscu	MTTRoS	2 h

Wyznaczmy $MFRT$ ze wzoru (1):

$$MFRT = MTTR - (MTTRP + MTTP + MTTT + MTTRoS). \quad (11)$$

Podstawmy zależność (10) w miejsce $MTTR$, stąd

$$MFRT = \frac{MTBF(1-A)}{A} - (MTTRP + MTTP + MTTT + MTTRoS), \quad (12)$$

a wtedy:

$$MFRT = \frac{14000h(1-0.998)}{0.998} - (5h + 4h + 11h + 2h) = 28h - 22h = 6h.$$

Dla przyjętych wartości $MTBF$ i określonych tabelarycznie czasów, średni czas reakcji na awarię $MFRT$ równy 6 godzin, pozwalałby na utrzymanie wymaganej dostępności na poziomie $A = 99.8\%$.

PODSUMOWANIE

Dostępność jest dziś głównym parametrem oceny systemów nawigacyjnych zapewniając użytkownikom o możliwości jego wykorzystania w dowolnym momencie czasu. W artykule zaprezentowano definicję pojęcia dostępność w odniesieniu do systemów nawigacyjnych. Zaprezentowano ewolucję terminologiczną tego terminu na przestrzeni lat oraz wskazano na istotne elementy eksploatacji systemu, decydujące o wartości dostępności.

Zaprezentowane podejście do wyznaczenia wartości dostępności systemu nawigacyjnego wraz z przykładami umożliwia w stosunkowo prosty sposób jego ocenę jednakże posiada szereg ograniczeń, z których zasadniczymi są: przyjęcie wykładniczego rozkładu czasów pracy i awarii oraz trudności w ustaleniu wartości $MTBF$ poszczególnych elementów wchodzących w jego skład.

BIBLIOGRAFIA

1. Banaszek K., *Analiza metod SIS i koncepcja ich wykorzystania podczas podejścia do lądowania według GNSS*. Konferencja GIS, GPS i technika lotnicza w praktyce GIS, Chełm, 15 luty.2005.
2. Department of Defense United States Of America, *Global Positioning System Standard Positioning Service Signal Specification*. November 1993.
3. Department of Defense United States Of America, *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard*. October 2001,
4. Department of Defense, Department Of Homeland Security, Department Of Transportation, *Federal Radionavigation Plan*. Springfield, Virginia 2010,
5. Fellner A., *Koncepcja polskiego radionawigacyjnego planu w ramach European Radionavigation Plan*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, z. 51[168], t. 2, Rzeszów 1998.
6. General Lighthouse Authorities, *Radio Navigation Plan*. The United Kingdom and Republic of Ireland, January 2007.
7. Helios Technology Ltd, *European Radio Navigation Services. Development of the European Union Navigation Plan*. October 2004.
8. International Association Of Marine Aids To Navigation And Lighthouse Authorities, *Guide to the Availability and Reliability of Aids to Navigation*. 1989.
9. International Association Of Marine Aids To Navigation And Lighthouse Authorities, *Guide to the Availability and Reliability of Aids to Navigation - Theory and Examples*. December 2004.

10. International Association Of Marine Aids To Navigation And Lighthouse Authorities, *World Wide Radio Navigation Plan, Edition 1*. Saint Germain en Laye, France 2009.
11. International Association Of Marine Aids To Navigation And Lighthouse Authorities *Aids to Navigation Guide*. February 1990.
12. Kopacz Z., Dziewicki M., Fic Z., Specht C., *Kryteria wyboru stacji referencyjnych DGPS dla wybrzeża polskiego*. Raport końcowy projektu badawczego, Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni 1994.
13. Kopacz Z., Specht C., *DGPS w ostonie transportu do portów Zatoki Gdańskiej, Seminarium Naukowe „Światowy Dzień Morza”*. Gdańsk 1996, s. 85–103.
14. Specht C, *Availability Reliability and Continuity Model of Differential GPS Transmission*. Annual of Navigation no 5/2003, Gdynia 2003.
15. Swedish Maritime Administration, *Swedish Radio Navigation Plan, Policy and Plans*. 2009.

AVAILABILITY OF THE NAVIGATION SYSTEMS – FUNDAMENTALS OF THE THEORY

Abstract

The term - availability is used in Polish navigation literature since the early 90's of last century. Although its definition is known in the reliability theorem as a - readiness, to this day the term availability is still in use. Despite the passage of many years of Polish literature has not developed a uniform navigation methodology to determine this very important criterion for the comparative process systems for maritime, air and land navigation. The same conclusion can be applied to world literature, where there are still different interpretations of the same concept.

This article attempts systematic theoretical issues related to the concept of availability, presents the elements that affect the value and mathematical apparatus that allows the calculation.

Autorzy:

prof. dr hab. inż. **Cezary Specht** – Akademia Morska w Gdyni, c.specht@geodezja.pl