

Ryszard WITKOWSKI
Polskie Linie Lotnicze LOT S.A.

DOKĄD ZMIERZASZ CZARNA SKRZYNKO?

W tym nieco intrygującym pytaniu kryje się próba określenia trendów rozwojowych tzw. czarnych skrzynek, czyli rejestratorów parametrów lotu. Choć w tytułowym pojęciu mieszczą się również rejestratory rozmów oraz w ostatnim czasie zewnętrzne i wewnętrzne rejestratory video, to z pewnością większe zainteresowanie awioników wzbudzają rejestratory parametrów lotu. Podlegają one różnorodnym przemianom. Rejestratory zwiększają swoje możliwości: zapisują dłuższy okres lotu, większą liczbę parametrów i robią to precyzyjniej. Na ile proces ten jest wynikiem postępu technologicznego? Jaki wpływ na wprowadzane zmiany mają zaistniałe wypadki w lotnictwie, a jaki grupy specjalistów opracowujących nowe przepisy? Jakże słabe punkty rejestratorów uwidoczniły ostatnie katastrofy lotnicze i jak temu zaradzić w przyszłości? Czy czarne skrzynki będą musiały „nauczyć się” nowych funkcji, aby mogły spełniać do końca swoją rolę? Wokół najnowszej historii rejestratorów pojawia się znacznie więcej trudnych pytań niż łatwych odpowiedzi, co próbuje przedstawić niniejszy artykuł.

Trudne początki

Historia rejestracji parametrów lotu jest starsza od pierwszych samolotów, gdyż pomiarów dokonywano już na pokładach dziewiętnastowiecznych balonów. Z ówczesnych manometrów i termometrów spisywano dostępne wielkości fizyczne głównie do celów meteorologicznych. Późniejsze barografy i tachografy wyeliminowały potrzebę udziału człowieka w ciągłej obserwacji i ręcznej rejestracji niektórych parametrów w wyniku ich automatyzacji. Nieodparcie pojawiła się myśl, aby ekstrapolować ideę tę na zapis większej ilości parametrów, także innych niż atmosferyczne. Powstanie pierwszych rejestratorów lotu zbiegło się z wybuchem II wojny światowej, a operacje lotnictwa wojskowego były dramatycznym poligonem doświadczalnym, gdzie testowano prototypowe, niezbyt doskonałe rozwiązania.

Pierwsze komercyjne rejestratory parametrów lotu w transporcie lotniczym pojawiły się w latach 50. i były to niezbyt skomplikowane urządzenia, rejestrujące jedynie 5 podstawowych parametrów lotu. Początkowo przepisy nakazywały, aby rejestracji podlegały wysokość barometryczna, kurs magnetyczny, prędkość przyrządowa, przeciążenie normalne i aby na zapisie naniesiona była skala czasowa. Wyposażono w nie pierwsze amerykańskie odrzutowe samoloty pasa-

żerskie, choć niewątpliwą i bezpośrednią przyczyną ich zastosowania były katastrofy brytyjskich samolotów Comet. W pierwszych czarnych skrzynkach stosowano m.in. zapis lotu na taśmie filmowej, a przekształcenia parametrów odbywały się w procesie sterowania promienia świetlnego przez układ lusterek przekazujących sygnał z przetworników elektrycznych. Prawdopodobnie termin „czarna skrzynka” pochodzi od rozwiązania sprzętowego tego typu, gdyż konieczne było zapewnienie w nim całkowitej szczelności, tak jak w korpusie tradycyjnego aparatu fotograficznego. Istniały także rozwiązania oparte na taśmie metalowej lub drucie wolframowym oraz na rysowaniu rysikiem na taśmie celulooidowej lub papierowej. Pięcioparametrowe rejestratory były bardzo długo eksploatowane. Jednak kilka wypadków samolotów wyposażonych w rejestratory tego typu, szczególnie starszych modeli Boeingów B737, unaocniły ich bezużyteczność w analizie wypadków lotniczych, w związku z czym zostały wycofane.

