

ANALIZA ZALEŻNOŚCI PARAMETRÓW EKSPLOATACYJNYCH I WSKAŹNIKÓW EKOLOGICZNYCH SILNIKA TURBINOWEGO

Streszczenie

Problematyka podjęta w artykule dotyczy oceny natężenia emisji zanieczyszczeń w spalinach silników turbinowych. Przedstawione wyniki prac związane są z poszukiwaniem metod analitycznych, przydatnych do szacowania wartości natężenia emisji związków szkodliwych spalin podczas warunków eksploatacji silników turbinowych. Przedstawiono wyniki badań i wskazano zależności występujące między parametrami emisyjnymi a parametrami eksploatacyjnymi silnika. Przeprowadzona analiza wskazuje na duże podobieństwo charakteru zmian poszczególnych zależności w odniesieniu do badanych silników, a jednocześnie wskazuje na ich indywidualność. W związku z tym przedstawiono kierunek dalszych prac zmierzających do opracowania metod oceny natężenia emisji zanieczyszczeń z silników turbinowych podczas ich eksploatacji.

WSTĘP

Silnik turbinowy charakteryzuje się dużą wartością współczynnika uzyskiwanej mocy w stosunku do masy własnej, dzięki czemu jest szeroko rozpowszechniony jako napęd statków powietrznych. Zaletą ta również skłania inżynierów do zastosowania tego rodzaju silników do napędu jednostek pływających – głównie okrętów wojennych. Liczba jednostek pływających w porównaniu do liczby samolotów napędzanych silnikami turbinowymi jest niewielka, jednak przyczyną tego jest rachunek ważności kryterium masy silnika wobec uzyskiwanych parametrów eksploatacyjnych: mocy użytecznej, zużycia paliwa, jakości paliwa, sprawności ogólnej i stopnia skomplikowania obsługi, systemów przeniesienia napędu i prędkości obrotowej względem okrętowych silników tłokowych. Obecnie dodatkowym kryterium oceny stosowalności napędu jest emisja zanieczyszczeń do atmosfery, które wskazuje na pewne korzyści wykorzystania silników turbinowych [3, 4, 5, 6]. Korzyści te wynikają z innego sposobu realizacji procesu spalania paliwa w silniku, innego rodzaju paliwa wykorzystywanego do zasilania silnika i rodzaju energii oraz wartości jej zapotrzebowania przez jednostki pływające.

Eksploatacja większości jednostek pływających charakteryzuje się ustalonymi parametrami pracy układu napędowego i silnika spalinowego. Opracowanie charakterystyk gęstości czasowych parametrów eksploatacyjnych oraz wyznaczenie charakterystyk parametrów ekologicznych w obszarach pracy silnika pozwala na ocenę ekologiczną napędu w obszarach jego eksploatacji. Istotne znaczenie w pracach zmierzających w tym kierunku ma korelacja parametrów eksploatacyjnych napędu z wartością stężenia związków szkodliwych w spalinach. Szczególne znaczenie w tych pracach ma metodyka pomiaru zanieczyszczeń spalin. Problematyka realizacji pomiaru stężenia związków szkodliwych w spalinach silników turbinowych związana jest z metodami poboru próbki spalin [7]. Spaliny wypływające z silnika charakteryzują się dużą wartością prędkości przepływu i znaczną masą, a jednocześnie niewielką wartością stężenia związków szkodliwych. W związku z tym konieczne staje się zastosowanie metod analitycznych oceny emisji zanieczyszczeń, wykorzystujących pomiary wybranych parametrów eksploatacyjnych i ekologicznych. Stosując takie metody przydatna jest znajomość wzajemnej korelacji wybranych parametrów.

1. METODYKA POMIARÓW PARAMETRÓW EKOLOGICZNYCH

1.1. Badania silnika turbinowego odrzutowego GTM 120

Stosowana metodologia pomiarów emisji zanieczyszczeń z silników turbinowych polega na pomiarze stężenia zanieczyszczeń zawartych w analizowanej próbce spalin pobieranych ze strugi wypływających gazów, specjalnie wykonaną sondą pomiarową. W przepisach ICAO – Aneks 16 [8] nie określono parametrów geometrycznych sondy, ale zdefiniowano ogólne wytyczne. Sonda, będąca w kontakcie z próbkami spalin, musi być wykonana ze stali nierdzewnej lub innego, niereagującego materiału. Jeśli jest użyta sonda wielootworowa, wówczas wszystkie otwory muszą być o jednakowej średnicy. Konstrukcja sondy musi być taka, aby co najmniej 80% ciśnienia działającego na zespół sondy było pobierane przez otwory. Liczba miejsc poboru próbek spalin nie może być mniejsza niż 12. Płaszczyzna poboru próbek musi być położona tak blisko płaszczyzny wylotowej silnika, jak pozwalają na to osiągi silnika, ale w każdym przypadku musi znajdować się w odległości mniejszej niż 0,5 średnicy dyszy wylotowej. W przepisach zawarto konieczność udowodnienia władzom certyfikującym, że proponowana konstrukcja sondy i jej umieszczenie zapewni uzyskanie próbki reprezentatywnej dla każdego określonego ustawienia ciągu silnika.

Zastosowanie w pomiarach emisji zanieczyszczeń spalin silnikowych sondy wielootworowej skutkuje tym, że uzyskuje się uśrednioną próbkę spalin. Uśrednienie pobranej próbki spalin związane jest z tym, że wraz ze zwiększeniem odległości od osi wypływającej strugi spalin następuje zmniejszenie stężenia składników spalin. Zależy ono od rodzaju konstrukcji silnika, w tym sposobu chłodzenia i separacji elementów silnika od gorących gazów oraz występujących zawirowań w strudze wypływających spalin. Pobrane spaliny kilkoma otworami sondy pomiarowej o różnym stężeniu zanieczyszczeń ulegają wymieszaniu, co w konsekwencji dochodzi do uśrednienia wartości stężenia zanieczyszczeń w spalinach [1, 2]. W związku z tym, pożądane jest dokonanie pomiaru stężenia zanieczyszczeń spalin w miejscu, gdzie nie zostają wymieszane z powietrzem chłodzącym elementy silnika, czy powietrzem porywanym przez zawirowania wypływającej strugi spalin. Dokonując takiego pomiaru można oszacować rzeczywisty skład spalin, a wykorzystując dodatkowe informacje – określić masę wypływających spalin oraz natężenie emisji zawartych w nich zanieczyszczeń.

