Katarzyna Kania

III rok studia inżynierskie, specjalność: statki powietrzne
Politechnika Warszawska

Piotr Kania

II rok studia magisterskie, specjalność: drogi i lotniska
Politechnika Wrocławska

ZIELONY TAXIING I ZIELONE LOTNISKA JAKO INNOWACJE W PROCESIE ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU I OPTYMALIZACJI KOSZTÓW LOTNICTWA PASAŻERSKIEGO

Wstęp

Optymalizacja kosztów lotnictwa pasażerskiego to proces systematycznego dążenia do obniżania kosztów funkcjonowania tej branży. Osiągnięciu tego celu służą zrównoważone opcje technologiczne, które nie tylko optymalizują koszty funkcjonowania lotnictwa pasażerskiego, ale także wpływają na środowisko naturalne poprzez zmniejszenie emisji zanieczyszczeń w postaci np. dwutlenku węgla i gazów cieplarnianych, a także hałasu. Należy prognozować, że wraz ze wzrostem pasażerskiego ruchu lotniczego wpływ samolotów na emisję zanieczyszczeń środowiska będzie coraz większy. Jednocześnie będzie rosło zainteresowanie zrównoważonymi innowacjami, których koszt implementacji nie przewyższy potencjalnych oszczędności. Celem niniejszego artykułu jest scharakteryzowanie podstawowych innowacji w lotnictwie, ze szczególnym uwzględnieniem zielonego kołowania (*green taxiing)* i zielonych lotnisk *(green airports)* oraz próba odpowiedzi na pytanie, czy wyszczególnione innowacje należą do rozwiązań pozwalających zoptymalizować lotnictwo pasażerskie pod względem kosztów funkcjonowania oraz opłacalności środowiskowej. Aby osiągnąć założony cel badawczy przedstawiony został wpływ lotnictwa cywilnego na środowisko. W dalszej kolejności przedstawione zostały innowacje pozwalające obniżyć koszty lotnictwa pasażerskiego z punktu widzenia efektywności paliwowej oraz zmniejszenia wpływu branży na środowisko naturalne. W opracowaniu zastosowana została analiza opisowa, z której wynika, że w najbliższych latach inwestycje w zrównoważone innowacje stanowić będą niewątpliwie wyzwanie dla producentów samolotów i inżynierów lotnisk oraz całej branży lotnictwa pasażerskiego.

1. Koszty lotnictwa pasażerskiego

Lotnictwo cywilne obejmuje wszystkie rodzaje lotnictwa z wyjątkiem lotnictwa państwowego[1]. Branża lotnictwa pasażerskiego, będącego częścią lotnictwa cywilnego, jest ważnym motorem napędowym wzrostu społeczno-gospodarczego, tworząc miejsca pracy, wspierając turystykę i lokalne przedsiębiorstwa oraz stymulując inwestycje zagraniczne i handel międzynarodowy. Od 1995 roku światowa gospodarka mierzona produktem krajowym brutto rosła w tempie 2,8% rocznie, podczas gdy światowy pasażerski ruch lotniczy (wyrażony w pasażerokilometrach) rósł w średnim rocznym tempie wynoszącym 5,0%[2]. Branża lotnictwa pasażerskiego to blisko 90 milionów miejsc pracy na całym świecie oraz ponad 4% światowego PKB[3].

W kontekście problematyki badawczej niniejszego opracowania, wśród wielu kryteriów podziału kosztów, których ponoszenie stanowi warunek konieczny prowadzenia działalności gospodarczej skutkującej generowaniem przychodów, należy zwrócić szczególną uwagę na koszty własne podmiotów przewozowych lotnictwa pasażerskiego. W strukturze kosztów rodzajowych przedsiębiorstw odpowiedzialnych za przewozy lotnicze wyróżnia się koszty bezpośrednie (płace załóg lotniczych, materiały, inne koszty zakupu, obsługa techniczna samolotów, amortyzacja samolotów, ubezpieczenia samolotów, koszty specjalne, koszty startów i lądowań, koszty usług obcych) oraz pośrednie (koszty utrzymania służb własnych przewoźników w portach i miastach, koszty obciążające usługi z tytułu utrzymania zarządu przedsiębiorstwa, pionu eksploatacji, koszty handlowe). Natomiast z punktu widzenia podziału na koszty stałe i zmienne, dzieli się je na stałe przewoźnika: bezpośrednie (stałe koszty osobowe personelu, amortyzacja samolotów, ubezpieczenie samolotów, stała część bezpośrednich kosztów obsługi technicznej i remontów) i pośrednie (pośrednie koszty obsługi technicznej, stałe koszty sprzedaży i reklamy, koszty administracyjne) oraz koszty zmienne przewoźnika, które dotyczą samolotów (zmienna część kosztów osobowych personelu, koszty paliwa lotniczego, opłaty nawigacyjne, lotniskowe, postój w portach lotniczych, zmienna część kosztów obsługi technicznej i remontów, opłaty za usługi handlingowe) i pasażerów (opłaty pasażerskie w portach lotniczych, inne zmienne koszty obsługi pasażerów, inne zmienne koszty sprzedaży, ubezpiecze-

[1] Ustawa z dnia 3 lipca 2002 r. o prawie lotniczym, Dz. U. 2002, poz. 1112, art. 1.

[2] *Facts and Figures*, World Aviation and the World Economy, https://www.icao.int/ sustainability/Pages/Facts-Figures_WorldEconomyData.aspx (dostęp: 24.02.2023).

