

Zbigniew UCHMAN, zbigniew.uchman@gmail.com
Poznan University of Technology (Politechnika Poznańska), Poland

POTENCJALNE ŹRÓDŁA ZAGROŻEŃ W PROCESIE PROJEKTOWANIA I KONSTRUOWANIA STATKÓW POWIETRZNYCH

Potential sources of threats in the designing and constructing process of aircrafts

Streszczenie: Najwyższym priorytetem w lotnictwie jest bezpieczeństwo. Przewozy lotnicze należą do najbardziej bezpiecznych środków transportu. Jest to efekt nieustannych działań mających na celu eliminację źródeł potencjalnych zagrożeń we wszystkich obszarach związanych z wykonywaniem operacji lotniczych. Kluczowa rola w tej mierze przypada producentowi statku powietrznego (SP). To on odpowiada za projekt i konstrukcję nowo budowanego samolotu lub śmigłowca oraz za proces jego produkcji. Na nim spoczywa obowiązek prowadzenia nadzoru nad przebiegiem eksploatacji. W artykule zdefiniowano źródła potencjalnych zagrożeń dla bezpieczeństwa operacji lotniczych, które leżą w zakresie kompetencji producenta SP. Należą do nich m.in. błędy w projektowaniu i konstruowaniu, wady produkcyjne, niewłaściwe prowadzenie badań i prób dowodowych, błędy i braki w dokumentacji opisowo-eksploatacyjnej i programach szkolenia, a także niedostateczny nadzór nad procesem eksploatacji. W artykule omówiono potencjalne źródła zagrożeń związanych z fazą projektowania i konstruowania statku powietrznego, a także przedstawiono przykłady błędów i zaniedbań w tej dziedzinie. Zawarte w artykule wnioski są wynikiem autorskiej analizy ponad 250 niebezpiecznych zdarzeń we współczesnym lotnictwie komunikacyjnym. Materiałami źródłowymi były protokoły z badania przyczyn analizowanych wypadków.

Słowa kluczowe: statek powietrzny, bezpieczeństwo, projektowanie, wypadki lotnicze

Abstract: Safety is the top priority in aviation. Air transport is one of the safest means of transport. This is the result of continuous activities aimed at eliminating sources of potential threats in all areas related to the performance of aviation operations. The key role in this respect belongs to the aircraft manufacturer. He is responsible for the design and construction of a newly built aircraft or helicopter and for its production process. He is responsible for supervising the operation. The article defines the sources of potential

threats to the safety of air operations that lie within the manufacturer's competence. They include e.g. errors in design and construction, manufacturing defects, improper conduct of tests and proof tests, errors and deficiencies in the descriptive and operational documentation and training programs, as well as insufficient supervision over the operation process. The article discusses the potential sources of threats related to the design and construction phase of the aircraft, and also presents examples of errors and omissions in this field. The conclusions contained in the article are the result of the author's analysis of over 250 dangerous events that have taken place in modern commercial aviation. The source materials were protocols from the investigation of the causes of the analyzed accidents.

Keywords: aircraft, safety, design, aviation accidents

Received: September 19, 2023/ Revised: November 2, 2023/ Accepted: November 7, 2023/ Published: December 28, 2023

1. Wprowadzenie

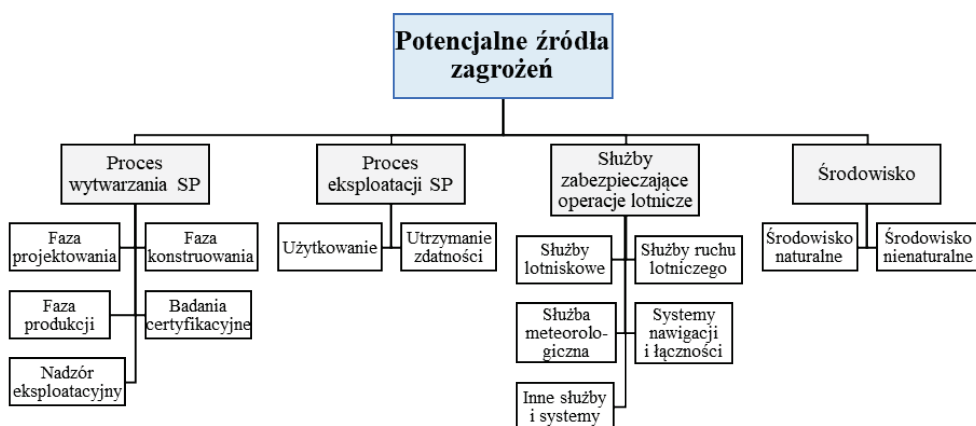
Przewozy lotnicze są najbardziej bezpiecznym środkiem transportu. Wprawdzie czasem dochodzi do wypadków, ale w odniesieniu do ogólnej liczby przewożonych pasażerów i pokonywanych przez nich odległości, są to przypadki niezwykle rzadkie. Tak znaczący poziom bezpieczeństwa jest efektem wysokiej niezawodności eksploatowanych statków powietrznych, uregulowań w obowiązujących przepisach i procedurach, a także profesjonalizmu personelu służb i instytucji zaangażowanych w wykonywanie operacji lotniczych. Jednym z bardzo istotnych elementów procesu podnoszenia poziomu bezpieczeństwa w lotnictwie są wnioski wynikające z analizy przyczyn i okoliczności zaistniałych zdarzeń lotniczych. Stanowią one bowiem główne źródło identyfikacji potencjalnych zagrożeń oraz inspiracji do podejmowania działań mających na celu ich skuteczną eliminację. Z tego względu rzetelne i w pełni obiektywne badanie przyczyn niebezpiecznych zdarzeń lotniczych ma tak ważne znaczenie.

Obowiązujące obecnie w lotnictwie komunikacyjnym wymagania niezawodnościowe oraz uregulowania określone w obowiązujących przepisach i procedurach powodują, że wystąpienie pojedynczej awarii statku powietrznego lub błędu popełnionego przez jednego z członków załogi w kokpicie nie powinno stanowić zagrożenia dla bezpieczeństwa wykonywanej operacji lotniczej. Do wypadku prowadzi dopiero łańcuch niekorzystnych zdarzeń i okoliczności. Z tego względu jednoznaczne wskazanie przyczyny konkretnego wypadku nie jest zadaniem łatwym. W większości przypadków wśród ogniw wspomnianego łańcucha są z pozoru mało istotne zdarzenia lub okoliczności. Bez ich udziału większości tragicznych wypadków prawdopodobnie dałoby się uniknąć. Z tego powodu analizując potencjalne źródła zagrożeń, należy uwzględniać wszystkie czynniki, które mogą przyczynić się do powstania niebezpiecznej sekwencji zdarzeń.