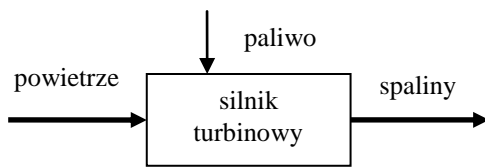
Idea pracy silnika spalinowego ukierunkowana jest na uzyskanie parametrów eksploatacyjnych przekładających się na pracę napędową. Dla turbinowych silników odrzutowych istotne znaczenie ma wpływ strumienia spalin generujący siłę ciągu. Zgodnie z podstawowym równaniem, określającym siłę ciągu, istotne znaczenie ma masa i prędkość wypływających spalin. Wskaźniki te wiążą się z takimi parametrami eksploatacyjnymi, jak zużycie powietrza i zużycie paliwa, których łączna masa przekłada się na masę spalin generowanych przez silnik (rys. 1). Znając chwilową wartość zużycia paliwa oraz dokonując pomiaru składu chemicznego spalin, umożliwiającego wyznaczenie chwilowej wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ , można oszacować masę powietrza doprowadzaną w danej chwili do silnika.

Suma wartości zużycia paliwa i zużycia powietrza odpowiada wartości strumienia generowanych spalin:

$$\dot{m}_{pow} + \dot{m}_{pal} = \dot{m}_{sp} \quad (1)$$

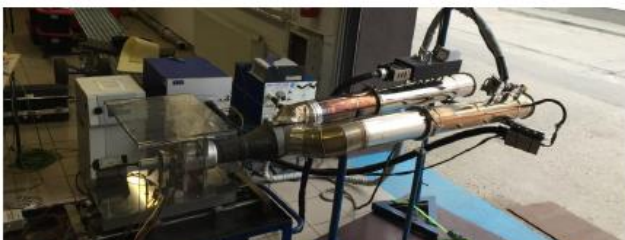
gdzie:

- \dot{m}_{pow} – strumień masy powietrza,
- \dot{m}_{pal} – strumień masy paliwa,
- \dot{m}_{sp} – strumień masy spalin.



Rys. 1. Schemat wielkości wejściowych i wyjściowych silnika turbinowego odrzutowego

Zakładając, że spośród trzech wielkości możliwe jest przeprowadzenie pomiarów dwóch z nich, to wartość trzeciej można obliczyć. W związku z tym przeprowadzono badania, których celem było dokonanie pomiaru zużycia paliwa i wielkości strumienia emitowanych spalin przy jednoczesnym pomiarze stężenia związków szkodliwych spalin i współczynnika nadmiaru powietrza λ . Badania przeprowadzono na przygotowanym stanowisku badawczym (rys. 2), w którego skład wchodził mały silnik turbinowy, odrzutowy, jednoprzepływowy GTM 120.



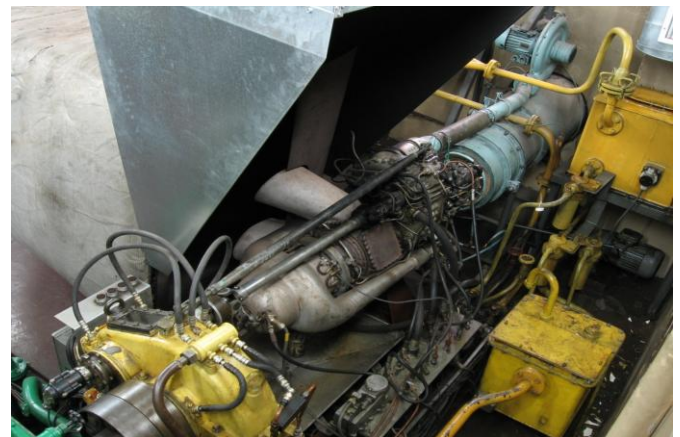
Rys. 2. Stanowisko badawcze z silnikiem GTM 120

Silnik zasilany był paliwem ze zintegrowanego modułu zasilającego zawierającego miernicę pomiarową ATMX 2040. Pomiaru przepływu spalin dokonano z wykorzystaniem układu pomiarowego składającego się z dwóch przepływomierzy spalin o średnicy przekroju przepływu 125 mm. Zastosowanie dwóch przepływomierzy spalin było związane koniecznością rozdzielenia strugi spalin i zmniejszenia ich prędkości przepływu, dostosowując do zakresów

pomiarowych przepływomierzy (zmniejszenie prędkości przepływu strug spalin wynika ze zwiększenia pola przekroju przepływu). Pomiaru natężenia przepływu spalin oraz stężenia związków szkodliwych w nich zawartych i wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ , dokonano z wykorzystaniem analizatora spalin Semtech firmy Sensors Inc. Pomiary przeprowadzono dla ustalonych wartości siły ciągu silnika od 10 N do 120 N z inkrementacją 10 N. Badania prowadzono w taki sposób, że najpierw dokonywano nastawy wartości siły ciągu, w tym czasie układ rozdziela spalin wraz z przepływomierzami był odsunięty od dyszy wylotowej silnika. Po uzyskaniu odpowiedniej wartości siły ciągu następowało przysunięcie do dyszy wylotowej układu podziału strugi spalin wraz z układem pomiarowym. Czas pomiaru przepływu spalin i pomiaru stężenia zanieczyszczeń dla pojedynczej nastawy ciągu uwarunkowany był osiągnięciem stabilizacji wartości temperatury układu pomiarowego i wynosił od kilkunastu do kilkudziesięciu sekund. Uzyskiwane wartości mierzonych parametrów poddano późniejszej analizie.