[3] *Commitment to Fly Net Zero*, https://aviationbenefits.org/flynetzero/ (dostęp: 24.02.2023).

nie pasażerów)[4]. Bezpośrednie koszty operacyjne związane z tankowaniem, usługami obsługi naziemnej, opłatami lotniskowymi i nawigacją stanowią większość wydatków linii lotniczych[5]. Na rynku lotniczym koszty funkcjonowania mogą być tożsame z kosztami zarządzania bezpieczeństwem przez wzgląd na złożoność tego rynku oraz dynamikę zmian, którym ulega w czasie[6].

Każde przedsiębiorstwo, a więc też lotnicze, dąży do ograniczania kosztów swojej działalności. Optymalizacja kosztów w lotnictwie pasażerskim może się odbywać poprzez zrównoważone innowacje, dotyczące zmian w produktach (dobrach, usługach) oraz procesach, których celem będzie generowanie długoterminowych korzyści ekonomicznych, społecznych oraz środowiskowych. Kreowanie innowacji zorientowanych na zrównoważony rozwój (*sustainability-oriented innovations*), wymagając myślenia systemowego, dostarcza wskazówek, jak cała branża może stać się zrównoważona[7].

Istotnymi czynnikami działalności branży lotnictwa pasażerskiego są rosnące ceny paliw oraz opłaty dotyczące ochrony środowiska naturalnego, które wpływają na wzrost kosztów funkcjonowania branży. W kosztach przelotu samolotu największy udział mają koszty zakupu paliwa lotniczego[8]. Innowacje w lotnictwie pasażerskim podyktowane dążeniem do optymalizacji kosztów ekonomiczno-społecznych, w tym środowiskowych, dotyczą nowych technologii mających zastosowanie w eksploatacji samolotów oraz działalności lotnisk. Koszty te związane są z rachunkiem ekonomicznym oraz niekorzystnymi skutkami działalności gospodarczej, odczuwanymi przez osoby trzecie. Koszty społeczne to koszty zewnętrzne w postaci np. zanieczyszczenia powietrza czy hałasu[9]. Koszty środowiskowe to wyrażone w pieniądzu świadome zużycie zasobów rzeczowych, pracy i usług obcych w celu zachowania równowagi środowiskowej[10]. Koszty środowiskowe związane są z działaniami na rzecz ochrony środowiska i z oddziaływaniem na środowisko[11]. Innymi słowy, są to

---

[4] D. Tłoczyński, *Koszty funkcjonowania pasażerskiego rynku transportu lotniczego*, „Logistyka" 2014, nr 2.

[5] *Aircraft direct operating costs heading into a smooth and rapid descent*, https://cordis.europa.eu/article/id/430264-aircraft-direct-operating-costs-heading-into-a-smooth-and-rapid-descent/pl (dostęp: 24.02.2023).

[6] M. Rutkowski, *Fazowy charakter kosztów bezpieczeństwa w lotnictwie cywilnym*, „Przegląd Komunikacyjny" 2019, nr 2.

[7] R. Adams et al., *Sustainability-Oriented Innovation: A Systematic Review*, „International Journal of Management Reviews" 2016, vol. 18, issue 2, s. 31.

[8] *Ile kosztuje tankowanie samolotu? Te kwoty robią wrażenie*, https://businessinsider.com.pl/finanse/ile-kosztuje-tankowanie-samolotu-ceny-paliwa-lotniczego/y9vc2z1 (dostęp: 24.02.2023).

[9] S. Marciniak, *Makro i Mikro Ekonomia dla inżynierów*, PWN, Warszawa 1995, s. 78.

[10] P.P. Małecki, M. Urbaniec, *Koszty środowiskowe w Polsce w ujęciu teoretycznym i statystycznym*, „Optimum. Studia Ekonomiczne" 2014, nr 3, s. 89.

[11] H. Dimitroff-Regatschnig, H. Schnitzer, Ch. Jasch, *Manual for environmental cost accounting: Effects on the resource and energy efficiency of production*, „European Regional Science Association" 2002, s. 282.

koszty związane z korzystaniem z zasobów środowiska naturalnego i obejmują m.in. opłaty za emisję zanieczyszczeń powietrza[12].

2. Oddziaływanie lotnictwa cywilnego na środowisko i klimat

Do 2050 roku globalne operacje lotnictwa cywilnego mają osiągnąć zerową emisję dwutlenku węgla netto. Przyczynić ma się do tego transformacja energetyczna oraz innowacje w sektorze lotniczym, a także współpraca międzynarodowa[13]. Powstaje pytanie, czy rzeczywiście emisja dwutlenku węgla to największy problem w aspekcie wpływu lotnictwa cywilnego na środowisko i klimat? Przy odpowiedzi istotne są dwie kwestie. Pierwsza to jak najmniejsze zużycie paliwa przy możliwie niskiej emisji zanieczyszczeń. Druga zaś dotyczy niezawodności lotniczych układów napędowych, podatności na zmiany obciążeń, lekkiej konstrukcji i odpowiedniej odporności na warunki otoczenia. Zatem ważniejsze od wymagań ekologicznych jest bezpieczeństwo samolotu i konkurencyjność rynkowa[14]. Z kolei na zmiany klimatu lotnictwo wpływa poprzez migrację zanieczyszczeń związkami mało reaktywnymi wprowadzanymi do otoczenia na wysokościach przelotowych[15]. Lotnictwo cywilne wpływa nie tylko na jakość powietrza, ale związane jest także z emitowaniem hałasu przez startujące i lądujące samoloty[16]. Warto w tym miejscu dodać, że w 2020 roku nastąpiło ograniczenie wolumenu przewozów, związane z ogłoszeniem pandemii COVID-19, co doprowadziło do znacznych redukcji emisji, ale jest to oczywiście efekt przejściowy[17].