Drugą generacją rejestratorów były urządzenia zapisujące parametry lotu na taśmie magnetycznej (rys. 1.). Zapis większej liczby parametrów możliwy był poprzez skonstruowanie jednostek towarzyszących rejestratorom, które zbierały dane z różnych źródeł i organizowały w ramki możliwe do zapisu. Były to tzw. szyfratory lub FDAU (*Flight Data Acquisition Unit*).

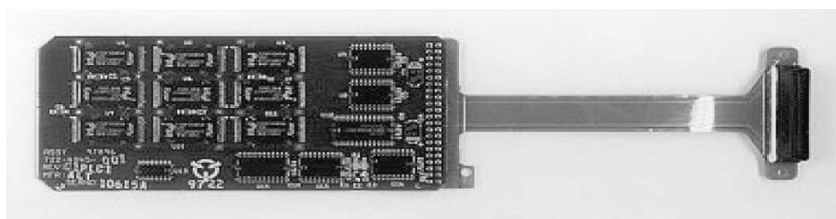


Rys. 1. Wnętrze magnetycznej czarnej skrzynki

Zadaniem szyfratora jest zbieranie sygnałów wejściowych o różnym charakterze (analogowe, cyfrowe), częstotliwości ich generowania czy amplitudzie. Kolejnym krokiem jest tworzenie ramki danych, najczęściej o wielokrotności 64 słów 12-bitowych na sekundę (64, 128, 256 w/s itd.), a następnie wysłanie do układu zapisującego w rejestratorze. Rozwiązanie takie stosowane jest od lat 60. do dziś, choć wskazuje się na konieczność ustalenia daty wycofania rejestratorów taśmowych.

Trzecią generacją są rejestratory typu SSFDR (*Solid State Flight Data Recorder*). Ich rozwój datuje się od końca lat 80. XX w., kiedy to powstał pierwszy model rejestratora tego typu. Innowacja polega na wyeliminowaniu taśmy ma-

gnetycznej, a zapis parametrów odbywa się w pamięci półprzewodnikowej (rys. 2.). Korzyścią dla operatorów jest niższy koszt eksploatacji rejestratorów, ze względu na brak konieczności przeglądów i wymiany taśmy magnetycznej. Dużo szybszy i prostszy jest także proces odczytu danych. Wprawdzie pod względem ogólnej idei zespół szyfrator-rejestrator (FDAMU-SSFDR) działa podobnie jak w przypadku rejestratorów taśmowych, jednak powszechnie wykorzystywana technologia cyfrowa umożliwia dodawanie nowych funkcji, np. zmianę ramki parametrów definiowanych przez użytkownika lub programowanie raportów eksploatacyjnych w ramach funkcji ACMS (*Aircraft Condition Monitoring System*).



Rys. 2. Pamięć półprzewodnikowa

Więcej, pewniej, precyzyjniej

Czy naturalną konsekwencją zmiany generacji rejestratorów parametrów lotu jest zwiększanie ich możliwości? Z pewnością tak, ale wpływ na to ma nie tylko postęp technologiczny, jakim niewątpliwie podlega technika lotnicza, w tym także czarne skrzynki. Zdecydowanie mocniejszym regulatorem są tu przepisy i prawo lotnicze, a także niekiedy katastrofy i zdarzenia w lotnictwie, szczególnie te, w których rejestratory lub ich brak czy zniszczenie miały decydujący wpływ na późniejsze prace komisji badań wypadków lotniczych.