Potencjalne źródła zagrożeń dla bezpieczeństwa wykonywania lotów można podzielić na cztery podstawowe kategorie:

- błędy związane z procesem wytwarzania statku powietrznego,
- nieprawidłowości i zaniechania w procesie eksploatacji statku powietrznego,
- błędy i zaniechania w działaniach służb zabezpieczających wykonywanie operacji lotniczych,
- niekorzystne oddziaływanie środowiska.

W zależności od potrzeb wymienione kategorie potencjalnych źródeł zagrożeń można podzielić na poszczególne grupy i podgrupy (rys. 1).



Rys. 1. Potencjalne źródła zagrożeń dla bezpieczeństwa operacji lotniczych

2. Proces wytwarzania statku powietrznego

Proces powstawania nowego typu statku powietrznego rozpoczyna się od opracowania założeń operacyjno-technicznych, które stanowią bazę do prac projektowych i konstrukcyjnych. Kolejnym etapem jest budowa prototypów przeznaczonych do badań i prób dowodowych, w celu potwierdzenia spełniania przyjętych założeń i obowiązujących wymagań w zakresie bezpieczeństwa. Ich pozytywne wyniki są warunkiem niezbędnym do uzyskania certyfikatu typu dla nowo budowanego samolotu lub śmigłowca i rozpoczęcia jego produkcji seryjnej. Po zakończeniu montażu ostatecznego, każdy statek powietrzny jest poddawany próbom kontrolnym zarówno na ziemi, jak i w locie. Po ich pozytywnym zakończeniu i uzyskaniu certyfikatu zdolności do lotu jest on przekazywany użytkownikowi i rozpoczyna się proces jego eksploatacji. Poszczególne fazy wytwarzania statku powietrznego, a zwłaszcza badania i próby dowodowe oraz próby kontrolne są nadzorowane przez uprawniony organ

nadzoru lotniczego. Zakończenie procesu produkcji i przekazanie samolotu lub śmigłowca do eksploatacji nie zamyka relacji pomiędzy jego producentem a użytkownikiem. Na podstawie zdobywanych doświadczeń eksploatacyjnych producenci sprzętu lotniczego opracowują zmiany dotyczące rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych, procesu produkcji, kompletacji wyposażenia pokładowego, dokumentacji opisowo-eksploatacyjnej, programów szkolenia, obowiązujących procedur użytkowania, a także zakresu i technologii wykonywania obsługi technicznych, napraw i remontów. Zmiany te są wprowadzane na podstawie biuletynów technicznych wydawanych przez producenta statku powietrznego i zatwierdzanych przez uprawniony organ nadzoru lotniczego.

Na podstawie przeprowadzonych analiz przyczyn wypadków w lotnictwie komunikacyjnym można wyodrębnić kilka kategorii potencjalnych zagrożeń, które są powiązane z zakresem kompetencji wytwórcy techniki lotniczej. Do najważniejszych z nich należą m.in.:

- błędy i niedociągnięcia w projektowaniu i konstruowaniu,
- nieprawidłowe prowadzenie badań dowodowych i prób kontrolnych,
- niewłaściwa ocena trwałości elementów statku powietrznego,
- wady produkcyjne,
- błędy i braki w dokumentacji technicznej i programach szkolenia,
- nieodpowiednia kompletacja zestawów narzędzi i sprzętu lotniskowo-hangarowego,
- niezadawalający poziom dostaw części wymiennych,
- niedostateczny nadzór producenta statku powietrznego nad procesem jego eksploatacji.

W dalszej części artykułu omówiono niektóre rodzaje źródeł zagrożeń związanych z procesem projektowania i konstruowania statku powietrznego. Przyjęte w programie budowy nowego typu samolotu czy śmigłowca założenia operacyjno-techniczne i wymagania niezawodnościowe w istotnym stopniu decydują nie tylko o wyborze strategii projektowania i konstruowania, w tym o stosowanych materiałach i technologiach, ale także o kształcie przyszłego systemu eksploatacji. Znaczny wpływ na realizowane na tym etapie prace mają rezultaty prowadzonych w tej dziedzinie badań naukowych i programów badawczo-rozwojowych, a także doświadczenia eksploatacyjne. Na etapie projektowania i konstruowania statku powietrznego kształtowane są kluczowe jego własności i właściwości. Dla bezpieczeństwa operacji lotniczych najbardziej istotne znaczenie mają takie cechy jak: bezpieczeństwo, nieuszkodzalność, trwałość, żywotność oraz podatność eksploatacyjna, czyli podatność użytkowa i podatność na utrzymanie zdadności. Jednym z podstawowych problemów stojących przed inżynierami prowadzącymi prace projektowe i konstrukcyjne jest uniknięcie błędów, które mogą niekorzystnie wpływać na bezpieczeństwo procesu eksploatacji nowo budowanego lub modernizowanego statku powietrznego. Jest to zadanie niezwykle trudne. Wymaga nie tylko wiedzy i doświadczenia, ale także dużej wyobraźni oraz zdolno-

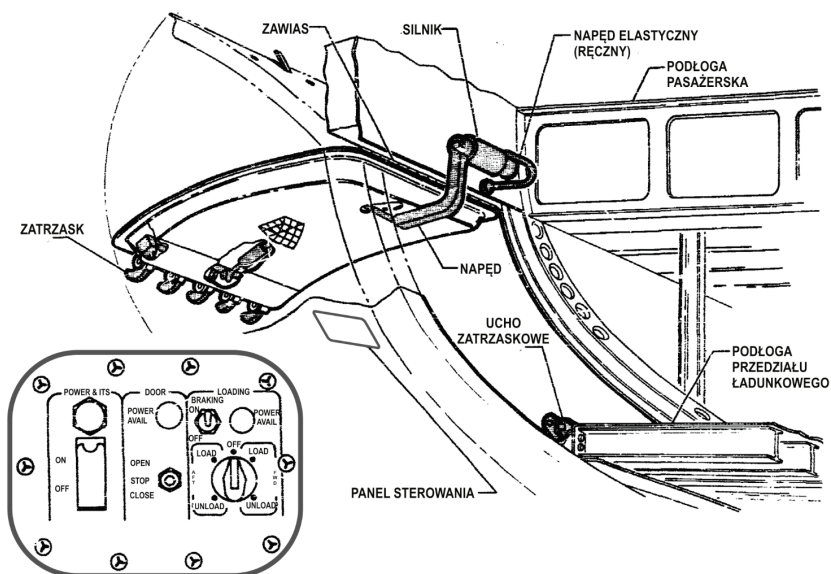
ści przewidywania nawet niezwykle mało prawdopodobnych sekwencji zdarzeń i ich skutków. W procesie projektowania i konstruowania współczesnych statków powietrznych wykorzystywane są wysoko specjalistyczne programy komputerowe. Umożliwiają one wykonywanie skomplikowanych obliczeń oraz symulowanie różnych wariantów rozwiązań złożonych problemów technicznych w celu ich optymalizacji. Pozwala to uniknąć wielu błędów w tej fazie pracy. Należy jednak mieć na uwadze fakt, że w procesie opracowywania nowej konstrukcji statku powietrznego lub jego głębokiej modernizacji często wykorzystywane są najnowsze zdobycze nauki i techniki. Z tego względu wiele stosowanych rozwiązań ma charakter nowatorski. Niekiedy dochodzi więc do błędów lub niedociągnięć, których konsekwencje ujawniają się dopiero w trakcie procesu eksploatacji, stanowiąc bezpośrednie lub pośrednie zagrożenie dla bezpieczeństwa latania.