Mimo że samoloty pasażerskie spalają ogromne ilości nafty lotniczej, to czynią to na długich dystansach. W efekcie, z punktu widzenia pasażerokilometrów, lotnictwo cywilne należy do jednego z najczystszych środków transportu – charakteryzuje się niskim zużyciem paliwa, a co z tego wynika niską emisją dwutlenku węgla. W przypadku lotnictwa pasażerskiego najistotniejszym problemem w kontekście wpływu na środowisko i klimat jest to, że silniki lotnicze emitują parę wodną oraz tlenki azotu. Para wodna stanowi naturalny produkt spalania węglowodorów i jest gazem cieplarnianym, który jest bardziej niebezpieczny niż

[12] E. Hellich, M. Klonowska, *Rachunek kosztów ochrony środowiska* [w:] *Zarządzanie kosztami jakości, logistyki, innowacji, ochrony środowiska a rachunkowość finansowa*, red. A. Karmańska, Wydawnictwo Difin, Warszawa 2007, s. 172.

[13] *Commitment to*….

[14] M. Kamiński et al., *Emisja zanieczyszczeń z sektora transportu lotniczego i jej wpływ na zdrowie człowieka*, „Kosmos" 2016, nr 4, s. 487–493.

[15] W.A. Schäfer, A.I. Waitz, *Air transportation and environment*, „Transport Policy" 2014, no 34.

[16] M. Jeż, *Ekologiczne problemy portu lotniczego*, „Prace Instytutu Lotnictwa" 2010, nr 206, s. 59–71.

[17] *Emissions of air pollutants from transport in Europe*, https://www.eea.europa.eu/ims/emissions-of-air-pollutants-from (dostęp: 24.02.2023).

dwutlenek węgla. Przede wszystkim chodzi o tworzenie się smug kondensacyjnych w stratosferze. Wzrost emisji tlenków azotu jest z kolei konsekwencją dążenia do obniżania zużycia paliwa. W celu obniżenia zużycia paliwa podwyższa się bowiem sprawność silnika, poprzez wzrost temperatury, w której prowadzi się spalanie, a to powoduje, że spalać się zaczyna również azot znajdujący się w powietrzu zassanym do wnętrza komory spalania silnika, co w efekcie prowadzi wprawdzie do mniejszej emisji dwutlenku węgla i pary wodnej, ale często towarzyszy temu procesowi większa emisja tlenków azotu, które mogą powodować kwaśne deszcze[18].

Oprócz wspomnianego już hałasu, jako zanieczyszczenia emitowanego przez samoloty, dodać należy jeszcze jeden czynnik wpływający na środowisko, a mianowicie: każdy z samolotów musi zostać kiedyś poddany recyclingowi lub ulec katastrofie, a przecież każdy zawiera materiały niebezpieczne[19]. Oprócz emisji tlenków azotu i pary wodnej lotnictwo pasażerskie emituje także tlenki siarki i sadzę – wszystkie one wpływają na zmianę właściwości atmosfery. Ponadto, przelatujące na dużych wysokościach samoloty tworzą chmury pierzaste, które zwłaszcza nocą dają efekty podgrzewający. Latanie samolotem generuje także różnego rodzaju śmieci, w tym jednorazowe opakowania, których produkcja i utylizacja nie pozostaje bez wpływu na środowisko. Szacuje się, że rocznie podczas lotów powstaje ponad 5,7 mln ton odpadów[20]. Udział transportu lotniczego w całkowitej emisji gazów cieplarnianych w 2019 roku w UE wynosił 0,4% w przypadku transportu krajowego i 3,4% międzynarodowego (podobnie było w przypadku żeglugi), podczas gdy transport drogowy odpowiadał za 20,5%, a pozostałe sektory za 71,5%[21].

3. Innowacje w zakresie redukcji kosztów paliwa i ochrony środowiska w lotnictwie cywilnym

Lotnictwo cywilne posiada istotne znaczenie we współczesnej gospodarce. Samoloty zwiększają swój zasięg, lepiej przyspieszają, a przy tym stają się coraz bardziej oszczędne[22]. Ten ostatni aspekt staje się jednocześnie wyzwaniem dla przyszłego bezpieczeństwa pasażerów. Dążąc do obniżenia kosztów, montuje się siedzenia w samolotach coraz bliżej siebie, co oznacza więcej pasażerów na tym

[18] C. Galiński, *Wybrane zagadnienia projektowania samolotów*, Biblioteka Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2016, s. 38–39.

[19] *Ibidem*.

[20] *Jaki wpływ na środowisko ma latanie samolotem?*, https://www.green-projects.pl (dostęp: 24.02.2023).

[21] *Emisje z samolotów i statków: fakty i liczby (infografika)*, https://www.europarl.europa.eu/news/pl (dostęp: 24.02.2023).

[22] *Techniczne nowinki w samolotach i nie tylko*, https://mlodytechnik.pl/technika/ (dostęp: 24.02.2023).

samym rejsie, większe przychody ze sprzedaży biletów oraz niższe koszty lotu w przeliczeniu na fotel, ale jednocześnie może stanowić problem w przypadku ewakuacji dużej liczby pasażerów[23].