Zmiany wymagań w prawie i przepisach

Prawo i przepisy lotnicze posiadają swoją hierarchię i strukturę. Kraje, które podpisały Konwencję Chicagowską są obowiązane do stosowania aneksów ICAO, czyli Międzynarodowej Organizacji Lotnictwa Cywilnego. Aneks 6. określa zasady eksploatacji statków powietrznych, w tym również wymagania odnośnie rejestratorów lotu oraz listy obowiązkowych parametrów. Organem odpowiedzialnym za przygotowywanie propozycji zmian jest FliRecPanel, czyli Panel Rejestratorów Lotu. Autor niniejszego artykułu kilkakrotnie brał udział w pracach tego panelu. Polegają one na analizie stanu dotychczasowego, ze szczególnym uwzględnieniem ostatnio wprowadzonych standardów bądź zmiany statusu niektórych zmian z rekomendacji na standardy. I tak nieuchronnym wynikiem działania Panelu Rejestratorów Lotu jest podnoszenie co kilka lat

wymogów odnośnie rejestracji lotu. To, co do niedawna było jedynie rekomendowane w Aneksie 6. ICAO staje się po kilkunastu latach obowiązującym standardem. Ma to również przełożenie na przepisy krajowe lub międzynarodowe jak FAA czy JAR, dla których aneksy ICAO są bezpośrednim odniesieniem. Oto przykład pierwszego zestawu parametrów obowiązkowych (*mandatory parameters*) w rejestratorach tzw. typu I:

- czas UTC lub czas skorelowany,
- wysokość ciśnieniowa,
- prędkość przyrządowa,
- kurs magnetyczny,
- przyspieszenie normalne,
- kąt pochylenia,
- kąt przechylenia,
- transmisja radiowa,
- ciąg/moc każdego z silników i położenie manetek,
- położenie klap lub ustawienie dźwigni klap,
- położenie slotów lub ustawienie dźwigni slotów,
- położenie odwracaczy ciągu silnika,
- położenie przerywaczy i/lub hamulców aerodynamicznych,
- temperatura zewnętrzna,
- ustawienie autopilota lub automatu ciągu,
- przyspieszenie podłużne,
- przyspieszenie poprzeczne.

Zestaw taki obowiązywał w latach 90. dla samolotów w transporcie lotniczym o masie powyżej 20 000 kg. Po 1998 roku parametry te rozszerzono na samoloty powyżej 5 700 kg, a dla samolotów w transporcie lotniczym o masie powyżej 27 000 kg ustanowiono po 2002 r. nowy standard. Oprócz wymienionych parametrów obowiązuje rozszerzony, następujący zestaw:

- ustawienie trymera steru wysokości,
- wysokość radiowa,
- pionowe odchylenie od ścieżki schodzenia ILS Glide Slope,
- poziome odchylenie od ścieżki schodzenia ILS Localizer,
- znacznik przelotu nad markerem,
- ostrzeżenia,
- częstotliwość pracy urządzeń nawigacyjnych,
- odległość od DME,
- przełącznik położenia podwozia ziemia/powietrze (*Air/Ground*),
- sygnały układu ostrzegania o niebezpiecznym zbliżaniu do ziemi (GPWS),
- kąt natarcia,

- ostrzeżenia o spadku ciśnienia (w instalacji hydraulicznej lub pneumatycznej),
- prędkość względem ziemi (*Groundspeed*),
- położenie podwozia (wypuszczone/schowane) lub dźwigni podwozia.

Jak widać, w każdej dekadzie poszerzany jest standard dotyczący zestawu rejestrowanych parametrów. Oto ostatni przykład wymogów dotyczących samolotów komunikacyjnych wyposażonych w systemy wyświetlaczy elektronicznych:

- wybrana wysokość (*selected altitude*),
- wybrana prędkość (*selected speed*),
- wybrana liczba Macha (*selected Mach*),
- wybrana prędkość pionowa (*selected vertical speed*),
- wybrany kurs (*selected heading*),
- wybrana trajektoria lotu (*selected flight path*),
- wybrana wysokość decyzji (*selected decision height*),
- format wyświetlania EFIS (*EFIS display format*),
- format wyświetlania wielofunkcyjnego (*Multi function/engine/alerts display format*).