3. Przykłady błędów w projektowaniu i konstruowaniu statków powietrznych

W celu zobrazowania możliwych konsekwencji błędów i niedociągnięć w procesie projektowania i konstruowania statków powietrznych przytoczono kilka przykładów zdarzeń we współczesnym lotnictwie komunikacyjnym. Przykłady te dobrano tak, aby w możliwie najbardziej reprezentatywny sposób przedstawić poszczególne rodzaje zagrożeń. Z tego względu nie mogą one stanowić podstawy do oceny ogólnego poziomu niezawodności danego typu statku powietrznego.

Interesującym przykładem błędów popełnionych już w procesie projektowania i konstruowania, a zarazem nagannej postawy organu nadzoru lotniczego, jest samolot DC-10. Był to sztandarowy projekt firmy McDonnell Douglas, realizowany w dużym pośpiechu. Jego owocem miał być pierwszy w świecie szerokokadłubowy samolot pasażerski, mogący zabrać na pokład nawet 380 pasażerów. W dniu 12.06.1972 r., niespełna 10 miesięcy po wprowadzeniu do służby pierwszego egzemplarza DC-10, tego typu maszyna w barwach linii American Airlines Inc. wystartowała z lotniska w Detroit i rozpoczęła wznoszenie. Na wysokości 11 750 stóp (3 581 m) doszło do eksplozywnej dekompresji. Załoga odkryła, że ster kierunku został zablokowany w położeniu wychylonym w prawo, a obroty zabudowanego w stateczniku pionowym silnika nr 2 spadły do biegu jałowego i nie reagowały na ruch manetki. Awarii uległo również część obwodów instalacji hydraulicznej i elektrycznej, a zmiana położenia steru wysokości wymagała użycia bardzo dużej siły. Sterując uszkodzoną maszyną za pomocą różnicowania ciągu lewego i prawego silnika, załozde udało się powrócić na lotnisko startu i szczęśliwie wylądować. W wyniku nagłej dekompresji dziewięciu pasażerów i dwie stewardessy zostały poszkodowane.

Komisja badająca przyczyny wypadku stwierdziła, że eksplozywna dekompresja była wynikiem odpadnięcia niewłaściwie zaryglowanych tylnych drzwi bagażowych. Znaczna różnica ciśnienia pomiędzy kabiną pasażerską i przedziałem bagażowym zniszczyła strukturę tylnej części pokładu, powodując uszkodzenie biegnących tam przewodów instalacji hydraulicznej i elektrycznej, w tym układów sterowania usterzeniem ogonowym. W odróżnieniu od wcześniej stosowanych rozwiązań, w samolocie DC-10 tylne drzwi bagażowe otwierały się na zewnątrz. Dzięki temu zwiększona została czynna przestrzeń załadunku. Takie rozwiązanie powodowało, że zwiększające się wraz ze wzrostem wysokości nadciśnienie wewnątrz kadłuba powodowało odpychanie płaszczyzny drzwi od ich obramowania. Aby zapobiec niezamierzonemu ich otwarciu podczas lotu, konstruktorzy zaprojektowali specjalny system ryglowania. W pozycji zamkniętej blokowało je pięć zaczepów zamocowanych na wspólnym wałku. Wsuniecie zaczepów w odpowiadające im ucha było sygnalizowane zakończeniem pracy silnika elektrycznego napędzającego ten wałek. Wówczas obrót klamki do pozycji „zamknięte” powodował wysunięcie bolców ryglujących, które uniemożliwiały samoczynną zmianę położenia zaczepów. Dodatkowo, w drzwiach bagażowych przewidziano otwór wentylacyjny zasłaniany za pomocą ruchomej klapki. Jego zadaniem było zredukowanie różnicy ciśnienia po obu stronach drzwi, w przypadku nieprawidłowego ich zablokowania. Całkowite przesłonięcie wspomnianego otworu świadczyło o prawidłowym zamknięciu i zablokowaniu drzwi. Schemat omawianego mechanizmu przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Mechanizm zamykania i blokowania tylnych drzwi bagażowych pierwszej serii samolotów DC-10 [1]