W lotnictwie pasażerskim pojawiają się udoskonalenia dotyczące budowy samolotu np. kabiny pilotów, ale także lotnisk, np. w zakresie ich energooszczędności. Innowacje zarówno w samolotach, jak i na lotniskach skupiają się na redukcji kosztów paliwa (efektywności paliwowej) oraz ograniczeniu negatywnego wpływu lotnictwa na środowisko naturalne. Uwzględnienie tych dwóch aspektów leży u podstaw poszukiwania zrównoważonych innowacji, których efektem będzie zrównoważone lotnictwo cywilne (rys. 1).

Rysunek 1. Aspekty determinujące zrównoważone lotnictwo cywilne
Źródło: opracowanie własne.

Większa oszczędność paliwa nie tylko wpływa na obniżenie kosztów działalności lotnictwa, ale też zmniejsza jej negatywny wpływ na środowisko. Poszukiwanie sposobów na zwiększenie efektywności paliwowej skutkuje przemianami konstrukcyjnymi, w postaci np. smuklejszych i bardziej elastycznych skrzydeł, które pozwalają na naturalny, laminarny przepływ powietrza i aktywną kontrolę tego przepływu, uwzględniając eliminację drgań[24]. Innowacje w tym zakresie wpływają na zmniejszenie oporu powietrza, a tym samym zmniejszenie zużycia paliwa. Wpływ lotnictwa na środowisko naturalne w dużym stopniu determinowany jest konstrukcją silników, która wpływa np. na jakość spalania paliwa oraz aerodynamiką kadłuba, od której zależy intensywność generowanego hała-

[23] *W samolotach coraz więcej seniorów i osób z niepełnosprawnością. Za oceanem chcą zmienić zasady ewakuacji*, https://www.money.pl/ (dostęp: 24.02.2023).
[24] *Techniczne nowinki…*

su[25]. Niektóre innowacje np. skrzydła składane w locie powstały wprawdzie już w latach 60. XX wieku, ale towarzyszyły im ciężkie i duże silniki konwencjonalne oraz układy hydrauliczne, niepozostające bez wpływu na stabilność i efektywność samolotu. Ewolucja w tym zakresie dotyczyła poszukiwania innowacyjnego materiału, w celu uzyskania korzyści aerodynamicznych, a zatem materiału, który byłby lekki i wytrzymały. I tak powstała nowa technologia w zakresie zmiennej geometrii, która została scharakteryzowana jako pierwsza w tabeli 1. Również wspomnieć należy o coraz szerzej wykorzystywanych kompozytach, które także charakteryzują się lekkością i wytrzymałością.

Poprawa aerodynamiki samolotów pasażerskich wpływa na zmniejszenie oporu powietrza i w efekcie prowadzi do płynniejszego lotu, co skutkuje zmniejszeniem zużycia paliwa, a tym samym zmniejszeniem emisji dwutlenku węgla do środowiska. W tabeli 1 przedstawione zostały wybrane rozwiązania zrównoważone dotyczące budowy samolotów oraz alternatywnego paliwa (SAF)[26]. Celem tych rozwiązań jest zwiększona efektywność tradycyjnego paliwa (mniejsze jego zużycie) oraz związane z tym ograniczenie emisji zanieczyszczeń do środowiska. Do innowacji służących bezpieczeństwu w lotnictwie cywilnym można zaliczyć udoskonalenia techniczne w kokpicie, np.: cyfrowe bliźniacze systemy, pozwalające jednocześnie na obniżenie kosztów konserwacji urządzeń; rozszerzoną rzeczywistość dla pilota, mającą nie tylko ułatwić wykrywanie problemów i zagrożeń, ale także zapobieganie im oraz systemy wizyjne (SVS/EVS), umożliwiające pilotom lądowanie w warunkach słabej widoczności. W dalszej przyszłości planuje się zastosowaniu sztucznej inteligencji, czyli kokpitu bez pilotów. Póki co, poszukując innowacji, których rezultatem będą oszczędności, projektuje się systemy dotyczące standardu samolotowych wnętrz nie tylko dla załogi, ale też dla pasażerów np. rozwiązania dotyczące schowków na bagaż podręczny[27]. Do innowacji branży lotniczej należy też paliwo alternatywne, które zostało scharakteryzowane w tabeli 1 jako ostatnie wśród zrównoważonych innowacji lotnictwa pasażerskiego.

Tabela 1. Zrównoważone innowacje w lotnictwie pasażerskim

Innowacja	Charakterystyka	Skutki
zmienna geometria, umożliwiająca składanie skrzydeł pod różnymi kątami	technologia, dzięki której samoloty mogą podczas lotu, składać zewnętrzne części skrzydeł i ich powierzchnie sterujące do optymalnych kątów	korzyści aerodynamiczne dzięki zastosowaniu innowacyjnego lekkiego materiału - systemy mogą ważyć nawet o 80% mniej niż systemy tradycyjne, dzięki czemu samolot jest bardziej paliwooszczędny i łatwiej kołuje

[25] R. Łapucha, *Komory spalania silników turbinowo-odrzutowych: procesy, obliczenia, badania*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2004.

[26] *Green airport infrastructure*, https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/airports/green-airport-infrastructure (dostęp: 24.02.2023).

