



Łukasiewicz
Instytut Lotnictwa

Metodyka obliczeniowa rzeczywistych zanieczyszczeń
emitowanych przez silniki turbinowe – materiał informacyjny

Warszawa, październik 2022

Formalna podstawa opracowania

Umowa Nr 109/2020/PW-PB w sprawie finansowania projektu nr II.PB.22 tytuł : „Badanie wpływu spalin emitowanych przez silniki turbinowe statków powietrznych na poziom zanieczyszczeń w obrębie i okolicy lotnisk istniejących i nowo projektowanych” w ramach programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” – V etap, okres realizacji: lata 2020-2022, koordynowanego przez Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, realizowanego w ramach części B – program realizacji projektów w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych.

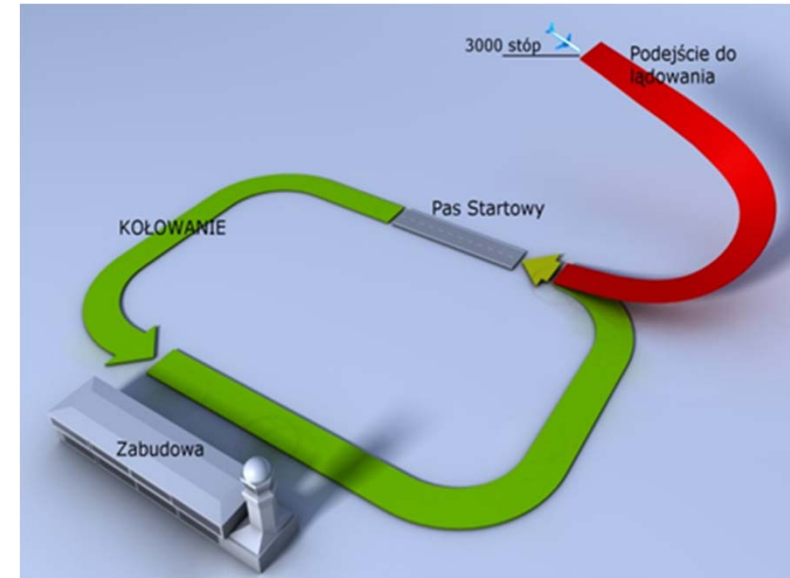
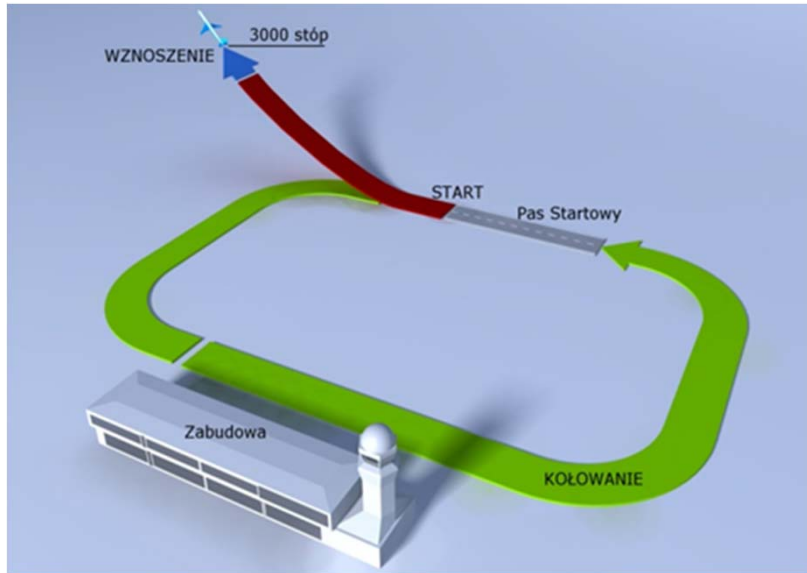
Porządek prezentacji

1. Cykl startu i Lądowania (LTO) – obowiązująca definicja ICAO
2. Rzeczywiste czasy operacji w cyklu LTO
3. Wyniki obliczeń emisji spalin w Porcie Lotniczych im. Fryderyka Chopina w oparciu o dane ICAO oraz rejestratory pokładowe
4. Proponowane zmiany operacyjno-techniczne i korzyści dla środowiska z nich wynikające
5. Hipotetyczne dzienne emisje niektórych składników spalin po wprowadzeniu proponowanych zmian operacyjno-technicznych w porcie lotniczym im. Fryderyka Chopina
6. Emisje pochodzące od samolotów PLL LOT S.A. w przestrzeni portu lotniczego im. Fryderyka Chopina - Metoda Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa
7. Podsumowanie