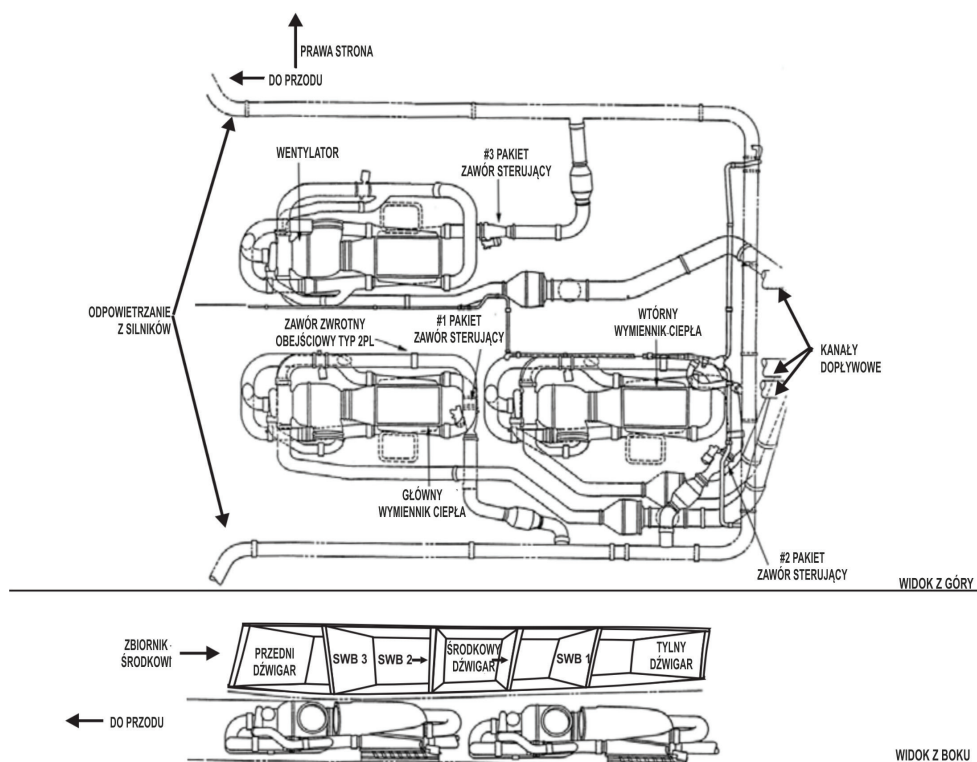
W swoim raporcie komisja NTSB (National Transportation Safety Board) stwierdziła, że system zamykania i blokowania tylnych drzwi bagażowych w samolotach DC-10 jest wadliwy i stwarza bardzo poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa latania. Nie dawał on bowiem gwarancji prawidłowego zablokowania drzwi w położeniu zamkniętym. W przypadku wystąpienia dużych obciążeń, nieodpowiednie okablowanie silnika elektrycznego obracającego wałek ryglujący powodowało jego przedwczesne wyłączenie. Sugerowało to, że zaczepy zajęły właściwe położenie, chociaż nie odpowiadało to stanowi faktycznemu. Ponadto okazało się, że istnieje możliwość obrócenia klamki w położenie „zamknięte”, mimo pozostawiania bolców ryglujących w niewłaściwym położeniu. Personel obsługi naziemnej nie miał możliwości sprawdzenia położenia bolców ryglujących. Zwrócono również uwagę na wadę konstrukcyjną podłogi w tylnej części kabiny i konieczność wyposażenia jej w dodatkowe otwory wentylacyjne, które umożliwiałyby szybkie wyrównanie różnicy ciśnienia w przypadku nagłej dekompresji. Zapobiegłoby to destrukcji struktury pokładu i uszkodzeniu biegnących tam przewodów. Mimo poważnego zagrożenia, po wypadku w Detroit, FAA (Federal Aviation Administration) nie wydała żadnej dyrektywy w tej sprawie. Jej szef przyjął bowiem dżentelmeńskie zapewnienie prezesa zarządu McDonnell Douglas o szybkim wyeliminowaniu ujawnionych wad. Uznano bowiem, że podjęcie oficjalnych działań przez FAA mogłoby negatywnie wpłynąć na przebieg kampanii promocyjnej nowo wprowadzanej maszyny. Okazało się przy tym, że pewne problemy z mechanizmem blokowania tylnych drzwi bagażowych pojawiły się już dwa lata wcześniej, podczas procesu certyfikacji samolotu. Wówczas zostały one jednak zbagatelizowane.

Wbrew przyjętym zobowiązaniom firma McDonnell Douglas nie wprowadziła zalecanych przez NTSB zmian konstrukcyjnych, poprzestając jedynie na powierzchownej modyfikacji wadliwego mechanizmu. W konsekwencji doprowadziło to do kolejnego wypadku, którego skutki tym razem były tragiczne. W dniu 03.03.1974 r. w startującym z lotniska w Paryżu samolocie DC-10 linii Turkish Airlines doszło do identycznego zdarzenia. Na pokładzie znajdowało się wówczas 335 pasażerów i 11 członków załogi. Odpadnięcie tylnych drzwi bagażowych na wysokości 3 300 m i związana z tym gwałtowna dekompresja całkowicie zniszczyły układ sterowania usterzeniem ogonowym. W efekcie piloci utracili panowanie nad maszyną, która chwilę później zderzyła się z ziemią, powodując śmierć wszystkich osób obecnych na pokładzie. W tym przypadku uszkodzenia struktury pokładu były tak poważne, że z wnętrza kabiny zostały wysane dwa ostatnie rzędy foteli wraz z siedzącymi w nich pasażerami. Przytoczone wydarzenia poważnie naruszyły opinię potencjalnych nabywców o nowo wprowadzanej maszynie i negatywnie odbiły się na wizerunku jej producenta [2].

Niekiedy zdarza się, że wady projektowe i konstrukcyjne ujawniają się dopiero po wielu latach eksploatacji. Przykładem tego jest wypadek startującego w dniu 17.07.1996 r. z lotniska JFK w Nowym Jorku samolotu Boeing 747 linii Trans World Airlines.

Planowany na godzinę 19 start do Paryża opóźnił się o ok. 80 min. Mimo późnej pory temperatura na lotnisku wynosiła 31°C. Gdy w trakcie wznoszenia samolot przecinał wysokość nieco ponad 14 000 stóp (4 267 m) targnęła nim potężna eksplozja, która oderwała część dziobową kadłuba wraz z kokpitem. Szczątki maszyny spadły do Atlantyku, około 100 km na wschód od Manhattanu. Z 212 pasażerów i 18 członków załogi nikt nie ocalał.

Komisja NTSB ustaliła, że wbrew wcześniejszym spekulacjom o możliwym zamachu terrorystycznym lub zestrzeleniu pociskiem raketowym, przyczyną wypadku był wybuch oparów paliwa w zabudowanym w centropłacie zbiorniku nr 4. Prowadzone dochodzenie wykazało, że postój samolotu na rozgrzanej płycie lotniska przed pechowym lotem trwał 2 godz. 45 min. Przez cały ten czas w układzie klimatyzacji z pełną mocą pracowały sprężarki nr 1 i 3, zapewniając maksymalne chłodzenie. Z pomiarów dokonanych w trakcie lotów próbnych wynikało, że przed rozpoczęciem kołowania temperatura obudowy umieszczonego bezpośrednio pod zbiornikiem nr 4 przedziału sprężarek instalacji klimatyzacji wynosiła od 121 do 177°C.



Rys. 3. Lokalizacja sprężarek układu klimatyzacji samolotu Boeing 747 w bezpośrednim sąsiedztwie zbiornika paliwa nr 4 [3]

Pomiędzy wspomnianą obudową a ściankami umieszczonego powyżej zbiornika konstruktorzy nie przewidzieli żadnej warstwy termoizolacyjnej. W efekcie oddziaływania ciepła emitowanego przez agregaty instalacji klimatyzacji, na wysokości ok. 4 270 m znajdujące się w nim paliwo osiągnęło temperaturę 46°C. Była ona zatem o ponad 10°C wyższa od temperatury wrzenia paliwa lotniczego JET-A1 na tej wysokości.

Zapłon oparów paliwa prawdopodobnie spowodowało zwarcie przewodu elektrycznego paliwomierza w zbiorniku nr 4 z przewodami wysokiego napięcia. Potwierdzeniem tej tezy były występujące tuż przed eksplozją krótkotrwałe zakłócenia w pracy wspomnianego przyrządu. Jak się okazało, na pewnym odcinku przewody paliwomierzy zasilane prądem o napięciu 24 V były prowadzone we wspólnej wiązce z przewodami wysokiego napięcia (115 i 350 V). Badania okablowania rozbitego Boeinga wykazały, że było ono w dość złym stanie technicznym. Wykryto liczne otarcia i pęknięcia izolacji przewodów. Całkowity nalot eksploatowanej od 25 lat maszyny wynosił 93 303 godz. W tym okresie przewody instalacji elektrycznej nie były wymieniane. Gwarantowany okres bezawaryjnej pracy zasadniczych elementów okablowania Boeinga 747 producent określił na 30 000 godz. lotu. Przeprowadzone później przez FAA badania samolotów Boeing 737 wykazały, że proces starzenia ich okablowania intensywnie przyspieszał po przekroczeniu 70 000 godz. lotu. Warto wspomnieć, że przy projektowaniu Boeinga 747 po raz pierwszy zastosowano technologię zwaną analizą drzewa błędów, która polega na badaniu skutków określonej awarii na funkcjonowanie innych systemów [2].