[27] *Techniczne nowinki*…

korpus ze skrzydłem rozmytym (BWB – *Blended Wing Body*)	konstrukcja zintegrowana samolotu, aby nie występowała widoczna linia podziału pomiędzy skrzydłem a kadłubem	zmniejszenie oporu powietrza i wagi samolotu, co oznacza mniejsze zużycie paliwa, a tym samym zmniejsza emisję CO_2
zagięte ku górze zakończenia skrzydeł – *Blended Winglets*	zostały zaprojektowane z płynniejszym przejściem ze skrzydła do wingleta	zmniejszenie oporu indukowanego, mniejsze zużycie paliwa, mniejsza emisja węgla i tlenków azotu, zmniejszenie turbulencji i zmniejszenie emisji hałasu
pasywne skrzydło aeroelastyczne (PAT – *Passive Aeroelastic Tailoring*)	konstrukcja jest lżejsza i bardziej elastyczna w porównaniu z tradycyjnymi skrzydłami	maksymalizacja wydajności konstrukcji, zmniejszenie masy samolotu i oszczędność paliwa
trawienie warstwy przyściennej (BLI – *Boundary Layer Ingestion*)	lokalizacja silników powyżej skrzydła i na ogonie umożliwia stosowanie silników o większych średnicach; turbowentylatory lub silniki zasilane elektrycznie osadzone w ogonie "połykają" warstwę przyścienną	przyspieszając powietrze, zmniejsza się opór wywierany przez warstwę przyścienną, a zmniejszenie oporu aerodynamicznego prowadzi do zmniejszenia zużycia paliwa i zmniejszenia kosztów użytkowania samolotu oraz zmniejszenia zanieczyszczenia atmosfery
aktywna kontrola powierzchni sterowych	celem nowych strategii jest poprawa aerodynamiki samolotu	zmniejszenie oporu powietrza nawet o ok. 25%, co skutkuje płynniejszym lotem i w rezultacie prowadzi do zmniejszenia zużycia paliwa i emisji CO_2
samoloty bez okien	zastąpienie okien przez ekrany, które dzięki kamerom i połączeniom światłowodowym mogą wyświetlać widok z zewnątrz	prostsza konstrukcja kadłuba bez konieczności zabudowywania okien, mniejsze naprężenia, a dzięki temu samolot jest szybszy, tańszy i bardziej ekologiczny zarówno w budowie, jak i eksploatacji
paliwo alternatywne (SAF – *Sustainable Aviation Fuels*)	niekonwencjonalne paliwo lotnicze typu drop-in (biopaliwa o składzie chemicznym identycznym z konwencjonalnymi paliwami) i jest produkowane z surowców odnawialnych	może w krótkim okresie ograniczyć emisje lotnicze w całym cyklu życia

Źródło: opracowanie własne na podstawie: R. Bielawski, *Wybrane zagadnienia z budowy statków powietrznych*, Akademia Obrony Narodowej, Warszawa 2015; B. Smith e*t al.*, *Passive Aeroelastic Tailoring*, NASA, Virginia 2020; *Blended Wing Body – A potential new aircraft design*, https://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/FS-2003-11-81-LaRC.html (dostęp: 24.02.2023); *Techniczne nowinki…*; *Green Airport…*; *What is SAF?*, https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-what-is-saf.pdf (dostęp: 24.02.2023); *Zrównoważone paliwa lotnicze (SAF) — nowa droga do dekarbonizacji*, https://geodis.com/pl/blog/zrownowazony-rozwoj/ (dostęp: 24.02.2023), M. Caetano, C. Jorge, *Innovation System in Air Transport Management*, „Journal of Information Systems and Technology Management" 2019, nr 16; H. Nakamura, Y. Kajikawa, S. Suzuki, *Innovation for Sustainability in Aviation: World Challenges and Visions*, 2011, https://www.researchgate.net/publication/286972667_Innovation_for_sustainability_in_aviation_World_challenges_and_visions.

Istotnymi innowacjami w procesie zrównoważonego rozwoju i optymalizacji kosztów lotnictwa pasażerskiego jest tzw. zielone kołowanie (*green taxiing*) oraz zielone lotniska (*green airports*), których celem jest poprawa wydajności operacyjnej linii lotniczej, poprzez zmniejszenie kosztów paliwa i ograniczenie emisji dwutlenku węgla i innych emisji do środowiska.

4. Green taxiing – szansa dla polskiej technologii

Tradycyjnie kołowanie samolotów między terminalem a pasem lotniczym z wykorzystaniem silników głównych, wymaga znacznego zużycia paliwa[28], a jego część (ok. 6-7%) zużywana jest podczas naziemnej operacji lotniczej (LTO – *landing and take-off*). Średni czas kołowania do terminalu i z powrotem na start, tzw. *taxiing* wynosi 36 minut[29]. Koszty wiążą się przede wszystkim ze zużytym paliwem, zanieczyszczeniem środowiska, hałasem, niszczeniem opon i sprzątaniem pasów startowych z resztek opon. Poszukując rozwiązania tych problemów, innowacje dążą w kierunku opracowania urządzeń umożliwiających kołowanie bez konieczności używania głównych silników samolotu (tzw. kołowanie „na prądzie"), które dodatkowo wpływają na redukcję hałasu. W celu zwiększenia marży zysku i obniżenia ogólnych kosztów operacyjnych należy zmniejszyć koszty operacyjne na lotnisku. Jedną z takich zrównoważonych praktyk jest stosowanie generatora APU (Auxiliary Power Unit) wspieranego przez pojedynczy silnik podczas kołowania statku powietrznego, a tę metodę można dalej zoptymalizować pod względem kosztów i opłacalności środowiskowej. Spośród innowacyjnych rozwiązań należy zwrócić uwagę na EGTS – *Electric Green Taxiing System.* Wykorzystując generator APU do napędzania silników na głównych kołach, EGTS umożliwia samolotowi odpychanie bez wsparcia zewnętrznego holownika, a następnie kołowanie bez konieczności używania głównych silników samolotu. Jedno koło na każdym głównym biegu jest wyposażone w silnik elektryczny, przekładnię redukcyjną i zespół sprzęgła do napędzania samolotu, podczas gdy energoelektronika i kontrolery systemowe dają pilotom całkowitą kontrolę nad prędkością i kierunkiem samolotu podczas operacji kołowania[30]. Elektryczne kołowanie przenosi wydajność samolotu na nowy poziom

[28] *Electric taxiing takes aircraft efficiency to a new level*, https://aviationbenefits.org/case-studies/ (dostęp: 24.02.2023).