Przedstawione parametry muszą być rejestrowane z pozycji obu pilotów. Widać więc, jak systematycznie przybywa nowych wymogów do spełnienia, co dotyczy zarówno nowych typów samolotów, jak i w niektórych sytuacjach samolotów od dawna użytkowanych, ze względu na konieczność modyfikacji lub wykonania niezbędnych biuletynów. Często są one wynikiem zaistniałych zdarzeń lotniczych bądź działań profilaktycznych, które przed takimi zdarzeniami zapobiegają.

Zmiany wymuszone okolicznościami

Często w trakcie eksploatacji statków powietrznych zachodzi konieczność dokonania zmian jego systemów lub poszczególnych elementów. Dotyczy to również układu rejestracji czy akwizycji danych. Wspomniany przykład wydanego przez nadzory lotnicze zakazu użytkowania 5-parametrowych rejestratorów lotu był wynikiem kilku katastrof, w których informacja zapisana w czarnych skrzynkach okazała się bezużyteczna lub dalece niewystarczająca. Zmiany mogą dotyczyć wymiany całych układów rejestracji lub ich poważnej modyfikacji. Przykładem może być modyfikacja samolotów, które wlatywały nad terytorium USA, gdzie zaczęły obowiązywać ostre wymogi bezpieczeństwa co do wyposażenia samolotów, m.in. w systemy TCAS (system zapobiegania kolizjom). Podobne modyfikacje przeprowadzono w samolotach latających w Europie, gdy wprowadzano systemy RNAV (nawigacja obszarowa) lub obowiązkowy mod S w transponderach. Opisane operacje wymagały zmodyfikowania w głównej mierze układów akwizycji danych, gdyż wprowadzano parametry, których dotychczas nie było ani w instalacjach pokładowych, ani na szynach z danymi.

Wprowadzanie takich zmian jest procesem bardzo poważnym i kosztownym; nierzadko wymagającym wycofania samolotów z eksploatacji na długi czas, a także zabudowy nowych przyrządów, przeprowadzenia wiązek przewodów, integracji z pozostałymi systemami i wielu zmian w oprogramowaniu, dokumentacjach, procedurach operacyjnych i obsługowych, a także w programach szkoleń i treningów. Dlatego też samoloty nowego typu projektuje się z odpowiednim wyprzedzeniem w stosunku do obowiązujących przepisów. Przykładem mogą być najnowsze samoloty w komunikacji lotniczej wszystkich przodujących producentów. Samoloty Embraer 170, 175 i 190 rejestrują ok. 1000 parametrów, dużo więcej niż wymagają przepisy ICAO, FAA czy JAR.

Zmiany wymogów konstrukcyjnych

Wraz ze zwiększaniem istotnej zawartości czarnych skrzynek, którymi są parametry lotu oraz zapis rozmów, następują zmiany wymagań co do ich właściwości konstrukcyjnych, wytrzymałościowych, termicznych itp. Ma to swoje odzwierciedlenie w przepisach i prawie lotniczym, podobnie jak przy ustalaniu obowiązującej listy parametrów, z tą jednak różnicą, że największy udział w tworzeniu tych wymagań mają organizacje związane z technicznymi aspektami projektowania i produkcji lotniczej. W ustalaniu rozwiązań konstrukcyjnych rejestratorów rozmów i parametrów lotu dużą rolę odgrywają dokumenty organizacji EUROCAE, która określa wytyczne do projektowania systemów awioniki. W przypadku rejestratorów są to dokumenty ED55, ED56, ED112 oraz ED155.