Cykl startu i Lądowania (LTO) – obowiązująca definicja ICAO

Cykl startu i lądowania (LTO) został zdefiniowany przez ICAO w celu ujednolicenia wszelkich rozważań związanych z operacjami lotniczymi w pobliżu lotnisk. Dotyczy wszystkich samolotów na wszystkich lotniskach z założeniem, że wszędzie tam czasy poszczególnych faz lotu i zakresy pracy silników są takie same – co nie jest zgodne z rzeczywistością. Każdy port lotniczy ma swoją specyfikę, szczególnie czasu manewrów podejścia i kołowania. Jako porównanie mogą służyć porty lotnicze w Dubaju oraz Zielonej Górze. Dubaj obsłużył w 2019 roku 86 mln pasażerów, kiedy w Zielonej górze obsłużono tylko 33 tysiące trudno jest więc bronić stanowiska, że czas każdej operacji na wszystkich lotniskach jest jednakowy. Starty na ogół odbywają się przy mniejszym zakresie ciągu niż startowy, podobnie wznoszenie i podejście. Producenci silników muszą podawać wielkości emisji NO_x , CO i HC i zużycie paliw dla każdego typu silnika na specjalnym formularzu zgodnie z wymaganiami ICAO tzn. zakresy ciągu i czasy. Obecnie wprowadzono drugi formularz na którym podawane są wielkości nvPM (non-volatile Particulate Matter–nielotne cząstki stałe). Formularze te dostępne są w wydawanym cyklicznie Engine Emissions Data Bank.

Cykl startu i Lądowania (LTO) – obowiązująca definicja ICAO



Zakres (Faza) lotu	Ciąg silnika [%] K_{START}	Czas trwania [min]
Start	100	0,7
Wznoszenie	85	2,2
Podejście	30	4,0
Kołowanie	7	26,0

Cykl LTO dotyczy startu, wznoszenia do 3000 ft, podejścia do lądowania od wysokości 3000 ft oraz kołowania. Zakresy pracy silników oraz czas trwania tych faz zostały przyjęte przez ICAO oraz zaprezentowane w tabeli powyżej.

Rzeczywiste czasy operacji w cyklu LTO

W celu określenia przybliżonych do rzeczywistych ilości emisji pochodzących od samolotów w porcie im. Fryderyka Chopina posłużono się danymi zapisanymi na rejestratorach pokładowych różnych typów samolotów należących do PLL LOT, co oczywiście tymi operującymi na „Okęciu”. Wyniki przedstawia kolejna tabela.

Gdzie:

Wielkość współczynnika – iloraz czasu operacji wg rejestratorów pokładowych do czasu wg ICAO LTO

Manewr	Średni czas trwania manewrów obliczony z zapisu na rejestratorach pokładowych [sek.]	Średni czas trwania manewrów obliczony z zapisu na rejestratorach pokładowych [min.]	Czas trwania manewrów LTO ICAO [min.]	Wielkość współczynnika
start	43	0,72	0,7	1,014
wznoszenie	76	1,27	2,2	0,576
podejście	267	4,45	4	1,113
kołowanie	1149	19,15	26	0,737

Określenie emisji pochodzących od poszczególnych manewrów jest o tyle istotne, że wiadomo podczas którego emitowana jest największa ilość szkodliwych substancji.

Wyniki obliczeń

Roczne emisje w porcie lotniczym im. Fryderyka Chopina

Cykl LTO	Emisja CO ₂ [t]	Emisja No _x [t]	Emisja CO [t]	Emisja HC [t]
ICAO	219343	822	819	65
Z uwzględnieniem uśrednionych czasów manewrów samolotów	162750	712	601	49

Obliczenia przeprowadzono na podstawie rozkładu lotów uwzględniającego typy samolotów i określenia rodzajów ich silników napędowych potrzebne do obliczenia emisji zgodnie z danymi zapisanymi w Engine Emissions Data Bank.

Wyniki obliczeń

Dzienne emisje podczas manewrów samolotów w porcie lotniczym im. Fryderyka Chopina w cyklu ICAO-LTO z uwzględnieniem uśrednionych czasów faz lotu.

Manewr	Dzienna emisja CO ₂ [kg]	Dzienna emisja NO _x [kg]	Dzienna emisja CO [kg]	Dzienna emisja HC [kg]
Start	64 438	588	12	0,6
Wznoszenie	94 034	690	18	1,1
Podejście*	112 950	419	118	3,6
Kołowanie	174 425	250	1 497	128
70% kołowania**	122 098	175	1048	90

*Skrócenie czasu podejścia o 10 sekund spowoduje dla tego manewru redukcję dziennej emisji dwutlenku węgla o 4 230 kg, tlenków azotu o około 16 kg, z niewielkim wpływem na redukcję tlenku węgla i węglowodorów.