[29] A.J. Szymysł, *Zielone kołowanie na lotniskach*, „Tygodnik Przegląd" 2021, nr 38, https://www.tygodnikprzeglad.pl/zielone-kolowanie-lotniskach/ (dostęp: 24.02.2023).

[30] *Hybrid Planes: The Power of Green Tarmac Taxiing*, https://www.finchandbeak.com/1075 (dostęp: 24.02.2023); *Electric Green Taxiing System (EGTS) for Aircraft*, https://tec.ieee.org/newsletter/march-april-2014/ (dostęp: 24.02.2023); *Why Do Airlines Continue To Resist Electric Taxi Motors?*, https://

i jest szczególnie ukierunkowane na samoloty krótko- i średniodystansowe, spędzające stosunkowo dużo czasu na kołowaniu w porównaniu z czasem spędzonym w powietrzu. W porównaniu z typową operacją kołowania z dwoma silnikami szacuje się, że zastosowanie EGTS zmniejsza emisję CO_2 o 61%, NOx o 51%, niespalonych węglowodorów o 62% i CO o 73[31].

EGTS, tak jak i ATS (*Aircraft Towing System*)[32], ze względu na ograniczenia mocy, ingerencję w konstrukcję samolotu oraz wysokie koszty wdrożenia, są krytykowane i uznawane za pozorne rozwiązanie problemu. ATS polega na wykonaniu w osi dróg kołowania tuneli, w których mają się poruszać elektryczne ciągniki, które mają wysuwać przez szczelinę specjalne zaczepy do holowania samolotu za przednie podwozie. Koszt 1 km tego systemu szacowany jest na ok. 3 mln dolarów[33]. Podobnie jest w przypadku ciągników *pushback*, które są zbyt małe i zbyt powolne. Za realną szansę osiągnięcia celów *green taxiingu* należy uznać urządzenia zewnętrzne, które nie wymuszają ingerencji w konstrukcję samolotów. Polscy konstruktorzy opracowali i zgłosili odpowiednie wnioski patentowe dotyczącego takiego zewnętrznego *green taxiingu*. Jest to system samojezdnych robotów holujących, w postaci wózków, z ramą w kształcie litery U, z napędem elektrycznym z własnego zestawu baterii litowo-jonowych. Ich ładowanie odbywa się z systemu solarnego, a ponieważ panele fotowoltaiczne są niskie, to nie stanowią przeszkód nawigacyjnych. Przewidywana cena jednego robota to ok. 150 tys. euro. Należy dodać, że konstruktorzy tego systemu pracują nad kolejnym wynalazkiem, który dotyczy rozkręcania kół samolotu do obrotów dokładnie skorelowanych z prędkością przyziemienia (ok. 1,1 tys. obrotów na minutę). Taka innowacja pozwoliłaby uniknąć dynamicznego uderzania nieruchomych kół w beton pasa startowego, skutkującego szybkim zużywaniem się kosztownych opon. A zwiększenie żywotności opon to nie tylko oszczędności w kontekście ekonomicznym, ale także korzyści dla środowiska[34].

---

aviationweek.com/aerospace/ (dostęp: 24.02.2023); *Electric Taxiing Systems: Past, Present and the Possible Future*, https://www.aviationtoday.com/2019/05/01/ (dostęp: 24.02.2023).

[31] *Electric taxiing takes aircraft…*; *Electric green aircraft taxiing takes off*, https://www.airport-technology.com/analysis (dostęp: 24.02.2023).

[32] *The Aircraft Towing Systems*, https://aircrafttowingsystems.com/ (dostęp: 24.02.2023).

[33] A.J. Szymysł, *Zielone kołowanie na lotniskach...*

[34] *Ibidem*.

5. Green airports – wyzwanie dla inżynierów lotnisk

Zgodnie z artykułem *Research on Construction and Development of Green Airport*[35] lotnictwo powinno spełniać 4 podstawowe założenia, a mianowicie: oszczędność zasobów, przyjazność dla środowiska, efektywność operacji lotniczych oraz przyjazność dla pasażerów.