Zwiększanie wymagań konstrukcyjnych w kolejnych generacjach rejestratorów widać choćby na przykładzie rosnącego przeciążenia niszczącego dla nośnika informacji. W pierwszej generacji czarnych skrzynek przyjęto współczynnik przeciążenia 100 g, co okazało się niewystarczające i późniejsze konstrukcje musiały wytrzymać 1000 g. Obecnie jest to dla większości rejestratorów katastroficznych 3400 g ze wskazaniem na dalszy wzrost, gdyż już teraz niektóre konstrukcje wytrzymują 6000 g. Podobnie rzecz ma się z odpornością na temperaturę, wodę morską, sól i inne szkodliwe substancje. Rosną też wymagania odnośnie procentowej dokładności zapisu poszczególnych parametrów lub możliwej dopuszczalnej ilości błędnych ramek na jednostkę czasu.

Recovery, znaczy odzyskać dane

Lot francuskiego Airbusa A330-200 1 czerwca 2009 r. z Rio de Janeiro do Paryża zakończył się podwójną katastrofą. Pierwszą i niewątpliwie najdotkliwszą była śmierć wszystkich osób znajdujących się na pokładzie oraz utrata samolotu, drugą – nieodnalezienie czarnych skrzynek w wodach Atlantyku przez długi czas po katastrofie. Dla francuskiego Biura Badania i Analiz Wypadków Lotniczych BEA była to sprawa prestiżowa, jednak wobec braku praktycznie

jakichkolwiek informacji nie mogła zakończyć się powodzeniem. Oprócz kilku szczątkowych komunikatów o raczej spekulatywnym charakterze udało się osiągnąć jedno – powołać zespół specjalistów, który opracował wytyczne dla całego procesu odnajdywania czarnych skrzynek i odzyskiwania z nich istotnych informacji. Główny nacisk położono na utratę rejestratorów w lotach nad wodami. Jednak proponowane rozwiązania mogą mieć pozytywny wpływ na inne aspekty badania wypadków lotniczych, szczególnie przy utracie danych lub poważnych zniszczeniach czarnych skrzynek. Prace zespołu złożonego ze 120 osób reprezentujących takie organizacje, jak ICAO, EASA, FAA, BEA, NTSB, BFU, Airbus, Boeing, Honeywell, GE, EADS, L3Com, IATA, IFALPA, SITA, Air France i inne, były ukierunkowane na: transmisję danych z lotu, rejestratory nowych technologii, zlokalizowanie wraku [2].

Transmisja danych z lotu

Zespół uznał, że bezprzewodowa transmisja parametrów lotu jest na tyle dojrzałym procesem, a często i produktem, że może być rekomendowana jako sposób pozyskania danych z rejestratorów. Rozważano kilka sposobów tej transmisji:

- transmisja parametrów lotu w czasie rzeczywistym,
- transmisja parametrów lotu wymuszona sygnałem uruchamianym w razie katastrofy,
- rozszerzone raportowanie pozycji geograficznej o podstawowe parametry lotu za pomocą sieci ACARS,
- podwodna transmisja danych z rejestratora po namierzeniu przez pływające jednostki poszukiwawcze.

Transmisja danych z lotu jest już powszechnie stosowana w praktyce. Wielu operatorów korzysta z kilku rozwiązań opartych w głównej mierze na sieciach GSM lub WiFi. Jednakże jest to dostępne głównie na terenach lądowych o rozwiniętej infrastrukturze. W przypadku przelotów nad dużymi akwenami pozostaje łączność satelitarna (Iridium, Inmarsat, Astrium) – rozwiązanie już istniejące, ale kosztowne [1]. Jednocześnie zespół wskazał na konieczność zwiększania ramki parametrów do 1024 słów/s, co jednak obecnie jest trudne do osiągnięcia, gdyż jedynie nieliczne samoloty posiadają ramkę 512 słów/s, a większość rejestruje 64÷128 słów/s. Niewielkich zmian i nakładów wymagałoby rozszerzenie transmisji acarsowej o niezbędne parametry do lokalizacji wraku i podstawowej analizy w badaniu wypadku lotniczego, natomiast wariant podwodnej transmisji do statku poszukiwawczego uznano za zbyt mało zaawansowany.