1.2. Badania silnika turbinowego wałowego GTD 350

Podobną metodykę przyjęto podczas realizacji badań silnika GTD 350. Silnik ten jest silnikiem turbinowym, wałowym, który zamontowany na stanowisku badawczym (rys. 3) jest połączony wałem napędowym z hamulcem, którym zadawano obciążenie silnika. Przeprowadzono pomiary parametrów eksploatacyjnych silnika tj. zużycia paliwa, prędkości obrotowej wału wytwornicy spalin oraz prędkości obrotowej wału turbiny napędowej, przy nastawach obciążenia do 600 N·m, co było uwarunkowane możliwościami eksploatacyjnymi hamulca.



Rys. 3. Stanowisko badawcze z silnikiem GTD 350

W warunkach ustalonych parametrów eksploatacyjnych odpowiadających poszczególnym punktom pomiarowym dokonano w spalinach pomiarów stężenia O_2 oraz stężenia związków szkodliwych CO , NO_x i CO_2 . Pomiary zanieczyszczeń spalin wykonano analizatorem TESTO 350.

2. WYNIKI POMIARÓW PARAMETRÓW EKOLOGICZNYCH

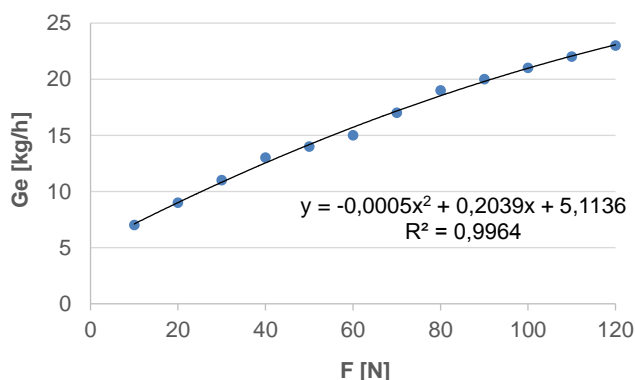
2.1. Wyniki badań dla silnika GTM 120

Podczas przeprowadzonych badań dla założonych wartości nastaw siły ciągu F , uzyskano wartości wskaźników eksploatacyjnych silnika (tab. 1). Dokonano pomiaru godzinowego zużycia paliwa G_e , współczynnika nadmiaru powietrza λ wynikającego z warunków procesu spalania, oraz strumieni masy spalin \dot{m}_{spal} przepływających przez przepływomierz 1 i przepływomierz 2. Wyznaczono również całkowity strumień masy spalin jako sumę strumieni spalin z dwóch przepływomierzy.

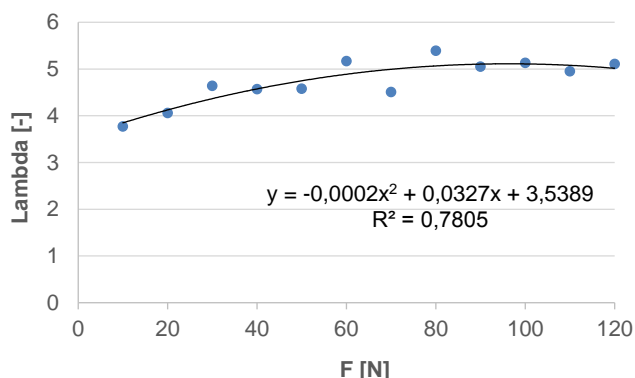
Zgodnie z celem przyjętym w artykule przeprowadzono próbę oszacowania wartości strumienia spalin na podstawie zmierzonych wartości zużycia paliwa (rys. 4) i współczynnika nadmiaru powietrza (rys. 5) podczas spalania określanego na podstawie składu spalin. Mając na uwadze, że na spalenie całkowite i zupełne jednego kilograma paliwa potrzebne jest około 14,2 kg powietrza, można zaproponować następującą zależność:

$$\dot{m}_{sp} = G_e \cdot (1 + \lambda \cdot 14,2) \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \quad (2)$$

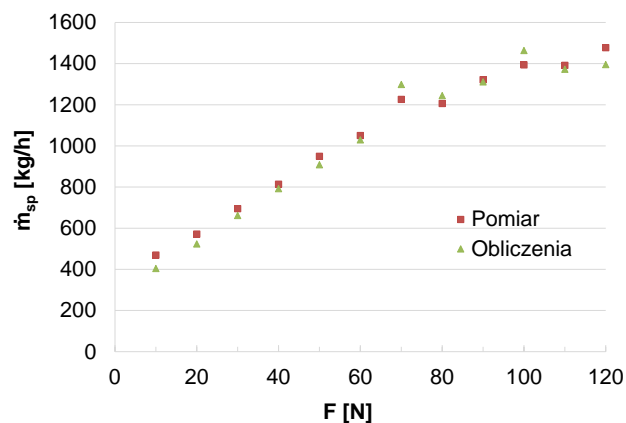
Zgodnie z powyższą zależnością uzyskano wartości strumienia masy spalin. Wyniki uzyskane na podstawie przeprowadzonych obliczeń porównano z wartościami strumienia masy spalin uzyskanej podczas pomiarów (rys. 6). Porównanie przeprowadzono obliczając procentowe różnice wartości względem wyników pomiarów dla poszczególnych wartości siły ciągu. Wspólne zestawienie wartości strumienia masy spalin uzyskanych podczas przeprowadzonych badań z wartościami wyznaczonymi na podstawie obliczeń, wskazuje na to, że wartości obliczeniowe strumieni spalin zbliżone są do wartości pochodzących z pomiarów. Cechą charakterystyczną badanego silnika jest niemal liniowa zależność strumienia masy spalin jako funkcja siły ciągu, która jest ściśle związana z wartościami zużycia paliwa.