Przykładem nowatorskiego, a zarazem niezbyt udanego rozwiązania konstrukcyjno-technologicznego oraz nietrafnej oceny trwałości płatowca jest początkowa wersja samolotu Boeing 737. W dniu 28.04.1988 r. tego typu maszyna należąca do linii Aloha Airlines, z 90 pasażerami i pięcioma członkami załogi wykonywała lokalny rejs z lotniska Hilo do Honolulu na Hawajach. W 23. minucie lotu, gdy maszyna znajdowała się na wysokości 24 000 stóp (7 315 m) nagle doszło do eksplozywnej dekompresji. Jej przyczyną było oderwanie znacznej powierzchni pokrycia w lewej górnej części kadłuba, na odcinku od kokpitu do krawędzi natarcia skrzydła. W wyniku powstałego podciśnienia stojąca w pobliżu wyrwy stewardessa została wyssana na zewnątrz. Szczęśliwym zbiegiem okoliczności, chwilę wcześniej piloci włączyli sygnalizację „zapiąć pasy”, a pasażerowie wykonali to polecenie. Dzięki temu żadna z osób siedzących w rejonie destrukcji pokrycia kadłuba nie podzieliła losu stewardessy. Mimo poważnych trudności, w tym uszkodzenia układu sterowania lewym silnikiem, pilotom udało się awaryjnie obniżyć wysokość lotu i bezpiecznie wylądować na najbliższym lotnisku. W następstwie gwałtownej dekompresji szefowa pokładu poniosła śmierć, a 63 pasażerów i dwie stewardessy odniosło obrażenia.

Uszkodzony Boeing został wyprodukowany w 1969 r. i otrzymał nr produkcyjny 152. Od początku eksploatacji spędził w powietrzu 35 496 godz., wykonując 89 680 cykli, czyli startów i lądowań. Pod względem wykonanych cykli był to wówczas drugi wynik na świecie wśród tego typu maszyn. W samolotach Boeing 737 o numerach produkcyjnych

niższych niż 291 do montażu arkuszy pokrycia kadłuba stosowano technologię „klejenia na zimno”. Polegała ona na wykorzystaniu tkaniny impregnowanej epoksydowo jako łącznika pomiędzy krawędziami sąsiadujących ze sobą arkuszy pokrycia. Zastosowana technologia umożliwiała przenoszenie części obciążeń przez klejone złącze, odciążając w ten sposób szwy nitowe. Pozwalało to zmniejszyć grubość arkuszy pokrycia, a tym samym ich masę i koszty produkcji. Ponadto, takie rozwiązanie miało chronić połączenie przed penetracją wilgoci i związanej z nią korozji. W Boeingu linii Aloha doszło do zmęczeniowego pęknięcia pokrycia wzdłuż szwa nitowego, które było wyraźnie widoczne z zewnątrz. Z powodu odwarstwienia się złącza klejowego całkowite obciążenia były przenoszone wyłącznie przez szwy nitowe. W krytycznym locie nadciśnienie wewnątrz kadłuba spowodowało rozerwanie osłabionych połączeń płatów pokrycia ze strukturą kadłuba. Zdarzenie na Hawajach nie było pierwszym tego typu przypadkiem w historii Boeinga 737 serii 200. W dniu 22.08.1981 r. tego typu maszyna linii Far Eastern Air Transport w wyniku eksplozywnej dekompresji rozpadła się 14 min po starcie z lotniska w Tajpej na Tajwanie. Ze 104 pasażerów i sześciu członków załogi nikt nie ocalał. Przyczyną wypadku była destrukcja pokrycia dolnej części kadłuba i niektórych elementów jego struktury. W trakcie 12-letniej eksploatacji wspomniana maszyna wykonała 33 313 cykli. Wyniki badań przyczyn wypadku nad Tajwanem wykazały, że zastosowana przez Boeinga technologia klejenia na zimno jest wadliwa i charakteryzuje się niską trwałością i wytrzymałością zmęczeniową, a także dużą podatnością na korozję. Poczynając od samolotu o numerze produkcyjnym 291 koncern Boeing wprowadził zmiany konstrukcyjne, mające na celu wzmocnienie wadliwych połączeń pokrycia kadłuba z elementami jego struktury. Ponadto, opracował biuletyn techniczny dotyczący szczegółowej kontroli wszystkich połączeń pokrycia kadłuba. Jego wykonanie nie było jednak obowiązkowe [4].



Rys. 4. Widok uszkodzeń pokrycia samolotu linii Aloha Airlines po wylądowaniu na lotnisku w Kuhului [5]

Prawdziwą rewolucję w budowie samolotów komunikacyjnych wywołało wprowadzenie w pełni skomputeryzowanego systemu sterowania lotem „fly-by-wire”. We wspomnianym systemie sygnały elektryczne pochodzące z zabudowanych w samolocie interfejsów oraz obsługiwanych przez załogę manipulatorów są kierowane do zintegrowanej sieci komputerów, skąd po przetworzeniu na sygnały sterujące, docierają do poszczególnych układów sterowania. W samolotach produkowanych przez koncern Airbus decyzje wypracowywane przez system komputerowy mają charakter nadrzędny nad działaniem załogi. Oznacza to, że zadawane przez pilotów sygnały sterujące zostaną zignorowane, jeżeli zintegrowany system komputerowy uzna je za niebezpieczne. Natomiast koncern Boeing nadrzędną rolę w procesie sterowania samolotem pozostawił w kompetencji załogi, chociaż w niektórych przypadkach wymaga to dezaktywacji określonych systemów.