Oszczędność zasobów polega na redukcji zapotrzebowania na materiały budowlane, oszczędności kosztów oraz poprawie utylizacji starych materiałów i uznanie jako priorytetu oszczędności terenu, oszczędności energii oraz wody. Cel ten można osiągnąć za pomocą zastosowania idei budynków pasywnych, które zużywają tylko 15 kWh/m^2/rok oraz budynków zeroenergetycznych i prawie zeroenergetycznych, czyli budynków o wysokiej charakterystyce energetycznej, zużywających niewielką, wyznaczoną na podstawie rachunku opłacalności ekonomicznej, ilość energii pochodzącej z odnawialnych źródeł energii, które są zlokalizowane w budynku lub w jego pobliżu[36]. Przyjazność dla środowiska polega na uwzględnieniu redukcji wpływu inwestycji na środowisko. Można to osiągnąć, planując w okolicach lotniska tereny zielone dla dzikich zwierząt oraz owadów oraz stosując tak zwane „zielone dachy", które pozwalają na wykorzystanie dachu lotniska do zwiększenia powierzchni terenów zielonych. Takie rozwiązanie pozwala na zmniejszenie ilości wody deszczowej spływającej z dachu i wpadającej do sieci kanalizacyjnej o nawet 73-91%[37]. Efektywności operacji lotniczych dotyczy odpowiedniego zaprojektowania budynku lotniska tak, aby zwiększyć efektywność lotniska, to znaczy zredukować *aircraft taxiing*, oczekiwanie na odlot, zmniejszyć dystans *taxiingu*. Przyjazność dla pasażerów wiąże się z dostarczeniem pasażerom i pracownikom lotniska dobrze przygotowanych informacji oraz usług, tak aby podnieść ich zadowolenie z korzystania z lotniska. Należy to zapewnić już na etapie projektu budynku lotniska, a następnie dokonywać aktualizacji. Dodatkowo, raport *Green Airport Initiative*[38] określa kilkanaście rekomendacji dla zielonych lotnisk. W dziedzinie budownictwa pojawia się m.in. rekomendacja dotycząca używania nowoczesnego sprzętu budowlanego, ponieważ nowe pojazdy budowlane są mniej emisyjne. Wiele portów lotniczych

[35] L. Xiong, C. Xiaoqing, L. Ziyun, *Research on Construction and Development of Green Airport*, https://www.atlantis-press.com/proceedings/upre-22/125974418 (dostęp: 22.02.23).

[36] P. Kania, *Innowacje we współczesnym budownictwie – dom pasywny*, „European Journal of Management and Social Science" 2020, nr 2, https://en.ejmss-journal.com/art-5-w2-20 (dostęp: 22.02.2023).

[37] M. Mrowiec, M. Sobczyk, *Ekologiczne zagospodarowanie wód opadowych – zielone dachy*, „Woda – środowisko – obszary wiejskie", 2014, nr 4, s. 53-61.

[38] *Green Airport Initiative*, https://www.broward.org/Airport/Business/Community/ Pages/GreenAirportInitiative.aspx (dostęp: 22.02.2023).

dobrowolnie zobowiązało się również do osiągnięcia zerowej emisji dwutlenku węgla do 2050 roku[39].

Podsumowanie

Innowacje mające na celu zmniejszenie oddziaływania lotnictwa na środowisko, w tym zielony taxiing i zielone lotniska, bardzo często wiążą się z istotnymi kosztami dla producentów samolotów i przewoźników lotniczych, co jest jedną z ich podstawowych wad. Z ekonomicznego punktu widzenia ważne jest to, aby inwestycje nie przewyższały potencjalnych oszczędności. Transformacja energetyczna oraz innowacje w sektorze lotniczym mają się przyczynić do zwiększenia efektywności paliwowej oraz zmniejszenia niekorzystnego wpływu branży na środowisko i klimat, co wydaje się osiągalne, jednak musi wiązać się ze zwiększoną intensywnością badań nad tego typu rozwiązaniami.

Bibliografia

Adams R. *et al.*, *Sustainability-Oriented Innovation: A Systematic Review*, „International Journal of Management Reviews" 2016, vol. 18, issue 2.

Aircraft direct operating costs heading into a smooth and rapid descent, https://cordis.europa.eu/article/id/430264-aircraft-direct-operating-costs-heading-into-a-smooth-and-rapid-descent/pl.

Commitment to Fly Net Zero, https://aviationbenefits.org/flynetzero/.

Dimitroff-Regatschnig H., Schnitzer H., Jasch Ch., *Manual for environmental cost accounting: Effects on the resource and energy efficiency of production*, „European Regional Science Association" 2002.

Electric green aircraft taxiing takes off, https://www.airport-technology.com/analysis.

Electric Green Taxiing System (EGTS) for Aircraft, https://tec.ieee.org/newsletter/march-april-2014/.

Electric Taxiing Systems: Past, Present and the Possible Future, https://www.aviationtoday.com/2019/05/01/.

Electric taxiing takes aircraft efficiency to a new level, https://aviationbenefits.org/case-studies/.

Emisje z samolotów i statków: fakty i liczby (infografika), https://www.europarl.europa.eu/news/pl.

Emissions of air pollutants from transport in Europe, https://www.eea.europa.eu/ims/emissions-of-air-pollutants-from.

[39] *The Rise of Green Airports*, https://www.uas.aero/ (dostęp: 22.02.2023).

Facts and Figures. World Aviation and the World Economy, https://www.icao.int/sustainability/Pages/FactsFigures_WorldEconomyData.aspx.

Galiński C., *Wybrane zagadnienia projektowania samolotów,* Biblioteka Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2016.

Green airport infrastructure, https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/ topics/airports/green-airport-infrastructure.

Green Airport Initiative, https://www.broward.org/Airport/ Business/Community/Pages/GreenAirportInitiative.aspx.

Hellich E., Klonowska M., *Rachunek kosztów ochrony środowiska*, [w:] *Zarządzanie kosztami jakości, logistyki, innowacji, ochrony środowiska a rachunkowość finansowa*, red. A. Karmańska, Wydawnictwo Difin, Warszawa 2007.

Hybrid Planes: The Power Of Green Tarmac Taxiing, https://www.finchandbeak.com/1075.

Ile kosztuje tankowanie samolotu? Te kwoty robią wrażenie, https://businessinsider.com.pl/finanse/ile-kosztuje-tankowanie-samolotu-ceny-paliwa-lotniczego/y9vc2z1.

Jaki wpływ na środowisko ma latanie samolotem?, https://www.green-projects.pl.