Rys. 4. Wartości godzinowego zużycia paliwa jako funkcja siły ciągu dla silnika GTM 120

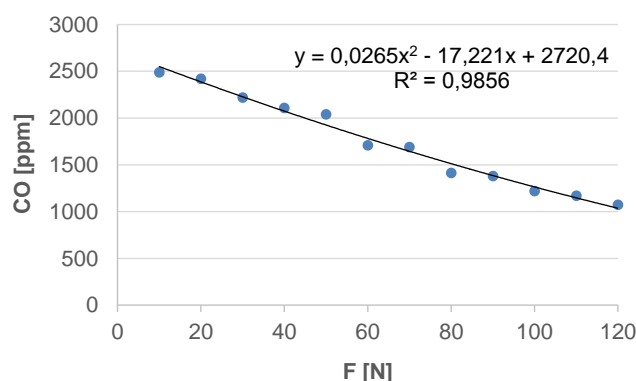


Rys. 5. Wartości współczynnika nadmiaru powietrza w spalinach jako funkcja siły ciągu dla silnika GTM 120

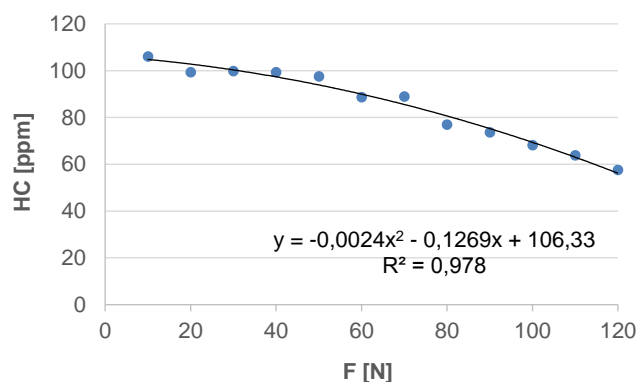


Rys. 6. Porównanie wartości zmierzonej i obliczonej strumienia masy spalin silnika GTM 120

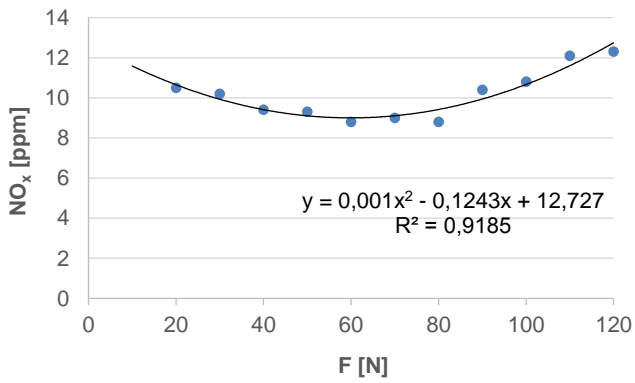
Podczas badań dokonano pomiaru stężenia związków szkodliwych zawartych w spalinach (rys. 7–10). Stężenie związków szkodliwych zawartych w spalinach ściśle zależy od przebiegu procesu spalania w komorze spalania silnika turbinowego, które warunkuje obciążenie silnika lub zapotrzebowanie na określoną siłę ciągu. Dla uzyskanych wyników wyznaczono linie trendu w postaci równania wielomianu drugiego stopnia, które z dużą zgodnością opisują występujące zależności między wartościami stężenia związków szkodliwych a siłą ciągu silnika GTM 120.



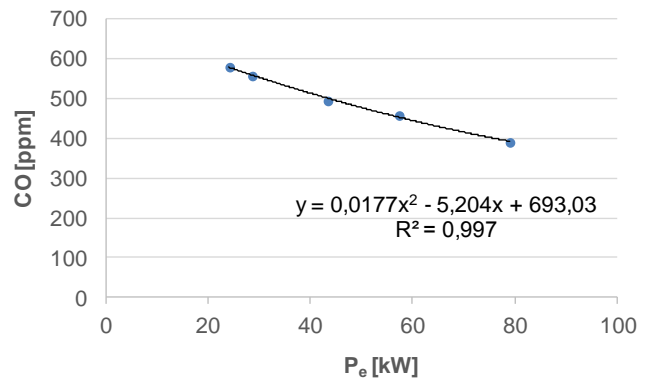
Rys. 7. Wartości stężenia tlenku węgla w spalinach jako funkcja siły ciągu dla silnika GTM 120



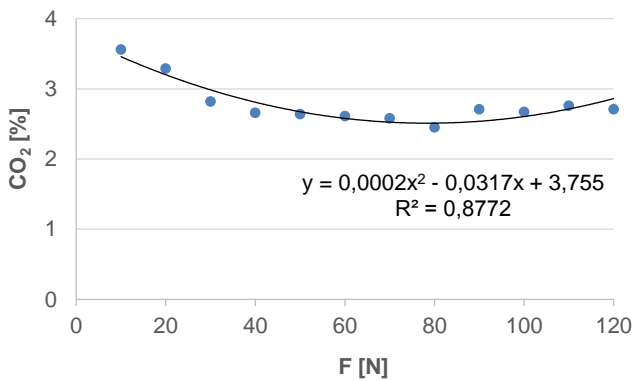
Rys. 8. Wartości stężenia węglowodorów w spalinach jako funkcja siły ciągu dla silnika GTM 120



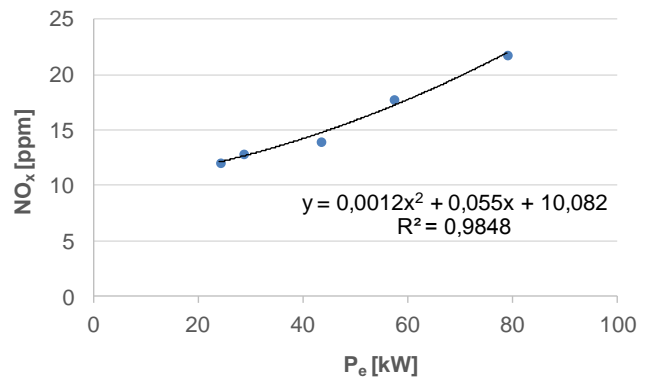
Rys. 9. Wartości stężenie tlenków azotu w spalinach jako funkcja siły ciągu dla silnika GTM 120