Przyjęta przez koncern Airbus filozofia funkcjonowania zautomatyzowanego systemu sterowania lotem ma na celu ograniczenie błędów w działaniach załogi i tym samym podniesienie poziomu bezpieczeństwa operacji lotniczych. Pierwszą maszyną komunikacyjną, w której zastosowano w pełni zautomatyzowany system sterowania, był Airbus A320. Jednak już podczas jego inauguracyjnego lotu w barwach linii Air France doszło do niekontrolowanej reakcji sterów i zderzenia z ziemią. Zdarzenie to miało miejsce w dniu 26.06.1988 r., w trakcie pokazów na lotnisku aeroklubu w Habsheim we Francji. Plan prezentacji nowo wprowadzanej na rynek maszyny przewidywał dwukrotny przelot nad drogą startową. Pierwszy miał być wykonany na wysokości 30 m, z minimalną prędkością, czyli na niemal maksymalnych kątach natarcia, w konfiguracji z wypuszczonymi slotami, klapami i podwoziem. Wykonywanie tego manewru na tak małej wysokości niesie za sobą pewne ryzyko. Dlatego zdziwienie budzi fakt, że oprócz sześciuosobowej załogi na pokładzie znajdowało się 130 pasażerów, w tym wiele dzieci. Gdy w trakcie wykonywanego manewru prędkość przyrządowa spadła nieco poniżej 205 km/h, zautomatyzowany system sterowania lotem ocenił, że maszynie grozi przeciągnięcie i wbrew woli pilota samoczynnie opuścił jej dziób, doprowadzając do zderzenia ze ścianą lasu. Zderzenie przeżyły wszystkie osoby obecne na pokładzie, ale szybko rozprzestrzeniający się pożar uniemożliwił opuszczenie kabiny trzem pasażerom, w tym dwojgu dzieciom. Należy zaznaczyć, że prędkość samolotu podczas feralnego pokazu nie spadła poniżej wartości dopuszczalnej.

W trakcie badania przyczyn tego wypadku pojawiła się hipoteza, że przelot na tak małej wysokości z minimalną prędkością i na maksymalnych kątach natarcia mógł uruchomić szereg zabezpieczeń w oprogramowaniu systemu sterowania samolotem i spowodować jego reakcje odmienne od zamierzeń załogi. Okazało się przy tym, że nawet inżynierowie koncernu Airbus nie byli w stanie określić, czy w zaistniałych warunkach lotu autopilot przełączy się automatycznie w tryb lądowania, czy też nie. Sugeruje to, że przy opracowywaniu i testach nowatorskiego oprogramowania systemu sterowania samolotem

A320 nie poświęcono należytej uwagi przypadkom szczególnym, które odbiegają od standardowych warunków lotu [2].

Pełne zautomatyzowanie systemów sterowania samolotem znacznie ułatwiło pracę pilotów i zwiększyło poziom bezpieczeństwa lotów, zwłaszcza w warunkach ograniczonej widoczności. Mimo starannego opracowywania oprogramowania komputerowych systemów sterowania oraz poddawania ich wielu testom i próbom dowodowym, czasem ich funkcjonowanie wymyka się spod kontroli. Taki przypadek miał miejsce 7.10.2008 r. podczas lotu Airbusa A330 australijskich linii Qantas. W tym dniu wykonywał on rutynowy rejs z Singapuru do Perth w zachodniej Australii, z 303 pasażerami i 12 członkami załogi. Po upływie blisko 3 godz. i 10 min od startu samoczynnie wyłączył się autopilot, a na ekranie systemu ECAM (Electronic Centralized Aircraft Monitoring) pojawiały się komunikaty o kolejnych awariach. Jednocześnie włączały się sprzeczne sygnały ostrzegające o zbyt małej i zarazem nadmiernej prędkości przyrządowej. Wśród wyświetlanych komunikatów znalazła się informacja o awarii bezwładnościowego systemu nawigacyjnego nr 1, zasilającego przyrządy dowódcy załogi. Jednocześnie na jego wyświetlaczu wystąpiły wahania wskazań wysokości i prędkości lotu. Po upływie 147 s od wyłączenia się autopilota nagle maszyna samoczynnie opuściła dziób i rozpoczęła strome zniżanie. W wyniku ujemnego przeciążenia personel pokładowy i nieprzypięci do foteli pasażerowie z dużą siłą uderzyli w panele sufitowe lub schowki bagażowe. Kapitan usiłował wyrównać lot, ale samolot nie reagował na ruchy drążka. Dopiero druga próba umożliwiła wyprowadzenie maszyny do lotu poziomego. Po chwili jednak ponownie opuściła ona dziób i rozpoczęła zniżanie. Tym razem kapitan szybciej zdołał odzyskać panowanie nad sterami. W zaistniałej sytuacji załoga podjęła decyzję o lądowaniu na oddalonym o ok. 150 km lotnisku w Learmonth. Z powodu awarii wielu systemów piloci musieli przejść dodatkowe obowiązki, ale lądowanie przebiegło bez zakłóceń. W wyniku oddziaływania dużych przeciążeń, 110 pasażerów i dziewięcioro członków załogi odniosło obrażenia.

Na podstawie analizy zarejestrowanych parametrów lotu komisja stwierdziła, że przyczyną niekontrolowanego zachowania australijskiej maszyny było błędne działanie urządzenia ADIRU 1 (Air Data Inertial Reference Unit) oraz nieprecyzyjne oprogramowanie komputerów w zautomatyzowanym systemie sterowania lotem. Airbus A330 jest wyposażony w trzy niezależne od siebie urządzenia ADIRU. Ich zadaniem jest generowanie aktualnych danych aerodynamicznych. W pewnym momencie ADIRU 1 zaczęło generować i wysyłać błędne dane dotyczące wysokości i kąta natarcia. Nieprawdziwe dane trafiały do komputerów systemu sterowania lotem oraz przyrządów na tablicy dowódcy załogi. Opracowany algorytm zabezpieczający zautomatyzowany system sterowania lotem przed wprowadzaniem błędnych danych okazał się więc nieskuteczny. Wspomniana wada oprogramowania nie została wykryta w trakcie testów kontrolnych i prób dowodowych. Ustalono, że przyczyną transmisji nieprawdziwych danych przez

ADIRU 1 było przyporządkowanie im niewłaściwych etykiet. Procesor tego urządzenia interpretował wysokość lotu wynoszącą 37 012 stóp (11 281 m) jako kąt natarcia o wartości $50,63^\circ$. W efekcie komputer natychmiast uruchomił zabezpieczenie przed przeciągnięciem i spowodował pochylenie maszyny o kąt $-8,4^\circ$. Komisji nie udało się ustalić przyczyny błędnego funkcjonowania procesora urządzenia ADIRU 1. Przyjęto, że prawdopodobną przyczyną błędów była niedostateczna odporność tego urządzenia na oddziaływanie niezidentyfikowanych czynników środowiskowych. W grudniu 2008 r. doszło do podobnego zdarzenia w innej maszynie A330 linii Qantas [2].