Rejestratory nowych technologii

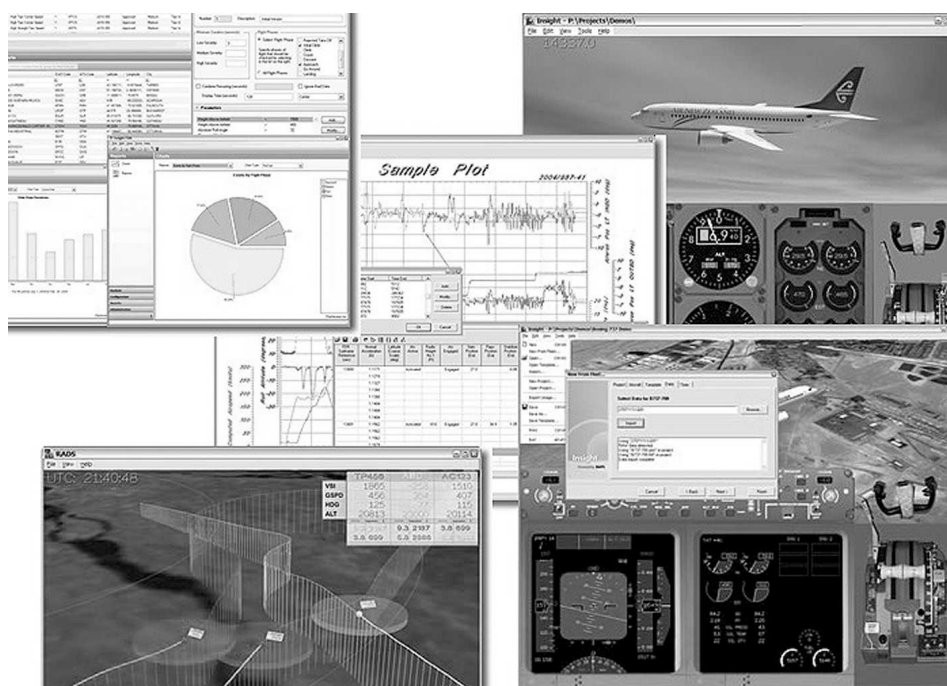
Opracowano założenia do projektowania rejestratorów o całkowicie nowych funkcjach, takich jak pływalność i autonomiczność po katastrofie. Są one

zawarte w dokumentach EUROCAE ED-112 i ED-155. Rozwiązanie takie będzie dotyczyć samolotów budowanych w przyszłości.

W istniejących samolotach rozważano możliwość instalacji dodatkowego rejestratora o lekkiej konstrukcji i wyposażonego w funkcję pływalności, jako uzupełnienie dotychczasowych czarnych skrzynek. Proponowano również zastępowanie istniejących rozwiązań, czyli zestawów DFDR+CVR, dwoma rejestratorami typu Combo (zintegrowanymi rejestratorami rozmów i parametrów lotu).

ULB i ELT, czyli zlokalizować wrak

Prace w tym kierunku przyniosły najwięcej konkretnych rezultatów. Zwiększenie żywotności ULB (*Underwater Located Beacon*) z 30 do 90 dni po katastrofie stało się jednym z pierwszych wniosków złożonych do ICAO i EASA. Postulowano również rozszerzenie częstotliwości pracy nadajnika ULB ze standardowych 37,5 kHz na niższe częstotliwości w przedziale od 3 do 9 kHz, które dają większy zasięg w wodzie morskiej. W przypadku rejestratorów odrzucających z samolotu w momencie katastrofy ULB powinny znajdować się zarówno przy samolocie, jak i przy rejestratorze. Duże szanse na wprowadzenie do eksploatacji mają również urządzenia ELT (*Emergency Locator Transmitter*) zintegrowane z nadajnikiem GPS, które uruchamiane impaktowo wysyłają dane o położeniu geograficznym.