Rys. 12. Wartości stężenia tlenku węgla w spalinach jako funkcja mocy użytecznej dla silnika GTD 350



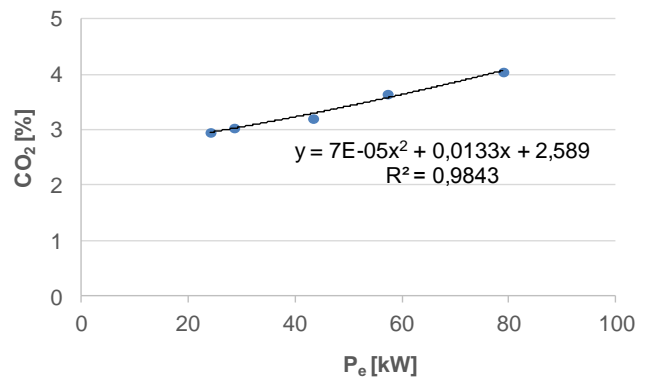
Rys. 10. Wartości stężenia dwutlenku węgla w spalinach jako funkcja siły ciągu dla silnika GTM 120



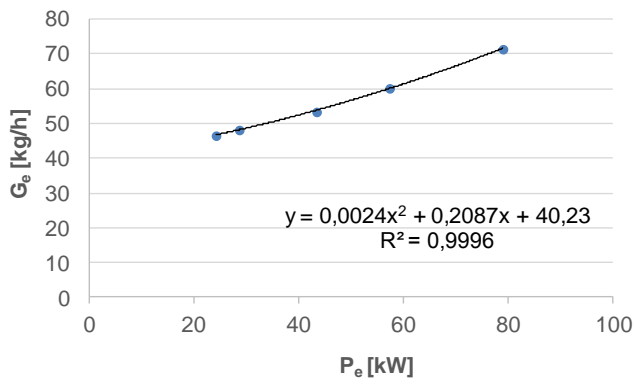
Rys. 13. Wartości stężenia tlenków azotu w spalinach jako funkcja mocy użytecznej dla silnika GTD 350

2.2. Wyniki badań dla silnika GTD 350

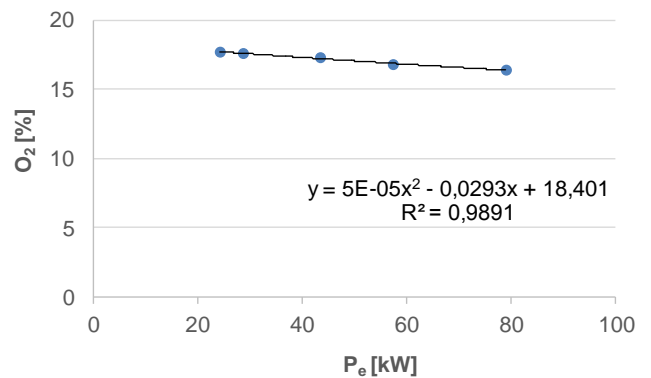
Podobne badania przeprowadzono dla silnika turbinowego, wałowego GTD 350, w wyniku których uzyskano wartości mierzonych parametrów jako funkcję obciążenia w postaci momentu obrotowego na wyjściu z przekładni silnika i generowanej przez silnik mocy. Dokonano pomiaru godzinowego zużycia paliwa (rys. 11), stężenia związków szkodliwych zawartych w spalinach (rys. 12–14) oraz stężenia tlenu (rys. 15). Podobnie jak poprzednio dla wyznaczonych rozkładów wartości wyznaczono linie trendu opisane równaniami w postaci wielomianu stopnia drugiego.



Rys. 14. Wartości stężenia dwutlenku węgla w spalinach jako funkcja mocy użytecznej dla silnika GTD 350



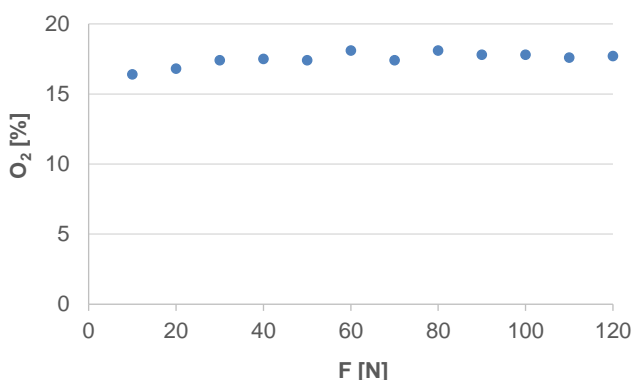
Rys. 11. Wartości godzinowego zużycia paliwa jako funkcja mocy użytecznej dla silnika GTD 350



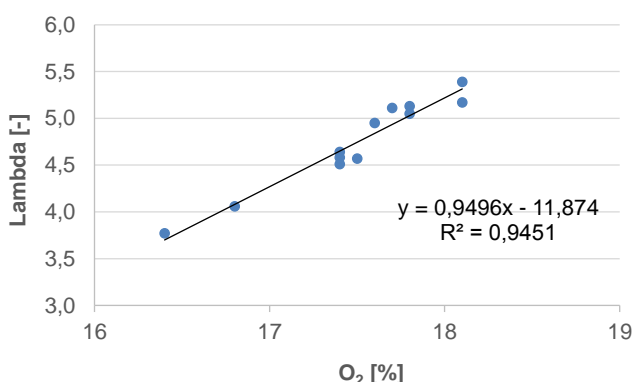
Rys. 15. Wartości stężenia tlenu w spalinach jako funkcja mocy użytecznej dla silnika GTD 350

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Znając charakterystyki stężenia poszczególnych związków jako funkcje siły ciągu lub obciążenia danego silnika oraz równania ich zależności, uzupełniając te informacje o wartości zużycia paliwa i współczynnika nadmiaru powietrza lub stężenia tlenu można by oszacować chwilowe wartości emisji silnika turbinowego w warunkach eksploatacji. Podkreślić należy jednak, że niezbędna i konieczna jest informacja o wartości współczynnika nadmiaru powietrza lub stężenia tlenu w spalinach. Ogólną ocenę parametrów spalania można przeprowadzić na podstawie wartości współczynnika nadmiaru powietrza zawartego w spalinach lub na podstawie stężenia tlenu (rys. 16). Potwierdzają to wzajemne zależności między tymi parametrami (rys. 17). Ich zależności można opisać funkcją linii trendu o dużym współczynniku zgodności $R^2 = 0,95$. Uzyskaną funkcję można wykorzystać do oceny współczynnika nadmiaru powietrza w spalinach na podstawie pomiaru wartości stężenia tlenu. Taką analizę można prowadzić w przypadku stosowania analizatorów składu spalin nieposiadających opcji pomiaru współczynnika nadmiaru powietrza, a realizujących pomiar stężenia tlenu.