Przykładem niedopracowanego rozwiązania w zautomatyzowanym systemie sterowania lotem jest programator autopilota we wczesnych wersjach samolotu Airbus A320. W dniu 20.01.1992 r. tego typu maszyna, należąca do francuskich linii lokalnych Air Inter z 90 pasażerami i sześcioma członkami załogi wykonywała nocny lot z Lyonu do Strasburga. Przed rozpoczęciem zniżania piloci zostali poinformowani, że w użyciu jest pas 05, który nie był wyposażony w system ILS (Instrument Landing System). Wymagało to wykonania nieprecyzyjnego podejścia z wykorzystaniem radiolatarni VOR DME w warunkach braku widoczności. Przed rozpoczęciem podejścia końcowego kapitan wprowadził do programatora autopilota kąt zniżania wynoszący $3,3^\circ$. Podawane przez kontrolera błędne informacje dotyczące kursu lądowania spowodowały, że samolot zaczął się oddalać od osi pasa, a kilkadziesiąt sekund później zderzył się ze zboczem góry i stanął w płomieniach. Katastrofę przeżyło dziewięć osób, w tym jedna ze stewardess.

W toku śledztwa ustalono, że wpisując do programatora autopilota kąt zniżania $3,3^\circ$, w rzeczywistości kapitan zaprogramował prędkość opadania 3 300 stóp/min (16,8 m/s). Oba wymienione parametry były bowiem programowane za pomocą tego samego manipulatora, a na wyświetlaczu zadana wartość w obu przypadkach wyglądała identycznie i wynosiła 3,3. Jedyną różnicą było mało czytelne oznaczenie umieszczone nad ostatnią cyfrą, którego zdenerwowany kapitan nie zauważył. Nieświadomie zaprogramowana przez niego prędkość pionowa odpowiadała zniżaniu z kątem -11° . Ponadto okazało się, że samoloty A320 miały dość nietypową i mało znaną funkcję w zautomatyzowanym systemie sterowania lotem. W przypadku, gdy w reakcji na bodziec zewnętrzny załoga za pośrednictwem drążka sterowego lub autopilota zadawała nowy sygnał sterujący, komputer podwajał jego siłę. Analiza parametrów tragicznego lotu wykazała, że w momencie wprowadzenia przez kapitana polecenia zniżania z kątem $3,3^\circ$, w wyniku turbulencji samolot nieznacznie zwiększył swoją wysokość. Komputer zinterpretował to jako działanie mające na celu uniknięcie zagrożenia i rozpoczął obniżanie lotu z prędkością dwukrotnie większą od zadanej, czyli 6 600 stóp/min (33,5 m/s). Piloci linii Air Inter nie mieli świadomości istnienia tego rodzaju zabezpieczenia. Po tym wypadku koncern Airbus wprowadził zmiany w oprogramowaniu sterowania samolotem A320 oraz zróżnicował sposób wyświetlania zadanego kąta zniżania i prędkości pionowej [6].

Dobitnym przykładem sytuacji, w której przy opracowywaniu oprogramowania zautomatyzowanego systemu sterowania lotem nie trafnie oceniono potencjalne zagrożenia, jest samolot Boeing 737 w wersji MAX8. W tym przypadku głównym ich źródłem był brak informacji w dokumentacji technicznej i programach szkolenia o wprowadzeniu nowego modułu w układzie sterowania położeniem statecznika poziomego. Jest to również przykład kontrowersyjnego postępowania organu nadzoru lotniczego w procesie certyfikacji wspomnianej wersji samolotu. W dniu 29.10.2018 r. Boeing 737 MAX8 indonezyjskich linii Lion Air z 181 pasażerami i dziewięcioma członkami załogi wystartował z lotniska w Dżakarcie na wyspę Bangka. Maszyna zaledwie dwa miesiące wcześniej opuściła lotnisko fabryczne i rozpoczęła służbę w barwach indonezyjskiego przewoźnika. Tuż po starcie na sterownicy dowódcy załogi pojawiły się wibracje ostrzegające o groźbie przeciągnięcia. Jednocześnie włączył się główny alarm, sygnalizując rozbieżność wskazań prędkości i wysokości pomiędzy przyrządami obu pilotów. Aby dokonać oceny zaistniałej sytuacji, załoga poprosiła kontrolera o skierowanie w rejon holdingu. Zgodnie z instrukcją zawartą w liście kontrolnej piloci wyłączyli autopilota i automatyczny system sterowania zespołem napędowym, ale sytuacja nie uległa poprawie. Na wysokości 5 000 stóp (1 524 m), tuż po schowaniu klap, samolot niespodziewanie opuścił dziób i rozpoczął dość strome zniżanie. Kapitan z dużym trudem panował nad maszyną, która cyklicznie się wznosiła i opadała. Chcąc skupić się na rozwiązaniu powstałego problemu, dowódca załogi przekazał stery drugiemu pilotowi. Zapomniał jednak go poinformować, że z powodu niewystarczającej efektywności sterów wysokości konieczne jest trymowanie statecznika poziomego. Około 60 s później samolot runął do Morza Jawajskiego, powodując śmierć wszystkich osób na pokładzie.

Dzień przed tragicznym lotem w indonezyjskim Boeingu wymieniono lewy czujnik kąta natarcia. Na podstawie zapisów rejestratora parametrów lotu ustalono, że rozbieżność wskazań pomiędzy oboma czujnikami wynosiła aż 21°. Świadczyło to o niewykonaniu przez mechanika kalibracji nowo zabudowanego czujnika. W samolotach Boeing 737 MAX8 dane z czujników kąta natarcia są wykorzystywane także do obliczania prędkości i wysokości lotu. Badając przyczyny wypadku komisja odkryła, że w wersji MAX8 producent zainstalował dodatkowy moduł wspomagający sterowanie trymerem statecznika poziomego, o nazwie MCAS (Maneuvering Characteristics Augmentation System). W przypadku wystąpienia dużych kątów natarcia jego zadaniem było zapobieganie groźbie przeciągnięcia, poprzez automatyczne opuszczenie dziobu maszyny. Wspomniany moduł uruchamiał się automatycznie w sytuacji, gdy przy wyłączonym autopilocie i schowanych klapach nadmiernie wzrastał kąt natarcia. Okazało się przy tym, że omawiany system pobierał dane tylko z lewego czujnika kąta natarcia, co stało w sprzeczności z zasadą nadmiarowości struktury bezpieczeństwa. Wprowadzenie modułu MCAS było konsekwencją modernizacji samolotów typu Boeing 737, a zwłaszcza zastosowania nowej jednostki napędowej. Zwiększone gabaryty silników wymusiły przesunięcie ich do przodu