**70% kołowania wynika z faktu, że taki jest udział ruchu samolotów na start w całej fazie kołowania, a proponowana jest redukcja emisji poprzez wprowadzenie procedury holowania samolotów na start.

Wyniki obliczeń

Dzienne emisje niektórych składników spalin pochodzących od ciągników wykonujących 250 holowań na start w porcie lotniczym im. Fryderyka Chopina

Dzienna emisja CO ₂ ciągników w Porcie Lotniczym im. Fryderyka Chopina [kg]	Dzienna emisja CO ciągników w Porcie Lotniczym im. Fryderyka Chopina [kg]	Dzienna emisja NO _x + HC ciągników w Porcie Lotniczym im. Fryderyka Chopina [kg]
4763	4	25

Wyniki obliczeń

Hipotetyczne dzienne emisje niektórych składników spalin po wprowadzeniu proponowanych zmian operacyjno-technicznych w porcie lotniczym im. Fryderyka Chopina

Manewr	Dzienna emisja CO ₂ w Porcie Lotniczym im. Fryderyka Chopina [kg]	Dzienna emisja NO _x + HC w Porcie Lotniczym im. Fryderyka Chopina [kg]	Dzienna emisja CO w Porcie Lotniczym im. Fryderyka Chopina [kg]
Start	64438	589	12
Wznoszenie	94034	691	18
Podejście	101550	383	106
Kołowanie	57091	138	453

Wyniki obliczeń

Roczne emisje w porcie lotniczym im. Fryderyka Chopina

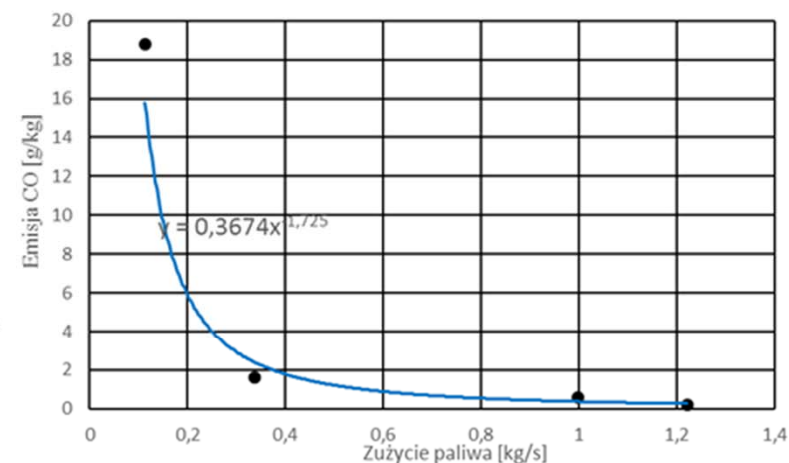
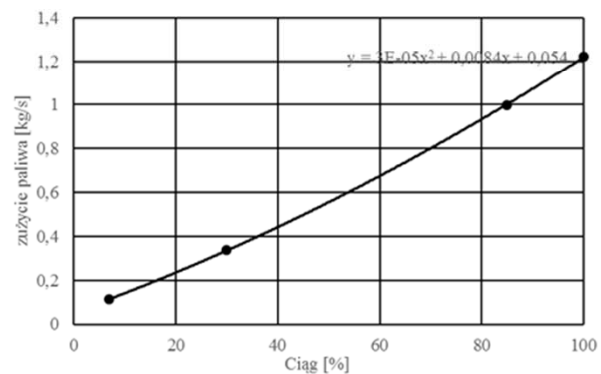
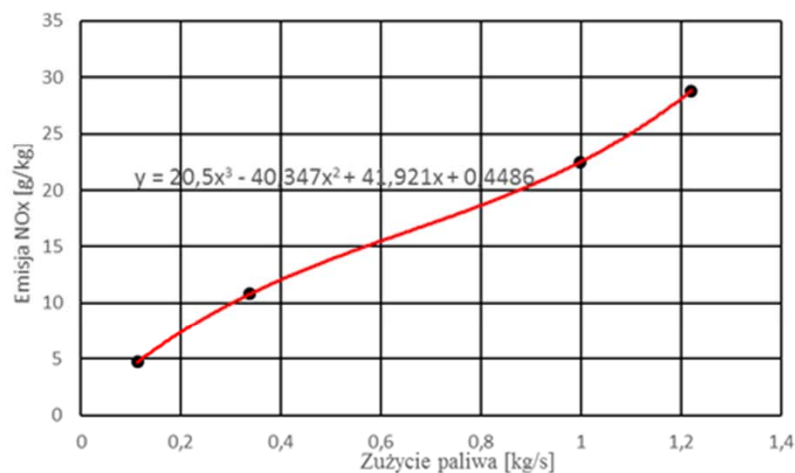
Cykl	Emisja CO ₂ [t]	Emisja NO _x + HC [t]	Emisja CO [t]
LTO ICAO	219343	887	819
LTO z uwzględnieniem uśrednionych czasów manewrów samolotów	162750	761	601
LTO Hipotetyczny, po wprowadzeniu proponowanych zmian operacyjno-technicznych	115746	657	215