Rys. 16. Wartości stężenia tlenu w spalinach jako funkcja siły ciągu dla silnika GTM 120

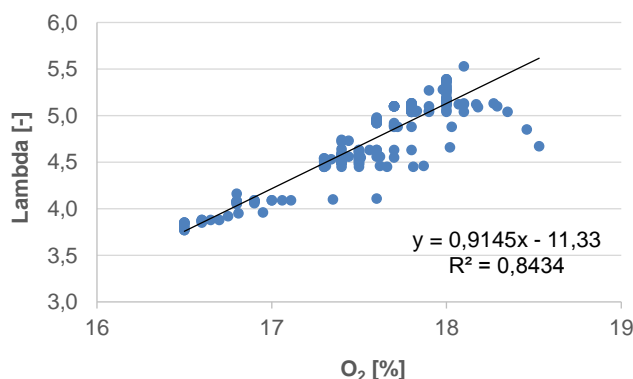


Rys. 17. Zależność wartości współczynnika nadmiaru powietrza jako funkcja stężenia tlenu w spalinach silnika GTM 120

Uzyskana zależność współczynnika nadmiaru powietrza jako funkcja stężenia tlenu w spalinach silnika turbinowego została zweryfikowana dla większej liczby punktów pomiarowych (rys. 18) a uzyskane wyniki potwierdzają występujący charakter.

Określenie wartości współczynnika nadmiaru powietrza jest konieczne do wyznaczenia strumienia masy spalin zgodnie z zależnością (2). Uzupełniając to równanie o funkcyjną zależność współczynnika nadmiaru powietrza od obciążenia uzyskano strumień masy spalin jako funkcję obciążenia (3). W podobny sposób, wykorzystując zależności funkcyjne zmian stężenia związków szkodliwych względem obciążenia, można zaproponować funkcyjną zależ-

ność emisji danego związku jako funkcję siły ciągu lub obciążenia silnika (4).



Rys. 18. Zależność wartości współczynnika nadmiaru powietrza jako funkcja stężenia tlenu w spalinach silnika turbinowego

$$\dot{m}_{sp}(F) = G_e \cdot (1 + \lambda(F) \cdot 14,2) \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \quad (3)$$

$$e_i(F) = a_i \cdot \dot{m}_{sp}(F) \cdot c_i(F) \quad (4)$$

gdzie:

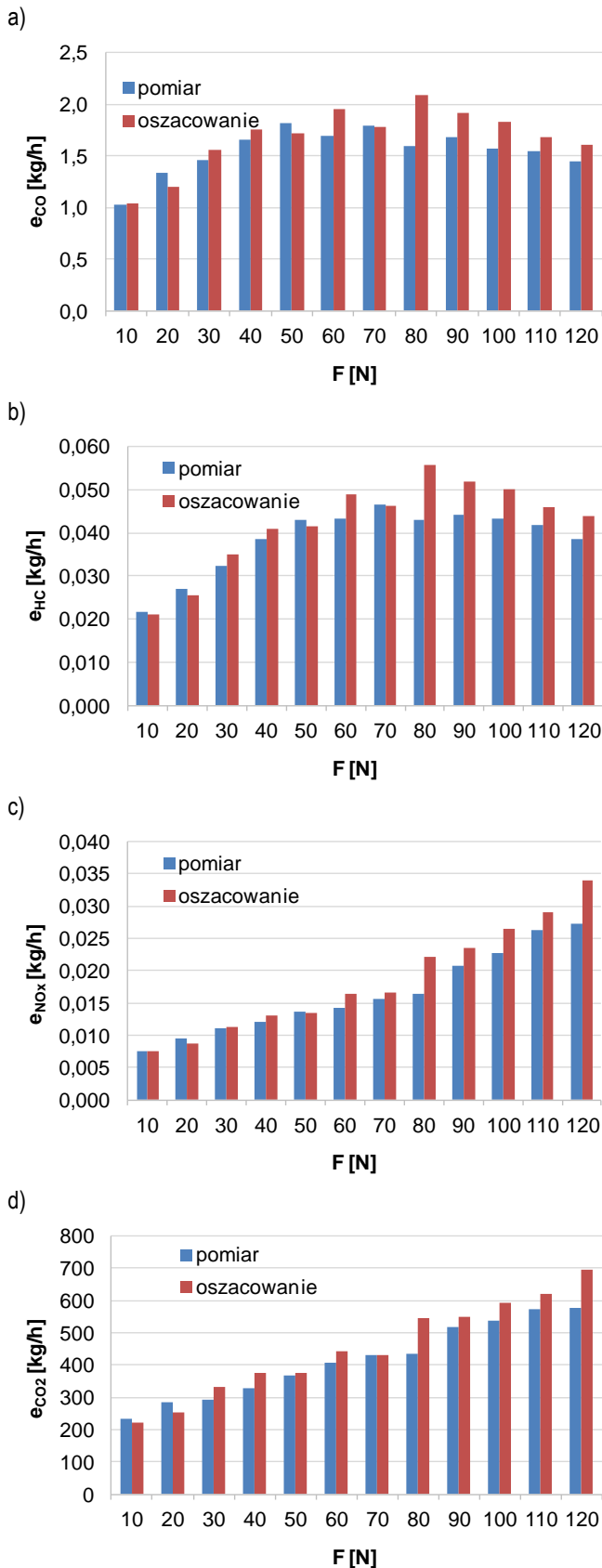
- a_i – współczynnik emisji i -tego związku szkodliwego,
- e_i – natężenie emisji i -tego związku szkodliwego,
- c_i – stężenie i -tego związku szkodliwego w spalinach,
- F – siła ciągu lub obciążenie silnika.