i uniesienie wlotów, aby w ten sposób zapewnić wymaganą odległość od podłoża. Wprowadzone zmiany spowodowały, że przy małych prędkościach zmodernizowana maszyna miała tendencję do samoczynnego zwiększania kąta natarcia, zwłaszcza w pozycji z uniesionym dziobem. Informacje o module MCAS nie zostały zamieszczone w instrukcji użytkownika w locie, ani też nie znalazły odzwierciedlenia w programach szkolenia pilotów. Podczas procesu certyfikacji koncern Boeing zdołał przekonać władze FAA, że nie ma takiej potrzeby, gdyż system MCAS funkcjonuje całkowicie poza kontrolą załogi, a sterowanie samolotem MAX niczym nie różni się od pilotowania wcześniejszych wersji maszyn typu 737. W konsekwencji, nie została opracowana lista kontrolna na wypadek pojawienia się problemów z tym systemem. Przyjęte przez konstruktorów założenia okazały się jednak błędne. Nie uwzględniały bowiem sytuacji awaryjnych, a także nietrafnie przewidywały reakcję załogi w sytuacji niewłaściwego funkcjonowania modułu MCAS. Cztery miesiące po tragedii nad Morzem Jawajskim doszło do identycznego wypadku samolotu Boeing 737 MAX8. Tym razem maszyna linii Ethiopian Airlines rozbiła się tuż po starcie z lotniska w Addis Abebie. Życie straciło 149 pasażerów i ośmioro członków załogi. Należy zwrócić uwagę, że etiopscy piloci dysponowali już informacjami na temat systemu MCAS i znali procedurę postępowania w przypadku jego awarii, a mimo to nie zdołali odzyskać panowania nad maszyną. Po katastrofie w Addis Abebie FAA nadal zapewniała, że samoloty typu Boeing 737 MAX8 spełniają obowiązujące wymagania w zakresie bezpieczeństwa. Władze lotnicze większości państw użytkujących tę wersję zawiesiły jednak wykonywanie na nich lotów. Ostatecznie FAA również podjęła taką decyzję. Boeing 737 w wersji MAX8 powrócił do służby dopiero w styczniu 2021 r. [4].

Niekiedy nawet z pozoru mało istotne czynniki wpływają na przebieg zdarzeń prowadzący do ciężkiego wypadku. W dniu 31.07.1992 r., mając na pokładzie 99 pasażerów i 14 członków załogi, Airbus A310 linii Thai Airways International podchodził do lądowania na otoczonym wysokimi górami lotnisku w Katmandu (Nepal). Przy niskiej podstawie chmur i braku widoczności, z powodu usterki technicznej układu wypuszczenia kłap, załoga musiała przerwać podejście, wykonać zakręt o 180° i ponowić próbę lądowania. Kapitan nieświadomie wykonał jednak pełen zakręt o 360° i po kilku minutach, lecąca na wysokości 3 500 m maszyna zderzyła się z niemal pionową ścianą skalną, powodując śmierć wszystkich osób na pokładzie. Komisja prowadząca dochodzenie ustaliła, że przypadkowo doszło do koincydencji cyfr określających kurs do nowego punktu nawigacyjnego 202° z dotychczasowym kursem 022°. Uznano, że do tragicznej pomyłki przyczynił się m.in. brak literowych oznaczeń na wskaźnikach kursu, określających główne kierunki nawigacyjne: N (*north*), S (*south*), E (*east*) i W (*west*) [2].

Podobny charakter miał wypadek samolotu Airbus A300 linii Pakistan International Airlines, do którego doszło w trakcie podejścia do lądowania na tym samym lotnisku niespełna dwa miesiące później. Na jego pokładzie znajdowało się 155 pasażerów i 12 członków załogi. Podczas zniżania, w warunkach braku widoczności, maszyna

znalazła się poniżej wyznaczonej ścieżki schodzenia i zderzyła się z grzbietem góry, powodując śmierć wszystkich osób na pokładzie. Jak ustalono, przyczyną katastrofy było błędne odczytywanie przez drugiego pilota opracowanej w niezbyt przejrzysty sposób karty podejścia. Komisja stwierdziła, że przyczynił się do tego m.in. brak na sterownicach klipsów umożliwiających przypięcie kart z aktualnie wykorzystywanymi danymi. Uwolniłoby to pilotów od konieczności trzymania ich w dłoni i dzięki temu, pozwoliło uniknąć groźby przysłonięcia części danych kciukiem.

4. Wnioski i podsumowanie

Z przeprowadzonej analizy zdarzeń w lotnictwie komunikacyjnym wynika, że wśród czynników związanych z działalnością producenta statku powietrznego błędy i nieprawidłowości w projektowaniu i konstruowaniu są najczęstszym źródłem zagrożeń dla bezpieczeństwa operacji lotniczych.

Obecnie najpoważniejsze problemy wiążą się z opracowaniem oprogramowania systemów pokładowych, a zwłaszcza zautomatyzowanego systemu sterowania lotem. Niepokojącym zjawiskiem dotyczącym wielu typów samolotów komunikacyjnych jest całkowity brak lub nadmierne ograniczanie przez producentów statków powietrznych informacji na temat niektórych funkcji oprogramowania zautomatyzowanego systemu sterowania lotem. Z tego powodu zdarza się, że w pewnych sytuacjach piloci są zaskakiwani nietypową i niezrozumiałą dla nich reakcją maszyny. Aby skutecznie eliminować źródła potencjalnych zagrożeń dla bezpieczeństwa latania, producenci statków powietrznych powinni w sposób ciągły monitorować proces ich eksploatacji. Praktyka wskazuje jednak, że w wielu przypadkach dochodzi do zaniedbań w tej dziedzinie. Często dopiero poważny wypadek mobilizuje producentów oraz organy nadzoru lotniczego do podjęcia skutecznych działań.

5. Literatura

1. National Transportation Safety Board, "Aircraft Accident Report, American Airlines Inc., McDonnell Douglas DC-10-10, N103AA Near Windsor, Ontario, Canada, June 12, 1972", USA, 1973.
2. Z. Uchman, „Geneza wypadków w lotnictwie komunikacyjnym”, Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2023.
3. National Transportation Safety Board, Washington, D.C. 20594, "Aircraft Accident Report, In-flight Breakup Over the Atlantic Ocean Trans World Airlines Flight 800 Boeing 747-131, N93119 Near East Moriches, New York July 17, 1996", USA, 2000.

4. National Transportation Safety Board, "Aircraft Accident Report, Aloha Airlines, Flight 243 Boeing 737-200, N73711 near Maui, Hawaii, April 28, 1988", NTSB/AAR-89/03, USA, 1989.
5. The Bureau of Aircraft Accidents Archives: <https://www.baaa-acro.com/crash/crash-boeing-737-297-kahului-1-killed>.
6. Ministry of Transport and Tourism, Commission of Investigation into the accident on 20 January 1992 of Airbus A320 F-GGED near Mont Sainte-Odile (Bas-Rhin), "Official Report of the Commission of Investigation into the Accident on 20 January 1992 near Mont Sainte Odile (Bas-Rhin) of the Airbus A.320 Registered F-GGED operated by Air Inter", Francja, 1993.
7. Komite Nasional Keselamatan Transportasi Republic of Indonesia, "Final KNKT.18.10.35.04 Aircraft Accident Investigation Report pt. Lion Mentari Airlines Boeing 737-8 (MAX); PK-LQP, Tanjung Karawang, West Java, Republic of Indonesia, 29 October 2018", Indonezja, 2019.