Proponowane zmiany operacyjno-techniczne i korzyści dla środowiska z nich wynikające

- **Skrócenie czasu podejścia z 267 sekund do 240 sekund spowoduje roczną redukcję emisji dwutlenku węgla o około 4 tysiące ton i tlenków azotu o około 16 ton**
- **Holowanie samolotów na miejsce startu spowoduje roczną redukcję emisji dwutlenku węgla o około 20 tysięcy ton i tlenków azotu o około 63 tony i tlenku węgla o około 382 tony**

Emisje pochodzące od samolotów PLL LOT S.A. w przestrzeni portu lotniczego im. Fryderyka Chopina Metoda Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa

Na podstawie danych publikowanych w Engine Emissions Data Bank wyznaczono charakterystyki wszystkich silników zabudowanych na samolotach PLL LOT. Z zapisów z rejestratorów pokładowych wyznaczono dla każdego typu samolotu ilość emisji w cyklu LTO i czasy trwania poszczególnych faz lotu. Znając roczną liczbę operacji lotniczych każdego typu samolotu w porcie lotniczym im. F.Ch. obliczono ilość emisji porównując z tymi oszacowanymi zgodnie z definicją cyklu LTO ICAO.



Emisje pochodzące od samolotów PLL LOT S.A. w przestrzeni portu lotniczego im. Fryderyka Chopina Metoda Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa

- y – Chwilowa emisja konkretnego gazu
- x – Sekundowe zużycie paliwa
- n – Liczba manewrów
- Y_i – Całkowita emisja konkretnego gazu dla manewru
- T_i – Czas wykonania konkretnego manewru
- Y_Σ – Całkowita emisja konkretnego gazu w cyklu LTO

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d$$

$$Y_i = \int_0^{T_i} y(t) dt$$

$$Y_\Sigma = \sum_{i=1}^n Y_i$$

Z tabeli wynika, że faktyczne zużycie paliwa, a tym samym emisja CO₂ jest mniejsza o 45%, NO_x o 40% i CO o 60% w porównaniu do tej obliczonej dla cyklu LTO ICAO.

LTO	Zużycie paliwa [ton]	Emisja CO ₂ [ton]	Emisja NO _x [ton]	Emisja CO [ton]
LTO ICAO	16356	50785	218	223
LTO faktyczne, metoda Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa	9074	28160	130	90

Podsumowanie

Obecnie możliwe jest oszacowanie ilości emisji określonych składników gazów wylotowych pochodzących od silników napędowych samolotów w przestrzeni portu lotniczego, jedynie przy uwzględnieniu uśrednionych, lecz zbliżonych do rzeczywistych, czasów trwania poszczególnych faz lotu w cyklu LTO. W przyszłości, w celu określenia faktycznych wielkości emisji pochodzących od operacji lotniczych w przestrzeniach portów lotniczych zajdzie potrzeba ich wyznaczenia na podstawie zapisów parametrów z lotu samolotów i charakterystyk silników na nich zabudowanych. Umożliwi to precyzyjną ocenę efektywności przedsięwzięć organizacyjnych, operacyjnych i technicznych powodujących redukcję wielkości emisji dwutlenku węgla, tlenków azotu, tlenku węgla i węglowodorów w cyklu LTO.

Wprowadzenie proponowanych zmian techniczno-operacyjnych uwzględniających li tylko uśrednione czasy manewrów samolotów w cyklu LTO spowoduje redukcję emisji dwutlenku węgla o około 47%, tlenku węgla o około 74% i tlenków azotu razem z węglowodorami o około 26% w porównaniu do tej obliczonej zgodnie z definicją LTO ICAO