Wykorzystując znajomość wartości stężenia tlenu w spalinach oraz zależność funkcyjną zmian wartości stężenia tlenu jako funkcję obciążenia, to zależność (3) przyjmie postać (5), w której wartość współczynnika lambda będzie zależnością funkcyjną stężenia tlenu $\lambda(f) = c_{iO_2}(F)$.

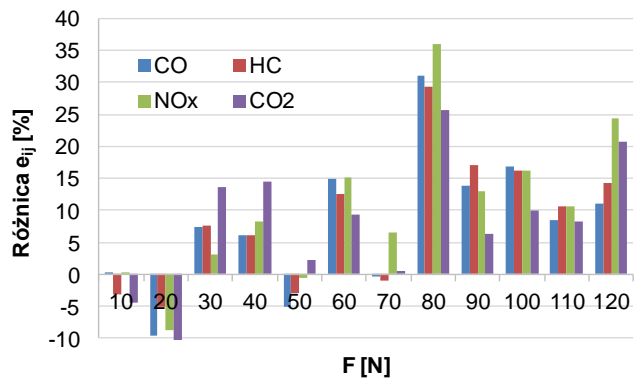
$$\dot{m}_{sp}(F) = G_e \cdot (1 + \lambda(c_{iO_2}(F)) \cdot 14,2) \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \quad (5)$$

Wprowadzając równanie strumienia masy spalin (5), które jest funkcją zależną od obciążenia, do równania (4) wyznaczono wartości emisji zanieczyszczeń w spalinach silnika turbinowego w poszczególnych punktach eksploatacyjnych (rys. 19). Wartości natężenia emisji poszczególnych związków szkodliwych uzyskane w wyniku oszacowania charakteryzują się podobnym rozkładem jak wartości uzyskane na podstawie przeprowadzonych pomiarów. Różnice względne w większości punktów eksploatacyjnych wynoszą do 15% (rys. 20). Wyjątkiem jest natężenie emisji zanieczyszczeń odpowiadające punktowi pracy silnika z siłą ciągu równą 80 N, gdzie różnice procentowe uzyskanych wyników oszacowania są największe i wynoszą 25–35%. Sytuacja ta może wskazywać na ewentualne niedokładności pomiaru podczas badań w tym punkcie eksploatacyjnym. Porównanie procentowe uzyskanych wyników z oszacowania natężenia emisji zanieczyszczeń na podstawie zachodzących zależności z wynikami uzyskanymi w drodze eksperymentu badawczego, wskazuje na możliwość prowadzenia uproszczonej metody szacowania natężenia emisji zanieczyszczeń na podstawie znanych wyznaczonych zależności stężenia poszczególnych związków szkodliwych względem obciążenia silnika.

Podobną analizę przeprowadzono dla badań emisji w warunkach eksploatacyjnych silnika GTD 350.

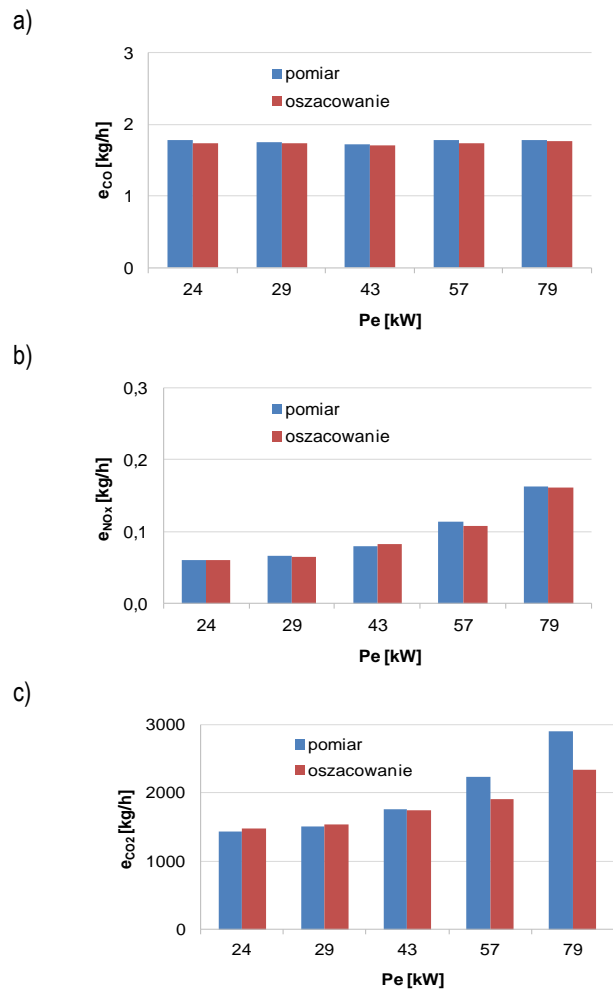


Rys. 19. Zestawienie wyników natężenia emisji poszczególnych związków szkodliwych w spalinach silnika GTM 120 uzyskanych z pomiaru rzeczywistego i w wyniku procedury oszacowania: a) tlenku węgla, b) węglowodorów, c) tlenków azotu, d) dwutlenku węgla