Jeż M., *Ekologiczne problemy portu lotniczego*, „Prace Instytutu Lotnictwa" 2010, nr 206.

Kamiński M. *et al.*, *Emisja zanieczyszczeń z sektora transportu lotniczego i jej wpływ na zdrowie człowieka,* „Kosmos" 2016, nr 4.

Kania P., *Innowacje we współczesnym budownictwie – dom pasywny*, „European Journal Of Management And Social Science" 2020, nr 2, https://en.ejmss-journal.com/art-5-w2-20.

Łapucha R., *Komory spalania silników turbinowo-odrzutowych: procesy, obliczenia, badania*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2004.

Małecki P. P., Urbaniec M., *Koszty środowiskowe w Polsce w ujęciu teoretycznym i statystycznym,* „Optimum. Studia Ekonomiczne" 2014, nr 3.

Marciniak S., *Makro i Mikro Ekonomia dla inżynierów*, PWN, Warszawa 1995.

Mrowiec M., Sobczyk M., *Ekologiczne zagospodarowanie wód opadowych – zielone dachy*, „Woda – środowisko – obszary wiejskie" 2014, nr 4.

Rutkowski M., *Fazowy charakter kosztów bezpieczeństwa w lotnictwie cywilnym,* „Przegląd Komunikacyjny" 2019, nr 2.

Schäfer W. A., Waitz A. I., *Air transportation and environment*, „Transport Policy" 2014, nr 34.

Szymysł A.J., *Zielone kołowanie na lotniskach*, „Tygodnik Przegląd" 2021, nr 38, https://www.tygodnikprzeglad.pl/zielone-kolowanie-lotniskach/.

Techniczne nowinki w samolotach i nie tylko, https://mlodytechnik.pl/technika/.

The Aircraft Towing Systems, https://aircrafttowingsystems.com/.

The Rise of Green Airports, https://www.uas.aero/.

Tłoczyński D., *Koszty funkcjonowania pasażerskiego rynku transportu lotniczego*, „Logistyka" 2014, nr 2.

Ustawa z dnia 3 lipca 2002 r. o prawie lotniczym, Dz. U. 2002, poz. 1112, art. 1.

W samolotach coraz więcej seniorów i osób z niepełnosprawnością. Za oceanem chcą zmienić zasady ewakuacji, https://www.money.pl.

Why do Airlines Continue to Resist Electric Taxi Motors?, https://aviationweek.com/aerospace/.

Xiong L., Xiaoqing C., Ziyun L., *Research on Construction and Development of Green Airport*, https://www.atlantis-press.com/proceedings/upre-22/125974418.

Bielawski R., *Wybrane zagadnienia z budowy statków powietrznych*, Akademia Obrony Narodowej, Warszawa 2015.

Smith B. e*t al.*, *Passive Aeroelastic Tailoring*, NASA, Virginia 2020.

Blended Wing Body – A potential new aircraft design, https://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/FS-2003-11-81-LaRC.html.

What is SAF?, https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed78 4f75bac90f000760e998/saf-what-is-saf.pdf.

Zrównoważone paliwa lotnicze (SAF) — nowa droga do dekarbonizacji, https://geodis.com/pl/blog/zrownowazony-rozwoj/.

Caetano M., Jorge C., *Innovation System in Air Transport Management*, „Journal of Information Systems and Technology Management" 2019, nr 16.

Nakamura H., Kajikawa Y., Suzuki S., *Innovation for Sustainability in Aviation: World Challenges and Visions*, 2011, https://www.researchgate.net/publication/286972667/Innovation_for_sustainability_in_aviation_World_challenges_and_visions.

Streszczenie

Z punktu widzenia emisji dwutlenku węgla lotnictwo jest jednym z najczystszych środków transportu. Do kosztów społecznych branży należy zanieczyszczenia powietrza w postaci pary wodnej, tworzącej smugi kondensacyjne oraz tlenków azotu, a ponadto hałas. Transformacja energetyczna oraz innowacje w sektorze lotniczym mają się przyczynić do efektywności paliwowej oraz zmniejszenia niekorzystnego wpływu branży na środowisko i klimat. Z ekonomicznego punktu widzenia istotne jest to, aby inwestycje nie przewyższały potencjalnych oszczędności. W niniejszym artykule uwaga została skupiona na wybranych innowacjach, przede wszystkim *green taxiingu* i *green airports*, stanowiąc tym samym punkt wyjścia do pogłębionych rozważań w zakresie innowacji w procesie zrównoważonego rozwoju i optymalizacji kosztów lotnictwa pasażerskiego.

Słowa kluczowe: lotnictwo, innowacje, zrównoważony rozwój, zielony taxiing, zielone lotniska, green taxiing, green airports

GREEN TAXIING AND GREEN AIRPORTS AS INNOVATIONS IN THE PROCESS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF THE PASSENGER AVIATION COSTS

Summary

In terms of carbon dioxide emission, aviation is one of the cleanest means of transport. Social costs in this industry comprise air pollution in form of water vapor creating exhaust trails, nitrogen oxides and additionally noise. Energetic transformation and innovations in aviation sector are expected to contribute to increasing fuel efficiency and decreasing unfavorable influence of industry on environment and climate. In economical perspective it is important for investments not to outbalance potential savings. In the

presented article attention is given to chosen innovations, mostly green taxiing and green airports, becoming a starting point for deepened considerations regarding innovations in the process of sustainable development and passenger aviation costs optimalisation.

Keywords: aviation, innovation, sustainable development, green taxiing, green airports, green taxiing, green airports