Rys. 3. Współczesny program do analizy parametrów lotu

3. Wokół rejestratora

Aby wykorzystanie danych z czarnych skrzynek było możliwe, potrzebne są środki do ich obróbki i analizy (rys. 3.). Wraz z kolejnymi generacjami rejestratorów zmieniało się niezbędne otoczenie (tab. 1.). Pierwsza generacja to często bezpośredni odczyt z naświetlonej czy zarysowanej taśmy, druga magnetyczna wyzwoliła konieczność transformacji zakodowanych parametrów do inżynierskich wielkości, co było często procesem złożonym, pracochłonnym. Dopiero u schyłku drugiej generacji z pomocą „przyszła” technika cyfrowa – trzecia generacja (*solid state*) to pełna integracja i synergia z komputerami, a ich rosnące możliwości wpływają na ciągłe ulepszanie odczytu danych, ich analizę, prezentację, archiwizację itp. Przyszłość to zapewne pełna integracja z systemami bezpieczeństwa SMS oraz zdalne sterowanie rejestracją lotu [3].

Tabela 1. Krótka charakterystyka generacji rejestratorów

Generacja rejestratorów	I	II	III	Następna generacja
Nośnik informacji	taśma celulo-idowa, papierowa, stalowa	taśma magnetyczna	pamięć półprzewodnikowa	nanotechnologie
Obowiązkowa liczba parametrów	5	16÷32	>32	>64
Liczba słów na sekundę	NA	64	128-512	>1024
Szyfrowanie i akwizycja parametrów	brak	<i>Flight Data Aquisition Unit</i>	<i>Flight Data Aquisition and Management Unit</i>	bezpośrednio na szynach danych nowych magistral ARINC
Wymagana odporność na przeciążenie	100 g	1000 g	3400 g	6000 g
Odporność temperaturowa	brak	1000°C/30 min	1100°C/60 min	>1100°C/60 min
Długotrwałość pracy ULB	NA	30 dni	30/90 dni	>90 dni
Możliwości aplikacji obsługujących zapisy	zapis i odczyt bezpośredni, ręczny lub fotograficzny	odczyt przez przetwornik lub interfejs PC, podstawowe opcje wizualizacji i analizy	odczyt całkowicie cyfrowy, aplikacje do analizy, wizualizacji i prezentacji lotu, zarządzanie informacjami dodatkowymi ASR/GSR, meteo, GPS, integracja z CVR	integracja z SMS (<i>Safety Management System</i>), FleetWatch, programowanie usług, zdalna obsługa i administrowanie rejestratorem

Podsumowanie

Przytoczone w referacie informacje wskazują na ciągłe powiększanie możliwości rejestratorów, zarówno pod względem ilościowym, jak i jakościowym. Ulepszaniu będą poddane także konstrukcja i odporność czarnych skrzynek na katastroficzne czynniki. Z jednej strony będą to urządzenia o dużej autonomiczności, szczególnie po zaistnieniu wypadku lotniczego, z drugiej zaś w pełni zsynchronizowane i wykorzystujące zasoby samolotu.

Literatura

- [1] Avionica Inc.: Real innovations – Real solutions, Miami, FL, USA 2005.
- [2] BEA: Flight data recovery working group report, Paris, Le Bourget 2009.
- [3] Teledyne controls: Taking information to a higher plane, Santa Monica, CA, USA 2007.

WHERE ARE YOU GOING, THE BLACK BOX?

Abstract

Flight Data Recorders, also called as “black boxes” have over an half century history. The three generations presented different constructions and still improving abilities. The article describes many aspects of changes of recorders due to growing requirements, technological progress or circumstances of aircraft accident investigations. The author predicts the next generation recorders as devices with increasing number of parameters, growing accident resistance, using new functions for either their autonomy or full synchronization with aircraft.

Złożono w Oficynie Wydawniczej we wrześniu 2011 r.