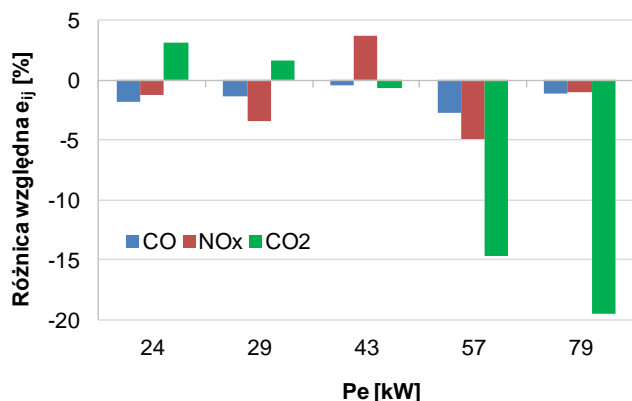
Rys. 20. Różnica względna (w procentach) natężenia emisji związków szkodliwych w spalinach silnika GTM 120 uzyskana z pomiaru rzeczywistego i w wyniku procedury oszacowania

Zgodnie z przedstawioną procedurą wyznaczono wartości natężenia emisji zanieczyszczeń w spalinach silnika GTD 350 dla poszczególnych punktów eksploatacyjnych. Również przeprowadzono procedurę szacowania natężenia emisji z wykorzystaniem zależności funkcyjnych wynikających z rozkładu wartości stężenia jako funkcji obciążenia silnika. Uzyskane dwoma sposobami wartości natężenia emisji zanieczyszczeń poddano wzajemnemu zestawieniu (rys. 21). Uzyskane wartości emisji poszczególnych związków szkodliwych charakteryzują się podobnym rozkładem.



Rys. 21. Zestawienie wyników natężenia emisji związków szkodliwych w spalinach silnika GTD 350 uzyskanych z pomiaru rzeczywistego i w wyniku procedury oszacowania: a) tlenku węgla, b) tlenków azotu, c) dwutlenku węgla

Przeprowadzone porównanie uzyskanych wartości wskazuje na różnice względne w większości punktów eksploatacyjnych nie przekraczające 5%. Wyjątkiem jest tu porównanie względne wartości natężenia emisji CO₂, które w punktach większego obciążenia uzyskuje różnice 15 i 20% (rys. 22). Zaistniała sytuacja wymaga poszerzenia zakresu badań o kolejne punkty eksploatacyjne charakteryzujące się większym obciążeniem silnika.



Rys. 22. Różnica względna (w procentach) natężenia emisji poszczególnych związków szkodliwych w spalinach silnika GTD 350 uzyskana z pomiaru rzeczywistego i w wyniku procedury szacowania

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone analizy wyników badań parametrów eksploatacyjnych silników turbinowych: odrzutowego i turbinowego wałowego, ukierunkowane na ocenę metodologii szacowania natężenia emisji zanieczyszczeń w spalinach na podstawie funkcyjnych zależności stężenia związków szkodliwych od obciążenia silnika, wskazują na zasadność proponowanej metody. Potwierdzają to również uzyskane względne różnice procentowe porównywanych wartości natężenia emisji. Dla większości porównywanych wartości nie przekraczają one 15%. Wyjątkiem są niektóre uzyskane wyniki natężenia emisji, dla których różnice względne wynoszą 15–35%, ale charakter występowania takich wartości wskazuje na prawdopodobne wystąpienie błędu pomiarowego, który należy zidentyfikować. Uzyskane wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, że przedstawiona metoda szacowania natężenia emisji zanieczyszczeń w spalinach na podstawie występujących zależności funkcyjnych parametrów emisyjnych od parametrów eksploatacyjnych, np. obciążenia silnika może być narzędziem wykorzystanym w ocenie emisji zanieczyszczeń z silników turbinowych podczas ich eksploatacji.

BIBLIOGRAFIA

1. Merksiz J., Markowski J., Pielecha J., *Selected issues in exhaust emissions from aviation engines*. Nova Science Publishers. New York 2014.
2. Merksiz J., Markowski J., Pielecha J., Karpinski D., Galant M., *The investigation of the influence of the oxygen additive to fuel on the particle emissions from a small turbine engine*. 18 ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zurich 2014
3. Capocitti S., Khare A., Mildenerger U., *Aviation Industry - Mitigating Climate Change Impacts through Technology and Policy*. Journal of Technology Management & Innovation 2010, vol. 5, no. 2.

4. Chaturvedi A.K., *Aviation Combustion Toxicology: An Overview*. Journal of Analytical Toxicology 2010, vol. 34.
5. Masiol M., Harrison R.M., *Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review*. Atmospheric Environment 2014, vol. 95.
6. Ramanathan V., Feng Y., *Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives*. Atmospheric Environment 2009, vol. 43.
7. Timko M.T., Herndon S.C., Blanco E.D., Wood E.C., Yu Z., Mlake-Lye R.C., Knighton W.B., Shafer L., DeWitt M.J., Corporan E., *Combustion products of petroleum jet fuel, a Fischer-Tropsch synthetic fuel, and a biomass fatty acid methyl ester fuel for a gas turbine engine*. Combustion Science and Technology 2011, vol. 183, no. 10.
8. Załącznik 16 do Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym, *Ochrona środowiska, Tom II – Emisje z silników statków powietrznych*. Wydanie 3, Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego, 2008.

ANALYSIS OF RELATIONSHIP BETWEEN TURBINE ENGINE OPERATING PARAMETERS AND ITS ECOLOGICAL INDICATORS

Abstract

The article concerns the evaluation of exhaust emissions from turbine engines. The results of the work are associated with development of analytical methods useful in estimating the emissions of harmful exhaust gases during turbine engine operating conditions. The results of studies and the interdependence between emission indicators and operating parameters were pointed out. The analysis of these correlations shows a strong similarity in the nature of changes of particular relationship in relation to the engines tested, but also shows their individuality. The article shows the direction of further work to develop methods of assessment the emissions from turbine engines during their operation.

Autorzy:

mgr inż. **Paweł Wirkowski** – Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni, Wydział Mechaniczno-Elektryczny
 dr hab. inż. **Jarosław Markowski** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu
 dr hab. inż. **Jacek Pielecha**, prof. PP – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu
 mgr inż. **Remigiusz Jasiński** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu
 płk pil. mgr inż. **Grzegorz Ślusarz** – 31. Baza Lotnictwa Taktycznego w Poznaniu